

Harald Vennegeerts

**Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung
für Mobile-Mapping-Systeme**

München 2011

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5069-3

**Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 290, Hannover 2011**



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 657

Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme

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. Harald Vennegeerts

geboren am 29.07.1975 in Emden

München 2011

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5069-3

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 290, Hannover 2011

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

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

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 -1283 / - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke

Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker

Tag der mündlichen Prüfung: 29.09.2010

© 2011 Deutsche Geodätische Kommission, München

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

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5069-3

Wir suchen niemals die Dinge, sondern das Suchen nach ihnen.

Blaise Pascal

Kurzfassung

Mit der Entwicklung der Verfahren zur optischen Entfernungsmessung (*light detection and ranging, LIDAR*) sind die Voraussetzungen geschaffen, um Umgebungen räumlich hochauflösend erfassen zu können. Mit zunehmender Messgeschwindigkeit und Genauigkeit der erfassenden Sensoren steigen auch die Anforderungen, um die Positionen massenhaft gescannter Punkte in einem externen Bezugssystem angeben zu können (Referenzierung). Für eine effiziente Erfassung größerer Umgebungen sind dazu bewegte Plattformen (*Mobile-Mapping-Systeme*) erforderlich.

Nutzerseitig bieten die hochaufgelösten räumlichen Modelle vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Da durch die schnelle Erfassung Umgebungen auch großräumig abgebildet werden können, leisten die Modelle einen Beitrag zum Aufbau einer (öffentlichen) Infrastruktur. Des Weiteren ist auch die Bestandsaufnahme verbreitet, die auf spezielle Zwecke ausgerichtet ist. Vielfältige Anwendungsbeispiele zur Zustandsdokumentation finden sich in der Architektur, im Bauwesen, im Anlagenbau, in der Forensik etc. In diesem Zusammenhang sind aus geodätischer Sicht auch die resultierenden Unsicherheiten der gescannten Punkte zu beachten. Im Kontext von Mobile-Mapping-Systemen sind massenhafte Beobachtungen eines hochdimensionalen Beobachtungsraumes charakteristisch, die in einer hochgradig nicht-linearen Beziehung zu den Zielgrößen stehen.

Ein Ziel dieser Arbeit ist die effiziente Fortpflanzung massenhafter Varianzen, die zur hier eingeführten Variante der *inkrementellen Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung (i-VKF)* motiviert. Die empirische Anwendung auf ein Mobile-Mapping-System zeigt, dass damit der Rechenaufwand reduziert werden kann, so dass im Vergleich zur klassischen Variante der Varianzfortpflanzung nur 1/6 der Rechenzeit notwendig ist.

Der Fortschritt der Mobile-Mapping-Systeme geht mit dem georeferenzierender Sensoren (vornehmlich GNSS und inertielle Messeinheiten) einher, infolgedessen sich die Parameter der Georeferenzierung auch direkt bestimmen lassen. Dies setzt jedoch voraus, dass vor allem kostenintensive inertielle Messeinheiten integriert werden. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz nutzt als referenzierende Sensoreinheiten ausschließlich das GNSS und Neigungssensoren (Inklinometer). Jedoch kann das Bewegungsverhalten einer Plattform mit diesen Sensoren nur unzureichend ermittelt werden. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit eine Methode entwickelt, bei der für den kinematischen Aufnahmefall auch die Scandaten genutzt werden, um die Parameter der Georeferenzierung zu schätzen (*Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung*).

Um die Scandaten (hier in Form von 2D-Profilen) trotz ihres lokalen Charakters auch zum Zweck der globalen erdbezogenen Referenzierung verwenden zu können, werden nicht die Positionen und Ausrichtungen gescannter Objekte, sondern daraus abgeleitete Geschwindigkeiten (Rollwinkelgeschwindigkeiten) der Plattform genutzt. Zur Geschwindigkeitsschätzung werden ebene Teilflächen im Objektraum vorausgesetzt.

Damit die Winkelgeschwindigkeiten geschätzt werden können, wird davon ausgegangen, dass sich eine veränderte Ausrichtung der Plattform in den 2D-Profilen abbildet. Demnach ist es erforderlich, dass die ebenen Flächenstücke des Objektraumes nicht mehrheitlich parallel zur Neigungsänderung der Plattform ausgerichtet sind.

Anhand einer Reihe von Testfahrten, bei denen ein prototypisches System auf zwei unterschiedlichen Plattformen installiert war, wurde die Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung mehrfach validiert. Zusätzlich wurde in den Systemaufbau eine hochwertige Inertialeinheit einbezogen, um die Lösungen der Parameter der Georeferenzierung direkt mit einer Referenzlösung vergleichen zu können. Bei der Prozessierung der Scanprofile zeigt sich, dass alle gescannten Szenen genügend ebene Teilflächen (> 5) zur Schätzung der Rollwinkelgeschwindigkeit liefern.

Die Integration von Scandaten zur Berechnung der Parameter der Georeferenzierung bietet im Vergleich zur ausschließlichen Nutzung von Inklinometermessungen deutliche Mehrwerte: Zum einen kann typischen Eigenschaften der Messung flüssigkeitsbasierter Inklinometer entgegenwirkt werden, die durch die Trägheit der Flüssigkeit oder durch Auswirkungen von Beschleunigungen verursacht werden. Zum anderen kann ein höherfrequentes Rollverhalten oberhalb der nutzbaren Frequenz der Inklinometermessungen von 1 Hz aufgelöst werden. Charakteristische Frequenzen des Neigungsverhaltens einer Plattform werden somit eindeutig

erkennbar. Die Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung leistet damit einen Beitrag, um den Aufwand und das Ergebnis eines kinematisch erfassten, hochaufgelösten Punktmodells weiter zu optimieren.

Stichworte: Georeferenzierung, Datenfusion, LIDAR, Terrestrisches Laserscanning, Mobile-Mapping-System, GNSS, INS, Varianz-Fortpflanzung, Punktwolke

Abstract

With the development of procedures for optical distance measurement (*light detection and ranging, LIDAR*), prerequisites have been created to capture the surroundings in a high spatial resolution. Due to increasing data rate and accuracy claims have arisen to refer observations of scanned points to an external reference frame. Moving platforms (mobile mapping systems) are necessary to acquire an extended environment efficiently.

From a users' point of view spatial models in high resolution can be used for a range of applications. Because of the fast acquisition, spatial models are able to contribute to setting up a public infrastructure. Furthermore, an ad-hoc acquisition for documenting tasks is frequently used. Typical applications can be found for example in architecture, construction engineering and in forensic. From a geodetic perspective the focus on the uncertainty of scanned points is mandatory. Concerning mobile mapping systems, large quantities of observations, a high-dimensional observation space and highly non-linear functions are typical.

One goal of this thesis is the efficient variance propagation for mass data. This leads to an incremental approach (*incremental variance-covariance propagation, i-VCP*), which is introduced here. The empirical investigations applied on a mobile mapping system show that the computing time can be reduced to 1/6 compared to the one of the classical approach.

Advances in mobile mapping systems are accompanied by those of georeferencing sensors (primarily GNSS and inertial measurement systems), which provide a direct solution of the georeferencing parameters. This requires the integration of expensive inertial units. The approach presented here is based on GNSS and inclination sensors as exclusive referencing sensors. However, using these referencing sensors, the movement of the platform can be determined only insufficiently. For this reason, the *method of the combined kinematic georeferencing* is developed. The procedure integrates scan data (2D profiles) to reference a kinematic scanning platform. In order to use 2D profiles despite of the local character, the velocity of the platform in the direction of the roll angle is obtained instead of using positions and alignments of scanned objects directly. The velocity estimation presupposes fragmented plane surfaces in the object space.

The estimation requires that the angular movement of the platform appears in adjacent 2D profiles. This is the reason why the inclination of the plane surfaces and the lines in the scan profiles respectively may not vary parallel to the inclination of the platform.

The method of the combined kinematic georeferencing was validated with a proto-typical system installed on two different platforms. Furthermore, a high-grade inertial system was integrated in order to compare the solutions of georeferencing directly. The tests show that all scanned scenes offer small plane surfaces (> 5) to estimate the angular velocity sufficiently.

The use of scan data for the purpose of georeferencing provides additional benefits compared to the exclusive utilisation of inclinometer measurements: On the one hand additional velocity observations act contrary to the effects typical for liquid inclinometers which are caused by inertia or external accelerations. On the other hand high-frequency roll characteristics can be resolved above the usable frequency of the inclinometer measurements of 1 Hz. Typical frequencies of the angular movement of a platform could be estimated precisely. The method of the combined kinematic georeferencing enables to optimise acquisition efforts and results of kinematic scanned points clouds.

Keywords: georeferencing, datafusion, LIDAR, terrestrial laser scanning, mobile mapping system, GNSS, INS, variance propagation, point cloud

Inhalt

1. Einleitung	9
2. TLS - Stand der Entwicklung	13
2.1. Einführung	13
2.2. Instrumentelle Aspekte	14
2.2.1. Distanzmessung	14
2.2.2. Winkelmessung	17
2.3. Räumliche und semantische Aspekte	18
2.3.1. Mobile-Mapping und Raum-Zeit-Bezug	18
2.3.2. Registrierung	21
2.3.3. Georeferenzierung	25
2.3.4. Semantische Aspekte	29
2.4. TLS im ingenieurgeodätischen Kontext	30
2.4.1. Diskretisierung und Repräsentation	31
2.4.2. Beobachtungsraum und Koordinatenraum	33
2.4.3. Referenzsystem und geodätisches Netzwerk	33
2.4.4. Kontrolle und Beschreibung der Beobachtungen	34
3. Mathematische Grundlagen	37
3.1. Berechnung fortgeplanter Varianzen	37
3.1.1. Klassische Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung	37
3.1.2. Unverzerrte Transformation (Unscented Transformation)	38
3.2. Numerische Verfahren zum Differenzieren	40
3.2.1. Differenzieren mittels finiter Differenzen	40
3.2.2. Algorithmisches Differenzieren (AD)	40
3.3. Kalman-Filterung	42
3.3.1. Allgemeiner konzeptioneller Ansatz und optimierte Lösung	42
3.3.2. Erweiterung und Modifikation	43
4. Unsicherheitsbetrachtung für Massendaten	45
4.1. Hintergrund, Motivation und Zielsetzung	45
4.2. Modifizierte Variante der unverzerrten Transformation	48
4.3. Inkrementelle Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung (i-VKF)	50
4.4. Anwendung auf ein Mobile-Mapping-System	51
4.4.1. Funktionale Zusammenhänge	51
4.4.2. Stochastische Modelle	52
4.4.3. Linearisierung für inkrementelle Varianzfortpflanzung	52
4.4.4. Vergleich der Rechenzeiten und der numerischen Ergebnisse	53
4.4.5. Visualisierung mittels stochastischer Punktwolke	55
5. Kombinierte kinematische Georeferenzierung	57
5.1. Motivation	57
5.2. Methodik - Überblick	60
5.3. Prozessierung von Profilschans	61
5.3.1. Indizierung von Linienkandidaten	65

5.3.2.	Filterung und Test	66
5.3.3.	Verschmelzung von Liniensegmenten	68
5.4.	Schätzung der Rollwinkelgeschwindigkeit	69
5.5.	Kombinierte Filterung	73
6.	Systemimplementierung	75
6.1.	Anforderungen	75
6.2.	Systemkomponenten	77
6.2.1.	Terrestrischer Laserscanner	77
6.2.2.	Inklinometer	77
6.2.3.	Inertiales Messsystem (INS)	78
6.3.	Systemaufbau und Kalibrierung	79
6.4.	Untersuchungen zum 2D-Scanmodus (Profilmodus)	80
6.4.1.	Aufbau und Ablauf der Untersuchung	81
6.4.2.	Ergebnisse der kinematischen Untersuchung	82
7.	Validierung	87
7.1.	Übersicht zu den Validierungsmessungen	87
7.2.	Testszene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau	88
7.2.1.	Prozessierung der Scanprofile	88
7.2.2.	Kombinierte Filterung	91
7.2.3.	Schätzung der Positionen, Azimute und Nickwinkel	93
7.2.4.	Vergleich mit Referenzpositionen	94
7.3.	Testszene: Hannover Neues Rathaus	96
7.4.	Testszene: Hannover Hauptbahnhof	99
7.4.1.	Ernst-August-Platz	99
7.4.2.	Innenraum: Bahnhofshalle und Verteilerebene	102
8.	Schlussbemerkungen	107
8.1.	Resümee	107
8.2.	Ausblick	108
A.	Anhang	111
A.1.	Rotationsmatrizen	111
A.2.	Spezifikationen der eingesetzten Sensoren	112
A.2.1.	Terrestrischer Laserscanner: Zoller und Fröhlich Imager 5006	112
A.2.2.	Inklinometer: NS15 DMG 15-U	112
A.2.3.	Inertiale Messeinheiten: Honeywell Lavernav II und iMAR iNAV-RQH-1003	113
	Abbildungsverzeichnis	115
	Literaturverzeichnis	119
	Curriculum vitae	127

1. Einleitung

Mit den Fortschritten in den optischen Sensortechnologien und den Möglichkeiten, Daten massenhaft zu verarbeiten, zu speichern und zu verbreiten, sind die Voraussetzungen geschaffen, um räumliche Umgebungen umfassend in Modellen abbilden zu können. Für diese Abbildungen wird eine zunehmende Informationsdichte angestrebt. Dies beinhaltet, räumliche Umgebungen hochaufgelöst geometrisch darstellen zu können. Um die Modelle zu gewinnen, ist ein hoher Automatisierungsgrad bei geringem Erfassungsaufwand zu erreichen. Aufgrund dieser Anforderungen werden vielfach mehrere Sensoren zu *Multi-Sensor-Systemen* zusammengesetzt. Voraussetzung für die gemeinsame Nutzung ist ein bekannter räumlicher und zeitlicher Bezug zwischen den Systemkomponenten, der mittels Kalibrierung und Synchronisation hergestellt werden kann. Wird darauf aufbauend die Menge der Sensordaten zusammengeführt und gemeinsam ausgewertet, wird dies auch *Sensordatenfusion* oder kurz *Datenfusion* bezeichnet.

Als objekterfassende Sensoren werden bildgebende oder direkt entfernungsmessende Einheiten verwendet. Für den Einsatz von Laserscannern ist in diesem Zusammenhang die optische hochfrequente Entfernungsmessung (*light detection and ranging, LIDAR*) kennzeichnend. Bei der kinematischen Erfassung sind die Beobachtungen unterschiedlicher Zeitpunkte in räumlichen Bezug zu setzen. Dieser Bezug kann lokal durch eine erfassende Einheit selbst hergestellt werden oder er wird durch die Beziehung zu einem externen erdbezogenen Bezugssystem (*Georeferenzierung*) erstellt. Die unterschiedlichen Konzepte, wie die Sensoren je nach Erfassungs- bzw. Referenzierungsfunktion eingesetzt werden, verdeutlicht die Abbildung 1.1.

Der Ansatz, ein Bezugssystem ausschließlich aus einer lokalen Umgebung zu realisieren, wird im *SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping)* verfolgt. Dabei erfasst eine (autonom) bewegte Plattform die Umgebung, die gleichzeitig ein Bezugssystem darstellt und in der die Plattform navigiert (Abb. 1.1, a). Für die Systeme, die zum Zweck der (großräumigen) Umgebungserfassung konzipiert sind und deren Modelle einen globalen Bezug liefern, ist die Bezeichnung *Mobile-Mapping-System* verbreitet. Bei den Mobile-Mapping-Systemen ist es typisch, dass Sensoren monofunktional eingesetzt werden, d. h. entweder für georeferenzierende oder für objekterfassende Aufgaben (Abb. 1.1, b). Die Georeferenzierung basiert hier auf dem *GNSS (Global Navigation Satellite System)* und auf inertialen Messsystemen (*INS*). Mit zunehmender Genauigkeit und Messgeschwindigkeit der erfassenden Sensoren steigen dabei die Anforderungen und damit die Investitionskosten für die Lösungen der Georeferenzierung.

Die hochauflösenden Sensoren, die eine lokale Umgebung erfassen, bieten darüber hinaus die Möglichkeit, selbst Beobachtungen zur Georeferenzierung beizusteuern. Dieser Gedanke ist wegweisend für diese Arbeit. Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein terrestrischer Laserscanner eingesetzt wird. Dessen Beobachtungen sind hochfrequent, sequentiell und haben jeweils einen lokalen Charakter.

Als Zielsetzung dieser Arbeit ist ein Ansatz zu entwickeln, um für den Fall einer kinematischen Aufnahme von einer bewegten Plattform die lokalen Beobachtungen der objekterfassenden Einheit mit den Beobachtungen ausschließlich referenzierender Einheiten für die Aufgabe der Georeferenzierung integriert auszuwerten. Dies führt zur *Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung* (Abb. 1.1, c). Die Lösung der Georeferenzierung ist bei einem minimierten Aufwand zusätzlicher referenzierender Sensorik zu optimieren.

Der Beitrag der Beobachtungen des objekterfassenden Sensors zur Georeferenzierung soll möglichst unabhängig von der geometrischen Gestalt der Umgebung einsetzbar sein. Aus diesem Grund sollen keine absoluten Annahmen wie die Ausrichtung von Objekten im Raum getroffen werden. Stattdessen sind Änderungen wie Rotationsgeschwindigkeiten (Drehraten) der Plattform als Beobachtungselemente zur Georeferenzierung einzubeziehen. Dies bedarf einer Prozessierung der Scans, die auch für hochaufgelöste Laserscanner effizient einsetzbar ist. Zudem ist eine angepasste Filterstrategie notwendig, um die heterogenen Beobachtungselemente

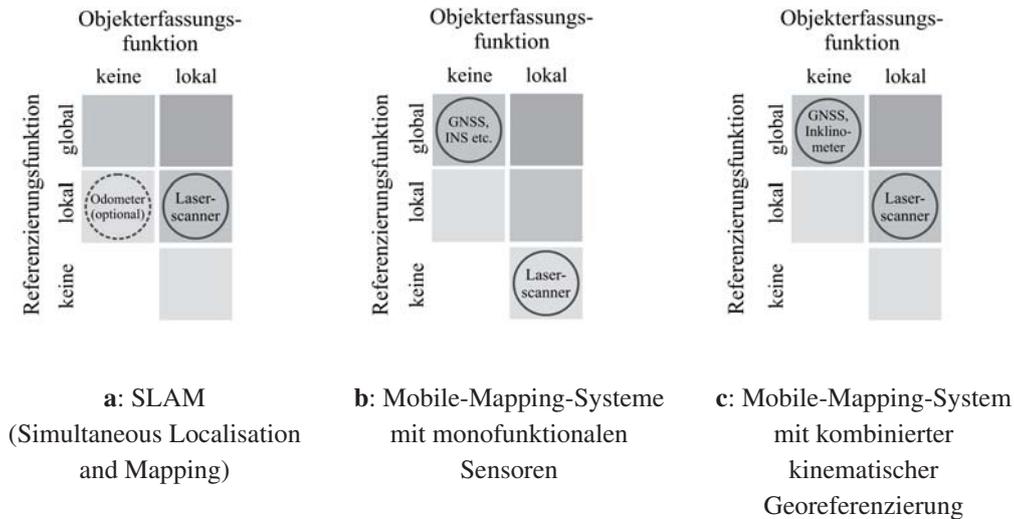


Abbildung 1.1: Typische Funktionszusammenhänge erfassender und referenzierender Sensoren für die kinematische Umgebungserfassung auf Basis von Laserscannern

- hier Geschwindigkeitsbeobachtungen aus den Scans und Neigungsbeobachtungen eines Inklinometers - zu kombinieren.

Neben den Zielgrößen in Form dreidimensionaler Punktmodelle ist die Angabe zugehöriger Unsicherheiten wesentlicher Bestandteil. Bei Multi-Sensor-Systemen ist es charakteristisch, dass die Beobachtungen der einzelnen Sensorkomponenten bereits einen hohen Prozessierungsgrad erreicht haben können. Die hohen Auflösungen gehen vielfach mit einer hohen Datenrate einher, wobei die massenhaften Beobachtungen der Menge der Sensoren funktional betrachtet in hochgradig nicht-linearen Zusammenhängen stehen. Dies erschwert insgesamt die Angabe resultierender Unsicherheiten, insbesondere auch im Fall von Mobile-Mapping-Systemen. Resultierende Unsicherheiten werden daher vielfach nur generell, d. h. bezogen auf typische Bedingungen wie eine kontinuierliche Verfügbarkeit von GNSS-Positionen quantifiziert. Aufgrund der Menge der Einflussgrößen und der variablen Bedingungen werden vor allem bei Multi-Sensor-Systemen Unsicherheiten durch pauschale Angaben nur unzureichend repräsentiert.

Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit näher untersucht werden, wie sich für den Fall massenhaft erfasster Daten Unsicherheiten auch situativ angeben lassen. Ziel ist die effiziente Berechnung von Unsicherheiten gescannter Punkte und eine Präsentation, durch die die massenhaften Ergebnisse zugänglich gemacht werden können. Die Quantifizierung der Varianzen soll in mehreren Varianten näher beleuchtet werden. Darüber hinaus wird auch ein inkrementeller Ansatz (*inkrementelle Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung, i-VKF*) vorgestellt, mit dem sich speziell für hochaufgelöste Massendaten Varianzen von Zielgrößen effizienter quantifizieren lassen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich folgendermaßen:

Wesentlicher Baustein für das hier betrachtete hochauflösende Erfassungssystem ist der große Entwicklungsfortschritt terrestrischer Laserscanner. Die zugehörigen Verfahren, die mit dem Begriff *terrestrisches Laserscanning (TLS)* beschrieben werden, umfassen neben den instrumentellen Aspekten zudem Konzepte, die räumliche und semantische Zusammenhänge aus den Scanmodellen herstellen. Eine Einführung dazu liefert das Kapitel 2. Im Vergleich zu den in der Ingenieurgeodäsie etablierten Sensoren und Verfahren stellt das TLS ein Novum dar. Dies gilt in mehrfacher Hinsicht. So sind elementare Beobachtungselemente wie einzelne Punkte von nachrangiger Bedeutung. Sollen trotzdem Zustände - wie zum Zweck der Deformationsmessung - zu unterschiedlichen Epochen miteinander verglichen werden, sind in den Scans repräsentative Objekte zu identifizieren. Für den automatischen Auswerteprozess ist es daher prinzipiell notwendig, neben dem geometrisch-zeitlichen auch den semantischen (inhaltlichen) Informationsgehalt der aus den Scans abgeleiteten Objekte zu beschreiben und zu quantifizieren. Darüber hinaus werden - hervorgerufen durch den hohen Automatisie-

rungsgrad - resultierende Unsicherheiten der Beobachtungen von einer Menge von Einflüssen geprägt. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die ingenieurgeodätische Modellierung werden ebenfalls in Kapitel 2 diskutiert.

Das anschließende Kapitel 3 führt in die mathematischen Zusammenhänge ein, die grundlegend für die in dieser Arbeit vorgestellten Auswertemethoden sind. Diese umfassen mehrere Varianten zur Fortpflanzung von Varianzen. Sofern dafür Linearisierungen in Form von Ableitungen erforderlich sind, stellt dies speziell für Massendaten eine große Herausforderung dar. Da die Ableitungen in dieser Arbeit durchgehend mittels algorithmischen Differenzierens berechnet werden, wird die prinzipielle Vorgehensweise kurz vorgestellt. Von wesentlicher Bedeutung bei der Sensorfusion ist die mathematische Beschreibung und die optimierte Lösung der Menge der Beobachtungselemente. Diese werden mittels Kalman-Filterung kombiniert, deren Zusammenhänge dieses Kapitel schildert.

Die erwähnten Anforderungen zur Angabe von Unsicherheiten werden in Kapitel 4 betrachtet. Das Kapitel wird durch eine Diskussion eingeleitet, die die Umstände speziell für den Fall von Multi-Sensor-Systemen mit massenhaft anfallenden Daten näher behandelt. In dem Kapitel wird eine alternative Linearisierungsstrategie vorgeschlagen, mit der für hochaufgelöste Daten Varianzen erheblich effizienter berechnet werden können. Dies wird anhand einer Anwendung auf ein Mobile-Mapping-System verdeutlicht. Außerdem wird gezeigt, wie sich punktbezogene Varianzen auch für Massendaten anschaulich visualisieren lassen.

Das Kapitel 5 stellt die Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung vor, beginnend mit einem bewertenden Vergleich bekannter Verfahren zur Georeferenzierung, der schließlich zum vorgestellten Ansatz motiviert. Neben der Prozessierung der Scans und der daraus abgeleiteten Rotationsgeschwindigkeiten wird verdeutlicht, wie die Beobachtungselemente in einem gemeinsamen Filteransatz fusioniert werden können.

Vorüberlegungen zur prototypischen Umsetzung enthält das Kapitel 6. Darin werden die Anforderungen formuliert, auf deren Basis die Systemkomponenten ausgewählt werden. Zum Zweck der Validierung werden ebenfalls inertielle Einheiten integriert. Das Kapitel zeigt die tatsächliche Implementierung und schildert Vorgehensweisen zur Kalibrierung des Systems. Da der Prototyp bei der Aufnahme den 2D-Modus (Profilmodus) nutzt, wird dieser Modus näher beleuchtet. In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse kinematischer Untersuchungen auf einer Kalibrierbahn vorgestellt.

Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens der kombinierten kinematischen Georeferenzierung veranschaulicht das Kapitel 7. Es enthält Ergebnisse einer Reihe von Testszenarien, die sich hinsichtlich Straßenoberflächen und Abschattungssituationen voneinander unterscheiden. Ein Schwerpunkt der Validierung ist die Prozessierung der Profilschans in Kombination mit Inklinometermessungen. Durch die Integration einer inertialen Messeinheit ist ein direkter Vergleich auf Basis der Parameter der Georeferenzierung möglich. Darüber hinaus wird auch eine mehrminütige Testfahrt im Innenraum analysiert, um zu verdeutlichen, welchen Beitrag die aus den Profilschans abgeleiteten Rotationsgeschwindigkeiten zur Referenzierung leisten können.

Schließlich fasst das Kapitel 8 das Potential der in dieser Arbeit dargestellten Ansätze zusammen und fügt sie in den eingangs erwähnten Gesamtkontext zur kinematischen Umgebungserfassung ein. Bezüglich der Unsicherheitsbetrachtung von Massendaten zeigt das Kapitel Vorschläge zu einer erweiterten Linearisierungsstrategie der inkrementellen Varianzfortpflanzung. Darüber hinaus wird angeregt, wie der Ansatz der kombinierten kinematischen Georeferenzierung zukünftig fortentwickelt werden kann.

2. TLS - Stand der Entwicklung

2.1. Einführung

Mit dem Begriff des terrestrischen Laserscannings (TLS) werden aktuell Verfahren bezeichnet, mit denen im terrestrischen Einsatz auf Basis des Laserlichtes räumliche Messungen automatisch durchgeführt werden können. TLS umfasst heute einen Themenkomplex, der sich über instrumentelle, räumliche-zeitliche als auch semantische Bereiche erstreckt. Dieses Kapitel verschafft eine Übersicht über den Stand der Entwicklungen (Abb. 2.1).

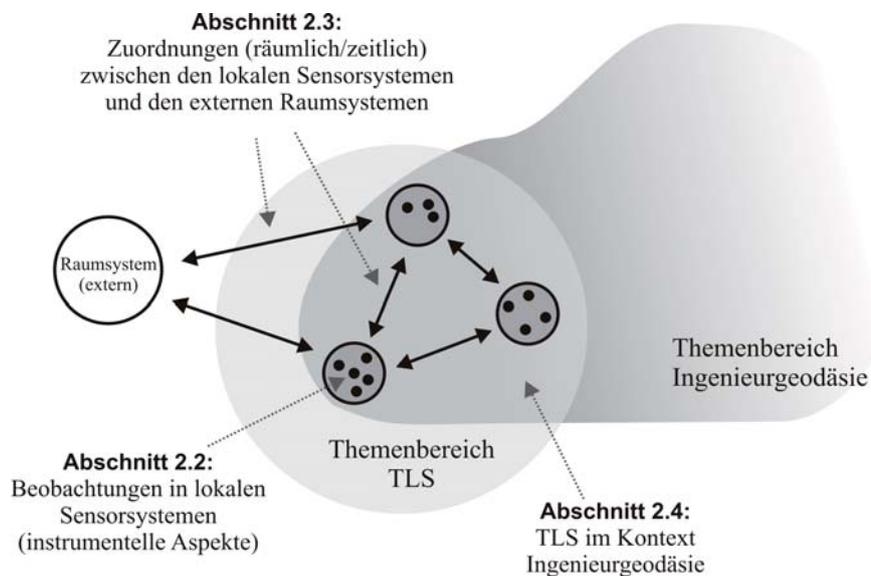


Abbildung 2.1: Symbolisierte Zusammenhänge der Themen des Kapitels 2

Ausgehend von den instrumentellen Eigenschaften eines Laserscanners werden zunächst die Beobachtungen in Form von Messgrößen betrachtet. Prägend ist hier der Begriff *Scanning* (engl. to scan = abtasten, rastern), der das sequentielle Erfassen von Objekten impliziert. Im Gegensatz zu den bildgebenden Verfahren wird dabei nicht simultan erfasst, sondern einzelne, aufeinander folgende Messungen erzeugen die gesamte Abbildung eines Objektes. Für den automatischen Scanprozess ist es daher wesentlich, wie schnell einzelne Messungen ausgelöst werden können.

Die Abtastrate wird durch das eingesetzte Verfahren der Distanzmessung geprägt. Dieses bestimmt zum einen die Reichweite, d. h. den Bereich, in dem Distanzen eindeutig ermittelt werden können und zum anderen die Geschwindigkeit, d. h. den zeitlichen Aufwand, der benötigt wird, um Distanzen zu aufeinander folgenden Zeitpunkten zu erfassen. Die Distanzmessung kann vor allem durch die Art der Modulation charakterisiert werden. Terrestrische Laserscanner nutzen sowohl das Verfahren der Impulslaufzeit (*time of flight*) als auch das des Phasenvergleichs (*phase shift*). Die geometrische Größe der Distanz wird dabei analog zur Distanzmessung mittels Mikrowellen und infraroten Wellen gewonnen [DEUMLICH und STAIGER 2001, JOECKEL et al. 2007]. Deren spezielle Eigenschaften und Varianten der Winkelmessung werden in Abschnitt 2.2 erläutert. In Laserscannern wird zur Distanzmessung auch das Triangulationsverfahren eingesetzt. Konfigurationsbedingt nimmt die Messgenauigkeit jedoch mit größeren Entfernungen stark ab, wodurch das Verfahren vor allem im industriellen Nahbereich Anwendung findet. Für den hier behandelten terrestrischen Einsatz (Entfernungsbereich bis ca. 100 m) wird es daher nicht näher betrachtet.

Das Laserscanning basiert auf der Messung einzelner Punkte, die auf lokale Sensorsysteme bezogen werden. Sind die zu scannenden Objekte sowie der Scanner im Zentrum der Aufnahme unbewegt, werden diese Aufnahmen auch *statische Scans* genannt. Ist das Zentrum des Scanners oder das zu scannende Objekt hingegen in Bewegung, werden die zugehörigen Verfahren auch mit dem Begriff *kinematisches TLS* (kurz: *k-TLS*) zusammengefasst.

Um den Bezug der lokalen Sensorsysteme zueinander und zu externen Systemen herzustellen, gibt es eine Reihe von Strategien, damit aus den massenhaften Punkten schließlich Umgebungen zusammenhängend durch Punktwolken abgebildet werden können. Wie diese Modelle erstellt werden, ist Inhalt des Abschnitts 2.3. In den Punktwolken repräsentieren die relativen geometrischen Positionen der Punkte zueinander zunächst ausschließlich den Informationsgehalt einer Aufnahme. Der Abschnitt 2.3.4 erörtert, wie Punkte in Objekte vermengt werden können, wie diese Objekte sachliche (semantische) Merkmale erhalten und wie sich diese für den Auswerteprozess nutzen lassen.

Gegenüber den traditionellen Sensoren wie Tachymetern, GNSS-Sensoren etc. werden terrestrische Laserscanner erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit in der Ingenieurgeodäsie eingesetzt. Das Verfahren des terrestrischen Laserscannings weist typische Eigenschaften auf, die im Zusammenhang mit den methodischen Elementen der Ingenieurgeodäsie in Abschnitt 2.4 diskutiert werden. Dieser Abschnitt motiviert dazu, Mobile-Mapping-Systeme auch als Bestandteil der Ingenieurgeodäsie zu verstehen.

2.2. Instrumentelle Aspekte

2.2.1. Distanzmessung

Impulslaufzeit

Wird das Laserlicht in Form eines Pulses mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit c emittiert, so ist die Entfernung r zum reflektierenden Objekt proportional zur Laufzeit t_L dieses Pulses:

$$r = \frac{t_L \cdot c}{2}. \quad (2.1)$$

Funktional betrachtet resultiert danach eine Unsicherheit der Distanzmessung aus der Unsicherheit von Laufzeitmessung und Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Unsicherheit der Distanzmessung unabhängig von der tatsächlichen Entfernung zum Objekt [PETRIE und TOTH 2009]. Durch die hohe Geschwindigkeit c sind an die Laufzeitmessung entsprechend hohe Anforderungen zu stellen. Aus technischer Sicht ist die diskrete zeitliche Zuordnung einer Flanke des Laserimpulses zu gewährleisten. Um eine hohe Auflösung der Laufzeitmessung und damit der Distanzmessung zu erreichen, werden kurze Intervalle mit einem hochstabilen Oszillator generiert und über einen Zähler erfasst. Eine Auflösung der Distanzmessung von 1 cm erfordert dabei eine Taktfrequenz von 15 GHz [PETRIE und TOTH 2009]. Die Ankunftszeit eines Impulses wird üblicherweise über einen Schwellwert für das empfangene Signal definiert [THIEL und WEHR 2004]. Da die Signalstärke insgesamt von der Reflektivität der Zieloberfläche abhängig ist, kann dieser Schwellwert jedoch nicht konstant angenommen werden. [THIEL und WEHR 2004] schlagen einen linearen Anpassungsfaktor vor, d.h. bei höherer Reflektivität wird der Schwellwert erhöht, wodurch sich die Ankunftszeit verzögert. Außerdem kann die Signalform genutzt werden, um Merkmale von Oberflächen zu extrahieren. In diesem Zusammenhang untersucht [JUTZI 2007] eine Reihe von Methoden, um neben der Entfernung auch Entfernungsvariationen und die Reflexion am Objekt zu ermitteln.

Zusätzlich zur Zeitmessung ist auch die tatsächliche Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = c_0/n$ zu bestimmen, die im Verhältnis zur Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum c_0 mit dem Brechungsindex n skaliert wird. Prin-

ziell resultiert eine repräsentative Ausbreitungsgeschwindigkeit aus Brechungsindizes, die für alle Teillängen $d\tau$ über die gesamte Distanz zu integrieren sind [JOECKEL et al. 2007]:

$$n = \frac{1}{r} \int_0^r n(\tau) d\tau. \quad (2.2)$$

Bei der terrestrischen Distanzmessung wird der Brechungsindex üblicherweise unter Verwendung einer standpunktbezogenen Temperaturmessung approximiert.

Da beim Impulslaufzeitverfahren für einzelne Impulse hohe Energien eingesetzt werden können, lassen sich große Entfernungen bis zu mehreren km überbrücken. Die dadurch entstehenden langen Laufzeiten limitieren gleichzeitig die Pulsrate

$$t_p = \frac{1}{f_p}, \quad (2.3)$$

für die gilt:

$$t_p \stackrel{!}{>} t_L. \quad (2.4)$$

Für eine eindeutige Zuordnung kann also kein Impuls gesendet werden, bevor der vorherige nicht empfangen wurde. Entfernungen von z. B. 5 km können daher nur mit einer maximalen Pulsfrequenz von 30 kHz beobachtet werden. Werden Annahmen zur relativen Distanzänderung getroffen, können auch höhere Pulsfrequenzen eingesetzt werden. Aus diesem Grund verwenden aktuelle Entwicklungen flugzeuggetragener Systeme des ALS (*Airborne Laser Scanning*) mehrere Signale, die innerhalb der Empfangszeit emittiert werden (*multiple-pulse in the air, MPiA*), um damit eine höhere Auflösung in zeitlicher und schließlich räumlicher Hinsicht zu erreichen [ROTH und THOMPSON 2008].

Ein Vorteil des Impulslaufzeitverfahrens liegt darin, dass oberhalb der Pulsfrequenz mehrere Impulse (*multi-echo* oder *multiple-pulse*) oder ganze Signalspektren ausgewertet werden können (*full waveform*) [MALLET und BRETAR 2009]. In einer Beobachtungsrichtung werden so mehrere Impulse erfasst, wenn örtlich vordergründige Objekte für das Laserlicht teildurchlässig sind.

Zur Segmentierung und Klassifikation ist es hilfreich, wenn die Spektren vorab modelliert bzw. parametrisiert werden. Daher sind für die empfangenen Energien sowohl das funktionale Modell als auch die zugehörigen Parameter zu ermitteln. Die die Spektren approximierenden Funktionen sind in Abhängigkeit von der Größe der reflektierenden Flächen zu wählen. Werden die Spektren von Reflexionsflächen kleinen Durchmessers erfasst, können die approximierenden Funktionen als Summen gaußscher Verteilungen beschrieben werden [WAGNER et al. 2006]. Bei Spektren von Flächen mittleren und großen Durchmessers ist diese Annahme einer gaußschen Verteilung jedoch nicht zulässig, wenn die Reflexion des Laserlichts von der Dämpfung (Attenuation) der Objekte (wie z. B. die der Vegetation) geprägt ist. Für diesen Fall verwenden [MALLET et al. 2009] eine Reihe zusätzlicher, asymmetrischer Verteilungsfunktionen. Diese bilden einzelne parametrische Funktionen (sog. Objekte x_i), die zusammengesetzt eine Konfiguration \mathbf{x} darstellen und ein Spektrum repräsentieren. Über eine gesamte Konfiguration wird eine Energiefunktion aufgestellt, die neben den Daten selbst auch die physikalischen Eigenschaften der Lasermessung berücksichtigt. Zur Minimierung der Energiefunktion sind dabei sowohl die Anzahl der Objekte, die Art der Verteilungsfunktionen als auch deren Parameter zu schätzen.

Mittlerweile bieten auch terrestrische Systeme die Möglichkeit, volle Signalspektren zu registrieren [PETRIE und TOTH 2009]. Die Analyse der Spektren verfolgt dabei das Ziel, Parameter zur Klassifikation zu extrahieren. Anwendungsgebiete finden sich aufgrund der notwendigen Teildurchlässigkeit des Laserlichts vor allem in der Klassifikation einer Vegetation (z. B. um Baumarten zu unterscheiden [REITBERGER et al. 2008]). Die Ergänzung um ein Signalspektrum stellt für die Erfassung der für Licht teildurchlässigen Objektoberflächen einen erheblichen Informationsgewinn dar. Es ist daher zu erwarten, dass zukünftig auch im terrestrischen Einsatz die Technologie für die Analyse und Klassifikation von Objektstrukturen vermehrt eingesetzt wird.

Phasenvergleich

Bei der Distanzmessung mittels Phasenvergleich wird das Laserlicht als Trägerwelle eingesetzt, um die Amplitude A_u eines niederfrequenten Nutzsignals $u(t)$ der Frequenz f_u zu modulieren (*amplitude modulation continuous wave*)

$$u(t) = A_u \sin(2\pi f_u t + \varphi). \quad (2.5)$$

Wird das Signal am Zielobjekt reflektiert, so kann aus der Phasendifferenz φ zwischen gesendetem und empfangenem Signal und der Modulationswellenlänge λ_u direkt auf die Entfernung r zum Objekt geschlossen werden

$$r = \frac{\varphi}{2 \cdot 2\pi} \lambda_u. \quad (2.6)$$

Die atmosphärischen Bedingungen prägen die Modulationswellenlänge λ_u mit

$$\lambda_u = \frac{c_0}{n \cdot f_u}, \quad (2.7)$$

wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum c_0 wie bei der Impulslaufzeitmessung mit einem mittleren Brechungsindex n entlang der Wegstrecke skaliert wird. Der Brechungsindex hat damit einen reziproken Einfluss auf die ermittelte Entfernung. Um aktuelle örtliche Verhältnisse zu berücksichtigen, können die in der elektrooptischen Distanzmessung üblichen Korrekturmodelle (1. Geschwindigkeitskorrektur) angewandt werden [JOECKEL et al. 2007]. Bei typischen Messbedingungen betragen diese Korrekturen bis zu 10 ppm [KERN 2003, RIETDORF 2005] und sind daher auch bei Laserscannern mit phasenbasiertem Distanzmessverfahren in Umgebungen mit großen Temperaturdifferenzen explizit zu berücksichtigen.

Neben atmosphärischen Einflüssen verursachen elektronische Bauteile während der Messung sensorintern eine Drift, die sich auf die Phasendifferenz φ auswirkt. Dominante temperaturabhängige Anteile lassen sich intern durch Temperatursensoren kontrollieren. Zudem kann im Messprozess periodisch eine interne Referenzstrecke beobachtet werden, deren Phasenänderung kontinuierlich auf die zwischenzeitlichen Messungen angebracht wird [WÖLFELSCHNEIDER et al. 2005].

Um eine möglichst große Entfernung eindeutig lösen zu können, ist die Modulationswellenlänge entsprechend groß zu wählen. Je größer jedoch die Modulationswellenlänge, desto kleiner die Auflösung der Entfernung r , die unmittelbar abhängig von der trennbaren Phasendifferenz $\Delta\varphi$ einer Modulationswellenlänge λ_u ist. Deshalb werden gleichzeitig mehrere Nutzsignale moduliert. Mit den langwelligen Anteilen lassen sich die Mehrdeutigkeiten der kurzwelligen Anteile bis zur kleinsten Modulationswellenlänge λ_{min} lösen. Der sensorbezogene Eindeutigkeitsbereich ist beim phasenbasierten Distanzmessverfahren durch die größte Modulationswellenlänge λ_{max} begrenzt. Darüber hinaus kann die Mehrdeutigkeit von λ_{max} durch Kenntnis des Objektverlaufs auch aus dem Objektraum geschätzt werden.

	Impulslaufzeit	Phasenvergleich
Distanz	$r = \frac{c \cdot t_L}{2}$	$r = \frac{\varphi}{4\pi} \lambda_u$
Auflösung der Distanz	$\Delta r = \frac{1}{2} c \cdot t_L$	$\Delta r = \frac{\lambda_{min}}{4\pi} \Delta\varphi$
Maximale (eindeutige) Distanz	$r_{max} = \frac{1}{2} c \cdot t_f$	$r_{max} = \frac{\lambda_{max}}{2}$
Unsicherheit der Distanz	$\sigma_r \propto \frac{c}{2} t_{rise} \frac{1}{\sqrt{SNR}}$	$\sigma_r \propto \frac{\lambda_{min}}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{SNR}}$

Tabelle 2.1.: Vergleich der Distanzmessverfahren (nach [WEHR und LOHR 1999])

Die Tabelle 2.1 vergleicht die Eigenschaften der Distanzmessung beider Verfahren. Entscheidend für die Unsicherheit der Verfahren ist die Festlegung des Zeitpunktes eines emittierten (aufsteigenden) Impulses t_{rise} (Impulslaufzeit) bzw. die kleinste Modulationswellenlänge λ_{min} (Phasenvergleich). Zudem ist die Unsicherheit

beider Verfahren umgekehrt proportional zur Wurzel des Signal-Rausch-Verhältnisses SNR . Für flugzeuggetragene Systeme stellen [WEHR und LOHR 1999] die Unsicherheiten beider Verfahren in direkte Relation und kommen zu dem Ergebnis, dass für das Impulslaufzeitverfahren eine um ein Vielfaches günstigere Unsicherheit erreichbar ist als für das Phasenvergleichsverfahren. Diese Abschätzung ist jedoch nur begrenzt auf terrestrische Systeme übertragbar, da im flugzeuggetragenen Einsatz Impulse mit sehr hoher Leistung ausgesandt werden können, wodurch sich ein entsprechend hohes Signal-Rausch-Verhältnis ergibt. Einflüsse auf dieses Verhältnis werden aus technischer Sicht umfassend in [JELALIAN 1992] erläutert. Neben den dargestellten Unsicherheiten sind bei der Distanzmessung auch eine Reihe systematischer Effekte bekannt. Diese ergeben sich vor allem daraus, dass bei der berührungslosen Messung die Distanz zu unterschiedlichen Bedingungen, Entfernungsbereichen und Objektstrukturen zu diskretisieren ist. Ein Überblick über die bekannten Einflussgrößen und die daraus ableitbaren systematischen Effekte der Distanzmessverfahren für terrestrische Laserscanner findet sich in [LICHTI et al. 2005, SCHULZ 2007, RESHETYUK 2009].

2.2.2. Winkelmessung

Die hohen Frequenzen der Distanzmessung liefern die Voraussetzung, um schnell mittels bewegten Ablenkungseinheiten die Umgebung automatisch abtasten zu können. Als Ablenkungseinheiten kommen oszillierende oder rotierende Spiegel bzw. Prismen zum Einsatz [PETRIE und TOTH 2009]. Wird ein terrestrischer Laserscanner auf einem festen Standpunkt eingesetzt, ergeben sich dadurch charakteristische Gesichtsfelder, nach denen Scannertypen klassifiziert werden können (sog. *Kamera-*, *Hybrid-* bzw. *Panorama-*Scanner) [STAIGER 2003]. Je nach Ausrichtung der Ablenkungseinheit sind Korrekturmodelle für die Winkel- und für die Streckenmessung aufzustellen. [JOECKEL et al. 2007] leiten dazu die funktionalen Beziehungen für mehrere Variationen rotierender Planspiegel und Prismen her.

Um die Stellung der rotierenden Umlenkeinheiten den Streckenmessungen zuordnen zu können, ist diese zeitlich und radial zu erfassen. Die radiale Stellung, d. h. die Richtung lässt sich durch elektro-optische Enkoder ermitteln. Dazu wird eine kreisförmige Glasplatte eingesetzt, die (in mehreren Spuren) binär codiert ist. Mithilfe von Photodioden kann dann die Stellung der Glasplatte optisch abgetastet werden. Dies geschieht über einen mehrspurigen Code (absolut) bzw. über ein einspuriges regelmäßiges Raster (inkrementell). Mehrere in Sektoren angeordnete Photodioden erlauben es, auch beim einspurigen regelmäßigen Raster die Drehrichtung zu bestimmen. Da fertigungstechnisch auf den Glasplatten der Code nur bis zu einer begrenzten Auflösung markiert werden kann, werden zusätzliche Interpolationsverfahren zur Feinmessung integriert. Dabei werden vielfach mehrere Photodioden eingesetzt und deren Signal miteinander kombiniert (Phasenvergleich). Bei zwei Photodioden resultiert so innerhalb eines Hell-Dunkel-Feldes eine Sinusschwingung, deren Phase als Feinmessung zur Grobmessung addiert wird. [KAHMEN 2006] beschreibt mehrere gängige Interpolationsverfahren und unterscheidet sie hinsichtlich ihrer Genauigkeit.

Durch hohe Abtastraten der Distanzmessung kann für eine hohe räumliche Auflösung die Beobachtungsrichtung schnell variiert werden. Daher werden zur Winkelmessung vielfach Methoden eingesetzt, die auf einer Zeitmessung basieren. Wird angenommen, dass die Ablenkeinheit innerhalb eines Umlaufs mit konstanter Geschwindigkeit ω rotiert, ergibt sich die Richtung θ proportional zur Zeit T_θ :

$$\theta = T_\theta \cdot \omega. \quad (2.8)$$

Wird die Rotationsgeschwindigkeit ω pro Umlauf einmalig erfasst, stellt sie damit einen Mittelwert dar. Bei angenommener konstanter Rotationsgeschwindigkeit können damit die Distanzmessungen gleichmäßigen Richtungsincrementen zugeordnet werden. Folglich sind für die Zuordnung nur die Durchlaufzeiten einzelner Umläufe zu registrieren.

Mit der Frequenz der Distanzmessung und der Bewegung der Ablenkungseinheit ist die Auflösung geometrisch festgelegt. Die Erfassungsstrategie und die damit verbundene Variation der Beobachtungsrichtung charakterisiert die geometrische Verteilung der Punkte im Raum. Darüber hinaus prägen auch physikalische Eigenschaf-

ten die Diskretisierung der Punkte. So ist ebenfalls der divergierende Strahldurchmesser des Laserlichtes zu beachten, der die Auflösung in Abhängigkeit von der radialen und lateralen Beobachtungsrichtung beeinflusst.

Für den Fall der Aufnahme von einem festen Beobachtungspunkt aus sind mehrere Ansätze vorhanden, um die Auflösung eines Scans zu quantifizieren. In Anlehnung an den sog. Siemensstern entwickeln [BÖHLER et al. 2003] einen Stern, bei dem die regelmäßigen Kreissektoren abwechselnd nicht in schwarz und weiß dargestellt, sondern auf zwei Ebenen parallel räumlich getrennt angeordnet sind. Die Trennbarkeit zwischen den zwei Ebenen in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt des Sterns wird dabei als Maß für die Auflösung angesehen. Allgemein betrachtet beschreibt die Auflösung die Fähigkeit, diskretisierte Größen voneinander trennen zu können. Beim Siemensstern wird der radiometrische Kontrast als Kriterium verwendet, um die Trennbarkeit diskretisierter Größen (Pixel) festzulegen. Beim Stern nach [BÖHLER et al. 2003] wird der Kontrast durch die räumliche Tiefe zweier Ebenen, die radiometrische Messung also durch die Distanzmessung substituiert. Der frontale Scan des Sterns wird - analog zum Bild - durch die Auflösung der Winkelmessung geprägt, während die Distanzmessung über einen Schwellwert (z. B. mithilfe eines statistischen Tests [KERN und HUXHAGEN 2008]) schlicht indiziert, welche Auflösung für die Winkelmessung angenommen werden soll. Die Diskretisierung der Distanz, also eine kleinstmögliche Trennbarkeit in radialer Richtung wird bei diesem Verfahren nicht betrachtet, und die so quantifizierten Größen geben keine (richtungsunabhängige) räumliche Auflösung wieder.

Alternativ wird bei bildgebenden Sensoren die Auflösung häufig über eine *Modulations-Transfer-Funktion (MTF)* quantifiziert [BOREMAN 2001], die angibt, wie Kontraste im Bild dargestellt werden. Für Laserscanner definieren [LICHTI und JAMTSO 2006] eine mittlere Modulations-Transfer-Funktion (*average modulation transfer function, AMTF*), in der Einflüsse aus Abstrakte, Strahldivergenz und Diskretisierung zusammengefasst sind. Ein Schwellwert der AMTF definiert ein effektives aktuelles Gesichtsfeld (*effective instantaneous field of view, EIFOV*). Die numerischen Untersuchungen zeigen, dass vor allem bei kleinen Winkelinkrementen der EIFOV über den Abständen benachbarter Strahlmittelpunkte liegt.

2.3. Räumliche und semantische Aspekte

2.3.1. Mobile-Mapping und Raum-Zeit-Bezug

Die Nutzung des Laserlichtes für die Distanzmessung setzt voraus, dass das Ausbreitungsmedium vom Licht (teil-)durchlässig ist und Objekte innerhalb der maximalen Reichweite liegen. Sollen Objekte außerhalb der Sicht- und Reichweite erfasst werden, so sind die Beobachtungsrichtung und der Beobachtungsort kontrolliert zu variieren, um einzelne Messungen in ein gemeinsames räumliches System überführen zu können. Gemeinsames charakteristisches Merkmal für Systeme, die mit dem verbreiteten Begriff Mobile-Mapping bezeichnet werden, ist, dass die erfassende Einheit beweglich, d. h. auf einer beweglichen Plattform montiert ist. Das Ziel ist die Aufnahme einer den Messbereich eines Laserscanners deutlich übersteigenden Umgebung mit hohem Automatisierungsgrad. Beim terrestrischen Mobile-Mapping kommen als Aufnahmesensoren überwiegend (Video-) Kameras und Laserscanner zum Einsatz. Um die aktuelle Position und Aufnahme-richtung im Raum zu bestimmen, werden optional zusätzliche orientierende Sensoren (Navigationssensoren) wie z. B. das GNSS, inertielle Messeinheiten (*Inertial Measurement Unit, IMU*), *MEMS (Micro Electronic Mechanical System)*, Inklinometer, Odometer etc. genutzt. Bezogen auf Mobile-Mapping-Systeme geben [SCHWARZ und EL-SHEIMY 2007] einen Überblick über die Genauigkeitsklassen exemplarisch verfügbarer Navigationssensoren.

Obwohl bei Mobile-Mapping-Systemen die Aufnahmesensoren beweglich sind, wird diese Bewegung nicht zwangsläufig modelliert. Derzeit werden sowohl statische als auch kinematische Systeme mit dem Begriff Mobile-Mapping bezeichnet. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Systeme nicht nach ihrer tatsächlichen Beweglichkeit charakterisiert, sondern ob diese Bewegung im Raum modelliert wird und ob dabei ein Bezug zu einem äußeren räumlichen System hergestellt wird.

Prägend ist also die Zuordnung einzelner gescannter Punkte in den Dimensionen Raum und Zeit. Grundlage ist das polare Messverfahren eines Laserscanners, wonach ein Punkt im euklidischen Raum durch den Vektor

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} d \cdot \sin \alpha \sin \theta \\ d \cdot \sin \alpha \cos \theta \\ d \cdot \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

aus den polaren Messgrößen der Distanz d und den vertikalen und horizontalen Winkeln θ und α dargestellt werden kann. Um die Beobachtungsrichtung eines Laserscanners auf einer Plattform zu variieren, sind im kinematischen Fall für den flugzeuggestützten Einsatz eine Reihe von Varianten vorhanden [PETRIE und TOTH 2009]. Ziel der Verfahren ist es, in und quer zur Bewegungsrichtung der Plattform möglichst gleichmäßig verteilte Punkte zu erhalten. So wird bei oszillierenden Spiegeln permanent die Auslenkung umgekehrt. Daraus resultiert je nach Geschwindigkeitsänderung des Spiegels eine Z- bzw. Sinus-Form. Polygonspiegel hingegen rotieren mit konstanter Geschwindigkeit und ohne Umkehrung, wodurch ein paralleles Raster von Punkten entsteht. Wird das Laserlicht über einen Spiegel abgelenkt, dessen Oberfläche zur Rotationsachse geneigt ist, so bilden die Punkte ein ellipsenförmiges Muster. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren treten hierbei auch Redundanzen auf. Eine gleichmäßige Verteilung der Punkte quer zur Flugrichtung kann auch erreicht werden, wenn die Lichtimpulse über verschiedene Lichtwege abgelenkt werden (sog. *fiber-optic*). Die Anzahl der Punkte pro Scanzeile ist durch die Kanäle der Optik vorgegeben. Weil dadurch die Punktdichte quer zur Flugrichtung erheblich geringer ist als in Flugrichtung, wird eine zusätzliche Ablenkeinheit integriert. Dadurch soll auch quer zur Flugrichtung eine dichtere Verteilung der Punkte erreicht werden. Außerdem kann durch die Ablenkung ein Gebiet in einem größeren Öffnungswinkel beobachtet werden. Pro Lichtkanal entsteht somit ein sinusähnlicher Verlauf der Punkte und alle Kanäle zusammen zeigen ein parallel schlängelndes Muster [PETRIE und TOTH 2009].

Die Forderung nach einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Punkte im Raum gilt ebenfalls für den terrestrischen Einsatz. Unterschiede zwischen ALS und TLS ergeben sich vor allem daraus, wie sich der Messbereich von der Beobachtungsposition aus darstellt. Beim ALS erstreckt sich der Messbereich flächenhaft, so dass bei der Aufnahme nur ein eingeschränkter radialer Abschnitt erfasst werden muss. Beim TLS hingegen liegt der Messbereich komplett räumlich um die Beobachtungsposition, d. h. die Umgebung ist radial vollständig abzutasten. Da eine Reihe von Scannern nur innerhalb eines begrenzten radialen Öffnungswinkels scannen, werden für eine vollständige kinematische Aufnahme teilweise mehrere Scanner eingesetzt. Beispiele hierfür sind die kommerziellen Systeme StreetMapper [KREMER und HUNTER 2007, BARBER et al. 2008] und LYNX [ZAMPA und CONFORTI 2009] oder das System VLMS (Vehicle Borne Laser Mapping System) der Universität Tokio [ZHAO und SHIBASAKI 2005]. Varianten für oszillierende und rotierende Ablenkeinheiten im kinematischen Fall zeigt die Abbildung 2.2.

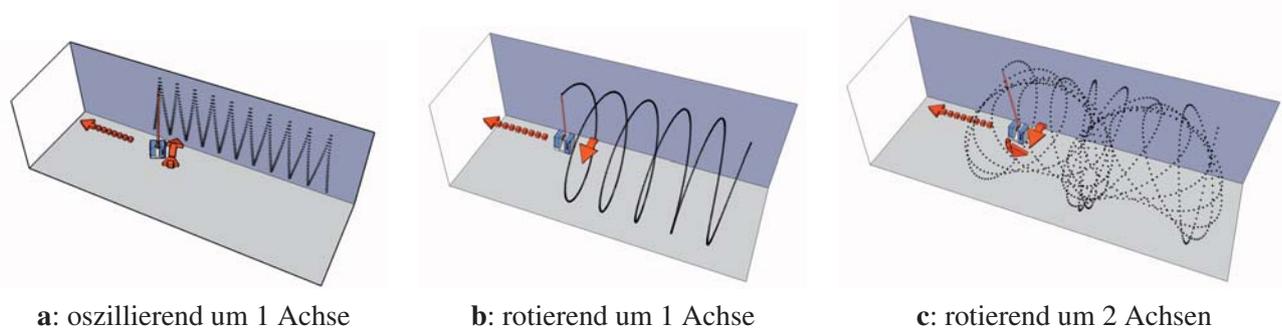


Abbildung 2.2: Ablenkungsvariationen für bewegte Plattformen

So ergibt sich für einen fest montierten Scanner mit konstant oszillierendem Spiegel eine Z-Form - analog zum flugzeuggestützten Einsatz (Abb. 2.2, a). Rotiert ein Spiegel hingegen um eine feste Rotationsachse (sog. *Pro-*

flscanner) und bewegt sich die Plattform in Richtung dieser Rotationsachse, so entsteht im Raum die Form einer Helix (Abb. 2.2, b). Die Dichte der Punktverteilung in Fahrtrichtung wird dabei offensichtlich von der Fahrtgeschwindigkeit skaliert. Rotiert der Scanner während der Fahrt gleichzeitig um eine vertikale Achse, so wird die Umgebung auch in Fahrtrichtung nicht homogen abgetastet (Abb. 2.2, c). Diese Aufnahmekonstellation ermöglicht zwar eine redundante Erfassung, jedoch ist abhängig von der Translationsgeschwindigkeit der Plattform eine minimale horizontale Rotationsgeschwindigkeit zu gewährleisten, damit die Umgebung vollständig flächendeckend abgetastet wird.

Ziel der Strategien zur Erfassung terrestrischer Laserscans ist es, zeitliche und örtliche Bezüge zwischen einzelnen Punkten angeben zu können. Einen Überblick in den Dimensionen Zeit und Raum gibt die Abbildung 2.3.

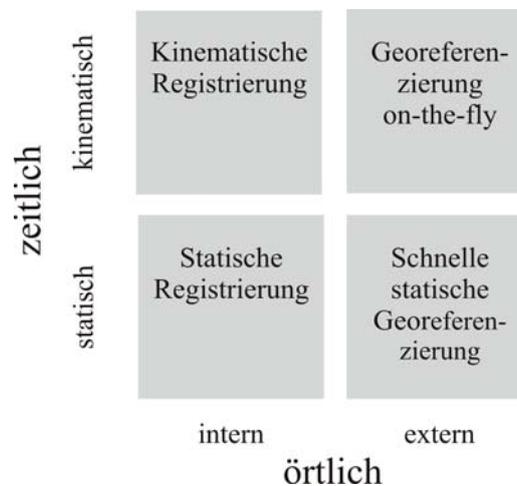


Abbildung 2.3: Strategien zur örtlichen und zeitlichen Zuordnung terrestrischer Laserscans

Beziehen sich danach die Messungen einer Aufnahme auf jeweils ein Zentrum, das als konstant im Raum angesehen wird, so bilden diese Aufnahmen einzelne sog. *statische Scans*. Deren räumliche Beziehung zueinander wird allgemein als *Registrierung* bezeichnet [PFEIFER und BRIESE 2007]. Wie diese räumliche Beziehung zwischen den statischen Scans hergestellt werden kann, wird in Abschnitt 2.3.2 näher beleuchtet. Das Bewegungsverhalten im Raum wird dabei - selbst wenn der Scanner mobil ist - nicht modelliert, es sind keinerlei Zeitbezüge vorhanden. Für den Fall, dass eine Bewegung beim Scannen modelliert wird, kann dieser Ansatz konsequenterweise als *kinematische Registrierung* bezeichnet werden. Ansätze aus der Robotik, die diese Aufgabe behandeln, sind in Abschnitt 2.3.2 enthalten.

Das Ziel der Mobile-Mapping-Systeme ist eine schnelle Erfassung der Umgebung, die im Außenbereich zumeist einen externen erdbezogenen Raumbezug erfordert. Dieser Bezug kann wiederum sowohl für einzelne statische Scans (*schnelle statische Georeferenzierung*) als auch für den kinematischen Aufnahme-fall mit der *Georeferenzierung on-the-fly* hergestellt werden. In Abschnitt 2.3.3 werden dazu Vorgehensweisen und aktuelle Implementierungen präsentiert. Eine konzeptionelle Einführung in das Mobile-Mapping, auf der auch die in dieser Arbeit verwendeten Einteilungen und Bezeichnungen basieren, findet sich in [KUTTERER 2010]. Dort werden zudem eine Reihe kommerzieller und nicht-kommerzieller Systeme gezeigt und in Aufbau und Spezifikation miteinander verglichen.

2.3.2. Registrierung

Statisches Scannen und Registrierung

Kennzeichnend für statische Scans ist die Annahme, dass das Zentrum der Aufnahme ruht. Um die polar erfassten Punkte mehrerer benachbarter statischer Scans miteinander verknüpfen zu können, ist die Relation der Punkte x in benachbarten Systemen i und $i + 1$ gemäß einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation aufzustellen

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{R}_i^{i+1} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{t}_i^{i+1}, \quad (2.10)$$

mit \mathbf{R} der Rotationsmatrix und \mathbf{t} der Translation. Räumliche Lagen von Koordinatensystemen werden neben Rotationsmatrizen, die über Eulerwinkel drei Drehungen beschreiben, auch mittels Quaternionen angegeben. Ein Quaternion kann durch ein 4-Tupel (Quadrupel) angegeben werden, zusammengesetzt aus einer realen und drei imaginären Einheiten i , j und k . Für diese gelten in Analogie zu den komplexen Zahlen

$$i \cdot i = j \cdot j = k \cdot k = -1 \quad (2.11)$$

sowie die Produkte

$$i \cdot j = -j \cdot i = k; \quad j \cdot k = -k \cdot j = i; \quad k \cdot i = -i \cdot k = j, \quad (2.12)$$

die demnach nicht kommutativ sind. Ein Quaternion q lässt mit den reellen Zahlen a , b , c und d notieren zu

$$q = a + ib + jc + kd. \quad (2.13)$$

Im Gegensatz zu den Eulerwinkeln beschreibt eine Quaternion nicht Drehungen um drei Koordinatenachsen, sondern eine einzige um den normierten Orientierungsvektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ mit dem Drehwinkel θ . Der Zusammenhang zum normierten Quaternion $\|q\| = 1$ lautet

$$q = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ v_x \cdot \sin(\theta/2) \\ v_y \cdot \sin(\theta/2) \\ v_z \cdot \sin(\theta/2) \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Die Elemente eines Quaternionen können direkt aus den Eulerwinkeln berechnet werden. Umgekehrt lässt sich aus einem Quaternion auch eine Rotationsmatrix aufstellen, durch die sich dann die einzelnen Eulerwinkel angeben lassen. Drehungen im Raum können nicht in allen Fällen eindeutig von Eulerwinkeln beschrieben werden. Aus der Sichtweise der sequentiellen Drehung nach Eulerwinkeln kann dies auftreten, wenn durch Drehungen Achsen in andere Koordinatenebenen fallen. So wirkt sich nach Drehung eines Nickwinkels um $\pm 90^\circ$ der Rollwinkel direkt auch auf das Azimut aus. In diesem Fall können Rollwinkel und Azimut nicht eindeutig voneinander beschrieben werden. In der Mechanik tritt diese Eigenschaft auch bei Kardanwellen auf, die in diesen Konfigurationen blockieren (*gimbal-lock*).

Eulerwinkel ermöglichen dagegen eine verbesserte Anschaulichkeit. Da zudem im hier verwendeten System die Eulerwinkel separat geschätzt und ausschließlich zur Transformation von lokalen in externe Systeme eingesetzt werden, werden sie in der vorliegenden Arbeit bevorzugt.

Beim statischen Scannen werden die Parameter der Translation und Rotation pro Standpunkt als zeitinvariant betrachtet. Pro Standpunkt müssen die Transformationsparameter zwar nur einmal ermittelt werden, andererseits sind für die Aufnahme verdeckter und über die Reichweite des Scanners entfernt liegenden Bereiche wiederum mehrere statische Scans notwendig.

In Anlehnung an die Begrifflichkeit der Photogrammetrie wird neben der Bezeichnung Registrierung der Begriff *relative Orientierung* überwiegend synonym verwendet, wobei hier - im Gegensatz zur photogrammetri-

schen Bezeichnung - die räumliche Transformation maßstäblich angegeben wird. [BRENNER et al. 2008] betonen ferner, dass mit dem Ausdruck Registrierung die Bedeutung der Punkte für die Zuordnung herausgestellt wird.

Um die Parameter der Registrierung zu ermitteln, sind korrespondierende Elemente zwischen Scans zu wählen. Diese Elemente können entweder signalisierte homologe Punkte in den Scans sein oder genähert approximierete Punkte. Bei signalisierten Punkten wird (manuell) die Position gemessen und beispielsweise über eine Kreuz-Korrelation des Intensitätsbildes [ABMAYR et al. 2008] verbessert. [AL-MANASIR und FRASER 2006] schlägt ein Verfahren vor, bei dem das Bild einer montierten Kamera für die Suche nach signalisierten Punkten eingesetzt wird.

Homologe Punkte sind für die Registrierung jedoch nicht zwingend. Bereits [BESL und MCKAY 1992] und [RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001] setzen dazu das ICP-Verfahren (*iterative closest point*) ein. Wie bei signalisierten Punkten ist auch hier die Zielfunktion

$$E(\mathbf{R}_i^{i+1}, \mathbf{t}_i^{i+1}) = \frac{1}{N} \sum_1^N \left\| \mathbf{x}_{i+1} - \left(\mathbf{R}_i^{i+1} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{t}_i^{i+1} \right) \right\|^2 \rightarrow \min \quad (2.15)$$

für alle N korrespondierenden Punkte \mathbf{x}_i und \mathbf{x}_{i+1} zu minimieren.

Sei M die Menge aller Punkte eines bestehenden Modells aus bereits registrierten Scans und D eine neu gescannte Menge von Punkten eines statischen Scans. Wie mittels ICP die Transformationsparameter von der neu gescannten Menge zur bestehenden Menge iterativ ermittelt werden können, wird in Algorithmus 1 kurz erläutert.

Algorithmus 1 ICP Algorithmus [BESL und MCKAY 1992, NÜCHTER 2009]

Require: $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i+1}$

```

1: for  $l = 0$  to  $maxIterationen$  do
2:   for all  $d_j \in D$  do
3:     Finde  $m_k \in M$ , der  $d_j$  am nächsten ist
4:   end for
5:   Berechne die Transformationsparameter  $\mathbf{R}_l^{l+1}$  und  $\mathbf{t}_l^{l+1}$  gemäß Gl. 2.15 mit  $x_{l+1} = m_k$  und  $x_l = d_j$ 
6:   Transformiere alle Punkte aus  $D$  gemäß Gl. 2.10
7:   if  $\left\| E(\mathbf{R}_{l-1}^l, \mathbf{t}_{l-1}^l) - E(\mathbf{R}_l^{l+1}, \mathbf{t}_l^{l+1}) \right\| < \epsilon$  then beende
8:   end if
9: end for
10:  $\mathbf{R}_i^{i+1} = \mathbf{R}_l^{l+1}$ 
11:  $\mathbf{t}_i^{i+1} = \mathbf{t}_l^{l+1}$ 
return  $\mathbf{R}_i^{i+1}, \mathbf{t}_i^{i+1}$ 

```

Die Zugehörigkeit aller Punktpaare $[m_k, d_j]$ (Zeile 3) wird hier jedoch nicht eindeutig festgelegt. Stattdessen wird die minimale Distanz als Kriterium für eine Zugehörigkeit eingeführt. Um den Aufwand der rechenzeitintensiven Suche nach korrespondierenden Punkten zu verringern, werden in mehreren Varianten des ICP-Verfahrens Ähnlichkeiten unterschiedlich definiert. So kann z. B. mithilfe von Intensitätswerten der Suchraum erheblich eingeschränkt werden. Einen Übersicht über effizienzsteigernde Varianten geben [RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001, GRUEN und AKCA 2005]. Um die Menge korrespondierender Elemente N zu verringern, können anstatt von Punkten auch Oberflächenelemente miteinander verglichen werden [GRUEN und AKCA 2005], die vorab in einzelnen Scans gesucht werden. So werden entweder Ebenen in den Scans extrahiert oder auch Flächen höherer Ordnung wie Zylinder, Kugeln und Tori [RABBANI et al. 2007].

Die Flächen zweiter Ordnung lassen sich allgemein durch Quadriken mit der Formmatrix Q , dem Vektor q und einem Skalar q_c beschreiben. Damit gilt für alle Ortsvektoren x der auf ihr befindlichen Punkte (Inzidenz)

$$xQx^T + qx^T + q_c = 0. \quad (2.16)$$

Eine Übersicht zur Klassifizierung der Formtypen aus der Formmatrix mittels Determinanten vermitteln [KUTTERER und SCHÖN 1999].

Insgesamt ist eine statistische Bewertung der Transformationsparameter aus dem ICP-Verfahrens nur begrenzt möglich. Das gilt vor allem dann, wenn Unsicherheiten der Korrespondenzen - aus Punkten wie aus Flächen - nicht in die Ausgleichung der Parameter einfließen.

Das Verfahren zur Registrierung statischer Scans wird - vor allem in der Robotik - auch für mobile Plattformen eingesetzt. Für diesen bewegten Fall werden trotz veränderlicher Aufnahmezentren während der Fahrt über kurze Zeiträume quasi-statische Scans berechnet. Anschließend können analog zu den statischen Scans die Transformationsparameter z. B. mittels ICP-Verfahren geschätzt werden [BORRMANN et al. 2008]. Näherungswerte für den ICP-Algorithmus liefern Messungen eines Odometers oder heuristische Ansätze [NÜCHTER und HERTZBERG 2008]. Die Folge der einzelnen, nacheinander transformierten Scans ergibt eine Trajektorie der Plattform - ohne kinematischer Modellierung. Das Ergebnis ist eine zusammengehörige (registrierte) Punktwolke und die Trajektorie im lokalen System. Daher wird diese Vorgehensweise auch als *SLAM* (*Simultaneous Localisation And Mapping*) bezeichnet. Um die quasi-statischen Standpunkte miteinander verknüpfen zu können, ist eine Teilredundanz in den benachbarten Scanszenen Voraussetzung. Aufgrund der sich kumulierenden Fehleranteile wird außerdem eine Redundanz zwischen nicht-benachbarten Scanszenen angestrebt wie das Schließen einer Schleife. Für eine Menge von Schleifen berechnet [NÜCHTER 2009] die Transformationsparameter in einem iterativen Ansatz, ohne beim Schließen einer neuen Schleife sämtliche vergangene Scans neu ausgleichen zu müssen (sog. *GraphSLAM*).

Kinematische Registrierung

Im kinematischen Ansatz ist das Beobachtungszentrum *während* des Scans variabel - im Gegensatz zum statischen Fall, bei dem das Beobachtungszentrum *zwischen* einzelnen Scans variabel ist. Wird darüber hinaus auch ein Bewegungsverhalten z. B. mithilfe kinematischer Filter modelliert, kann diese Registrierung unter Berücksichtigung der Zeit auch als kinematische Registrierung angesehen werden.

Die geometrische Zuordnung zwischen benachbarten Scans lässt sich lokal etwa durch die Messung von Odometern mithilfe eines Kalman-Filters (z. B. *Extended Kalman Filter*; *EKF*) integriert auswerten. [MOUTARLIER und CHATILA 1990] wenden diese Filterung erstmalig auf mobilen Robotern mit Laserscannern an. In den Beobachtungsvektor können anstatt korrespondierender Punkte alternativ auch extrahierte Merkmale wie Ebenen aufgenommen werden [WEINGARTEN und SIEGWART 2005]. Zu jedem Zeitpunkt sind die Positionen der k Merkmale und die aktuelle Position und Richtung des Roboters zu schätzen. Mit der Anzahl korrespondierender Merkmale (*Landmarken*) k steigt quadratisch die Anzahl der Elemente der Kovarianzmatrix Σ (im 2D-Fall $\dim \Sigma = (2k + 3) \times (2k + 3)$) des Zustandsvektors und damit der rechen-technische Aufwand für die Filterung. Diese Eigenschaft wird als wesentlicher Nachteil des EKF angesehen [MONTEMERLO und THRUN 2005].

Werden neue Beobachtungen an einer neuen Roboterposition gemacht, werden sie mit bestehenden Merkmalen verglichen. Bei einer festgelegten Ähnlichkeit wird eine Korrespondenz angenommen, ansonsten bilden die Beobachtungen ein neues Merkmal. Wird diese Ähnlichkeit mit einer nicht realistischen Unsicherheit gewichtet, führen fehlerhafte Korrespondenzen zu abweichenden Lösungen der Orientierung, die auch nachträglich nicht korrigiert werden können. Eine Korrespondenz zwischen beobachteten Landmarken wird also nur einfach und separat für jede Position bewertet (*single-hypothesis data association*).

Eine Alternative bietet der *FastSLAM* Algorithmus [MONTEMERLO et al. 2002], der für den 2D-Fall EKF in ein Partikel Filter integriert. Seien dazu s^t die Menge aller Posen eines Roboters (Position und Orientierung) bis zum Zeitpunkt t , u^t die Menge der Bewegungsvektoren bis t (erfasst mithilfe des Steuerungsbefehls eines externen Sensors wie z. B. Odometers), z^t die Menge der Beobachtungen zu einer Landmarke (Entfernung und Winkel) und n^t die Korrespondenzen zwischen Beobachtungen der Landmarken. Alle Landmarken θ_j mit $j = 1, \dots, k$ seien zudem in θ zusammengefasst. Dann gibt FastSLAM eine Lösung für die a-posteriori Wahrscheinlichkeit p für

$$p(s^t, \theta | z^t, u^t, n^t). \quad (2.17)$$

Dabei werden also nicht nur Posen zu einem Zeitpunkt, sondern die Trajektorie in Form der Menge der Posen s^t betrachtet. Entsprechend des Produktgesetzes der Wahrscheinlichkeiten gilt

$$p(s^t, \theta | z^t, u^t, n^t) = p(s^t | z^t, u^t, n^t) p(\theta | s^t, z^t, u^t, n^t). \quad (2.18)$$

Für die einzelnen (unabhängigen) Landmarken θ_j kann deren Schätzung zudem faktorisiert werden (Herleitung s. [MONTEMERLO und THRUN 2005]), so dass gilt:

$$p(s^t, \theta | z^t, u^t, n^t) = \underbrace{p(s^t | z^t, u^t, n^t)}_{\text{Trajektorie}} \prod_{j=1}^k \underbrace{p(\theta_j | s^t, z^t, u^t, n^t)}_{\text{Schätzung Landmarken}}. \quad (2.19)$$

Im FastSLAM-Algorithmus werden die Faktoren demnach getrennt behandelt. Die Trajektorie wird über Partikelfilter beschrieben, während die Positionen der Landmarken jeweils mittels EKF geschätzt werden.

- (1) Ziehe für jedes Partikel eine neue Position entsprechend der Steuerung eines externen Sensors
- (2) Filtere die Positionen der beobachteten Landmarken mittels EKF
- (3) Berechne eine Gewichtung für jedes Partikel
- (4) Ziehe ein neue Menge von Partikeln entsprechend der Gewichtung (SIR)

Tabelle 2.2.: Ablauf FastSLAM [MONTEMERLO und THRUN 2005]

Die Tabelle 2.2 zeigt den zugehörigen Verfahrensablauf. Es werden dazu M Partikel eingesetzt, die diskrete Lösungen der Position eines Fahrzeugs und deren Verteilungen repräsentieren. In vier Schritten werden die Positionen der Partikel und die gesamte Abbildung einer Karte (Menge der Landmarken) ausgewertet. Zunächst wird mithilfe des Steuerungsbefehls u^t für jedes Partikel eine neue Position prädiert (1). Diese wird im zweiten Schritt verwendet, um die Positionen aller vormals bekannten Landmarken mit einer neuen Beobachtung zu vergleichen. Die Innovation, also die Differenz aus prädiertem und ursprünglicher Beobachtung wird herangezogen, um die Ähnlichkeit zwischen einer neuen Beobachtung und den bestehenden Landmarken abzuschätzen. Die maximale Ähnlichkeit wird als Wahrscheinlichkeit interpretiert (*maximum likelihood*) und entscheidet, ob die neue Beobachtung eine neue Landmarke darstellt. Wenn nicht, wird die Position einer bestehenden Landmarke mittels EKF aufdatiert (2). Die Prozedur wird für alle Partikel durchgeführt. Die maximale Ähnlichkeit pro Partikel mit den bestehenden Landmarken wird als Gewichtung angesehen (3) und verwendet, um eine neue Menge aus M Partikeln zu generieren (4) (*sample importance resampling, SIR*). FastSLAM gewichtet also auch die Korrespondenz zwischen Beobachtungen und bestehenden Landmarken (*multi-hypothesis data association*). Für eine ausführliche Beschreibung und eine Diskussion der Varianten siehe [MONTEMERLO und THRUN 2005]. Die stochastischen Informationen zur Position eines Roboters sind

in diesem Ansatz in den Positionen der Partikel gespeichert. Deren Generierung (*resampling*) wird durch die Landmarken und deren Kovarianzen gesteuert.

2.3.3. Georeferenzierung

Mit der Registrierung werden einzelne Scans in ein gemeinsames System überführt. Der Bezug zu einem externen (erdfesten) System kann über die (Geo-)Referenzierung hergestellt werden. Funktional betrachtet sind für den dreidimensionalen Übergang von Punkten \mathbf{x}_s eines lokalen Systems in ein (geo-) referenziertes System \mathbf{x}_e die Parameter der Translation (X, Y, Z) und der Rotation aus Nick-, Roll und Gierwinkel (p, r, y) erforderlich

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{R}_s^e(p, r, y) \cdot \mathbf{x}_s + \mathbf{t}_s^e(X, Y, Z). \quad (2.20)$$

Diese sind sowohl im statischen als auch im kinematischen Fall zu ermitteln. Um einzelne oder mehrere statische Scans zu referenzieren, können signalisierte Passpunkte eingesetzt werden, die im Referenzsystem koordiniert sind. Die zugehörigen Transformationsparameter lassen sich dann über eine Helmert-Transformation (z. B. [NIEMEIER 2001]) bzw. Bündelblockausgleichung (z. B. [MCGLONE 2004]) schätzen. Im Folgenden werden nur die automatisierten Varianten näher betrachtet.

Schnelle statische Georeferenzierung

Werden Scans von einem festen Standpunkt automatisch bezüglich eines externen Systems referenziert, so wird diese Strategie auch *schnelle statische (Geo-) Referenzierung* genannt. Dabei werden zusätzliche Sensoren eingesetzt, die die Elemente zur Geo-Referenzierung direkt liefern.

Standardmäßig kann der Scanstandpunkt mithilfe einer zentrisch montierten GNSS-Antenne ermittelt werden. Die Azimutrichtung ist dann bei horizontaler Aufstellung über mindestens einen gescannten Anschlusspunkt herzustellen. Um die Orientierung im erdfesten System auch während des Scannens bestimmen zu können, installieren [PAFFENHOLZ et al. 2010] GNSS-Antennen exzentrisch. Wird zudem eine konstante Rotation um die Stehachse angenommen, kann dies als Bedingung für eine redundante Ermittlung der Azimutrichtung eingeführt werden. Auf Basis dieser Bedingungen lassen sich alle Parameter - der Georeferenzierung (Gl. 2.20) und der Bewegung des Scanners im Raum - adaptiv in einem Kalman-Filter schätzen. Mit dem Verfahren ist es möglich, einzelne Standpunkte autark und vollautomatisch zu georeferenzieren.

Eine Kombination aus Registrierung statischer Scans und Georeferenzierung ist im System CityGRID implementiert [HARING 2007]. Das System ist auf einem Fahrzeug montiert und erfasst eine Umgebung schrittweise durch einzelne statische Scans (*Stop-and-Go-Modus*). Diese werden in einem modifizierten ICP-Ansatz zusammgeführt und referenziert. Die Elemente der Georeferenzierung liefert das GNSS (X, Y, Z) sowie ein scannerinternes Inclinometer (p, r). Die Kombination erlaubt es, zusammenhängende Blöcke zu referenzieren, auch wenn für einzelne Standpunkte keine GNSS-Lösungen verfügbar sind.

Georeferenzierung on-the-fly

Einen externen Ortsbezug für eine bewegte Plattform liefert die *Georeferenzierung on-the-fly*. Diese Systeme werden typischerweise unter dem Begriff Mobile-Mapping geführt, wobei mittlerweile die Bezeichnung wie in Abschnitt 2.3.1 bereits erläutert auch für die kinematische Registrierung und für die schnelle statische Georeferenzierung verbreitet ist. Angemerkt sei, dass die Bezeichnung on-the fly nicht auf eine Echtzeitberechnung der Parameter der Georeferenzierung hindeutet, sondern den Modus der Aufnahme verdeutlicht.

Bei einer bewegten Plattform sind die Punkte im lokalen System des Scanners \mathbf{x}_S zeitabhängig in ein übergeordnetes (erd-) festes System \mathbf{x}_E zu transformieren. Um auch bei einem komplexen Bewegungsverhalten die Elemente der Referenzierung direkt ermitteln zu können, werden je nach Anforderung und Umgebung

zusätzliche referenzierende Sensoren wie inertielle Messeinheiten, GNSS-Sensoren, Inclinometer und Odometer eingesetzt. Vielfach wird eine inertielle Messeinheit mit GNSS-Sensoren kombiniert, weil sich deren komplementäre Eigenschaften hinsichtlich zeitlicher Auflösung und Stabilität sehr gut ergänzen. Die Transformationsparameter der Referenzierung und die lokal gescannten Punkte werden meist separat erfasst, wodurch keine Annahmen zur scannenden Objektstruktur vorausgesetzt werden. Als inertielle Messeinheiten kommen Ring-Laser-Kreisel oder faseroptische Kreisel zum Einsatz, deren Einsatz mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Eine Klassifizierung inertialer Einheiten für die Georeferenzierung ist in [SCHWARZ und EL-SHEIMY 2007] zu finden.

Mobile-Mapping-Systeme mit einer Georeferenzierung on-the-fly können nach der Art ihrer Plattform unterschieden werden. Die überwiegende Anzahl wird von straßengebundenen Fahrzeugen getragen. [BARBER et al. 2008] geben eine Übersicht über Systeme kommerzieller und nicht-kommerzieller Art.

Nachfolgend werden exemplarisch die Eigenschaften der Systeme näher betrachtet, in denen ein Laserscanner integriert ist und die daher dem Aufbau des in dieser Arbeit gezeigten Systems ähnlich sind (Abb. 2.4).



Abbildung 2.4: Exemplarische Mobile-Mapping-Systeme mit Georeferenzierung

Das prototypische System LARA-3D [GOULETTE et al. 2006], das an der Technischen Hochschule in Paris (Mines ParisTech) entwickelt wurde, verwendet für die Georeferenzierung die Kombination aus INS/GPS und als Aufnahmesensor einen Profils Scanner mit einer Rotationsrate von 10 rot/s. [GOULETTE et al. 2006] spezifizieren das System bei der Verfügbarkeit von GPS mit einer absoluten Positionsgenauigkeit der referenzierenden Einheit mit < 4 cm. Für die scannende Einheit wird eine Standardabweichung von ca. 5 cm in Scanrichtung angegeben, wobei der Einfluss der Unsicherheiten der Rotationsparameter p , r , y auf die referenzierten Punkte gegenüber der Unsicherheit der scannenden Einheit vernachlässigbar sein soll.

Das an der Universität Tokio entwickelte Mobile-Mapping-System VLMS (Vehicle-borne laser measurement system) verwendet als Aufnahmesensoren drei Profils Scanner sowie sechs CCD-Zeilens Kameras [ZHAO und SHIBASAKI 2005]. Als referenzierende Einheit wird wiederum eine inertielle Messeinheit mit GPS kombiniert. Eine Besonderheit des Systems ist, dass die Parameter der Georeferenzierung mit vorhandenen Geobasisdaten wie DSM (*Digital Surface Model*) zusammen berechnet werden können. [ZHAO und SHIBASAKI 2005] nutzen dazu ein Oberflächenmodell, dass mittels ALS erfasst wurde. Anhand einzelner Passpunkte, die im DSM und in den terrestrischen Profils Scans bzw. Bildern koordiniert werden, kann so auch in den von GPS abgeschatteten Innenstadtbereichen die Positionierung im erdfesten System gestützt werden.

Im kommerziellen System StreetMapper sind insgesamt drei terrestrische Laserscanner vereint, die Distanzen auf Basis der Impulszeitmessung ermitteln. Ein rotierender Polyspiegel erfasst einzelne Profile - ähnlich einem oszillierenden Spiegel (s. Abb. 2.2, a) - jedoch mit parallel verlaufenden Profilen. Aus Mehrfachmessungen von Straßenoberflächen schätzen [BARBER et al. 2008] für ihr System empirisch eine Standardabweichung ab, die in der Höhenkomponente im Bereich von ca. 3-5 cm liegt. Zudem analysieren sie, welchen Einfluss einzelne Größen wie die Unsicherheit der Distanzmessung, Winkelmessung, Kalibrierparameter, Synchronisation etc. auf die georeferenzierten Punkte haben. Die Abschätzung macht deutlich, dass eine resultierende Unsicherheit von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig ist, die nicht universell angegeben werden können.

Als Weiterentwicklung des an der Universität der Bundeswehr in München entwickelten Systems KiSS (Kinematic Survey System) verwendet das System MoSES (Mobiles Straßen-Erfassungs-System) [GRÄFE 2007] mehrere Videokameras, Stereo-Messkameras sowie terrestrische Laserscanner. Die Georeferenzierung wird hier mittels GPS, IMU, Odometer, Inklinometer und Barometer realisiert. Alle Komponenten sind auf einem Fahrzeug montiert, wodurch auch dieses System nur straßenseitig zugängliche Bereiche abbilden kann. [GRÄFE 2007] gibt als Standardabweichung der referenzierenden Elemente für Lagekoordinaten 2 - 27 cm (bei ständiger bis zweitminütig aussetzender Verfügbarkeit von GPS) und 4 - 35 cm für Höhenkoordinaten an. Wesentliches Element des Systems ist eine Prozessierung, mit der aus den gescannten Profilen standardisierte Oberflächenmodelle von Straßenflächen gewonnen werden können.

Das Mobile-Mapping-System, das an der Leibniz Universität Hannover entstanden ist, nutzt ausschließlich GNSS-Positionen und (optional) Inklinometermessungen für die Georeferenzierung [HESSE 2007]. Als erfassenden Sensor ist hier ein hochauflösender Laserscanner (Typ Z+F Imager 5003) integriert, der ebenfalls im Profilmodus betrieben wird. Da keine inertielle Messeinheit integriert ist, sind die Investitionskosten für die Navigationssensoren verhältnismäßig gering. Die Elemente der Neigung (p , r) werden direkt mit Inklinometern erfasst. Die Azimutrichtung y kann auch mit nur einer GNSS-Antenne ermittelt werden, wenn die Plattform in Bewegung ist. Die Richtung wird dann aus den Geschwindigkeitsvektoren des Zustandvektors der Kalman-Filterung abgeleitet. Mit dem System können typische Genauigkeiten im dm-Bereich erreicht werden. Wesentliches Element ist eine Echtzeiteinheit, die es erlaubt, alle Messzeitpunkte (die des Profilschans, der Inklinometer und des GNSS) zentral zu registrieren. Mit dieser Komponente werden auch die in dieser Arbeit verwendeten Sensoren synchronisiert.

Neben den fahrzeuggetriebenen Systemen werden Plattformen auch schienenengebunden eingesetzt. So integriert [RIEMENSCHNEIDER 2006] einen Laserscanner in ein Gleismesssystem, das über GNSS referenziert wird. Der Laserscanner wird dazu im 2D-Profilmodus betrieben (vgl. Variante in Abb. 2.2, b). Für hohe Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h ist der Gleismesszug LIMEZ III konzipiert [BLUG et al. 2007, WIRTH 2008]. Um auch in Fahrtrichtung im Profilmodus (s. ebenfalls Abb. 2.2, b) eine ausreichend hohe Punktdichte zu erreichen, ist eine entsprechend hohe Profiltrate erforderlich. Dies wird ermöglicht, indem zwei Profils Scanner eingesetzt werden, die jeweils eine doppelte Lasereinheit beinhalten. Die Umlenkeinheit pro Scanner besteht aus einem doppelseitigen Spiegel, wodurch eine Messung in zwei gegensätzliche Richtungen gleichzeitig möglich wird. Insgesamt können somit bis zu 1110 Profile pro Sekunde aus bis zu 3600 Punkten erfasst werden, was bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h einem Profilaabstand von 2.5 cm entspricht.

Synchronisation referenzierender und scannender Sensoren

Werden die Parameter der Referenzierung direkt mithilfe zusätzlicher Sensoren beobachtet, so sind im kinematischen Fall die Messungen sowohl räumlich als auch zeitlich einander zuzuordnen. Ein Zeitbezug kann realisiert werden, indem jeweils in einem internen Zeitsystem beobachtet wird. Werden außerdem Sensoren eingesetzt, deren Messungen einer externen Zeitskala zugeordnet werden (z.B. für eine Kombination mit GNSS-Positionen in GNSS-Zeit), sind Zeitstempel einer Beobachtungszeitskala t_o in Zeitstempel einer externen Zeitskala t_e zu transformieren. Dazu ist der zugehörige Zusammenhang h aufzustellen:

$$t_o = h(t_e) \quad (2.21)$$

Wie diese Transformation zwischen den ruhenden Zeitskalen hergestellt werden kann, verdeutlicht die Abbildung 2.5.

Die Funktion h kann aufgestellt werden, wenn Impulse eines Zeitnormals (z. B.: aus Impulsgenerator, GPS-PPS (*pulse per second*), DCF77 (Deutschland, Langewelle (C), Frankfurt, 77,5 kHz) registriert werden. Die Zeitpunkte der übrigen beobachteten Ereignisse können dann gemäß Gleichung 2.21 auch im externen System angegeben werden. Streng genommen müssten auch Unsicherheiten der Beobachtung der Zeitnormale mit berücksichtigt und bei Anwendung von h fortgepflanzt werden. Die Abbildung macht ferner deutlich, dass

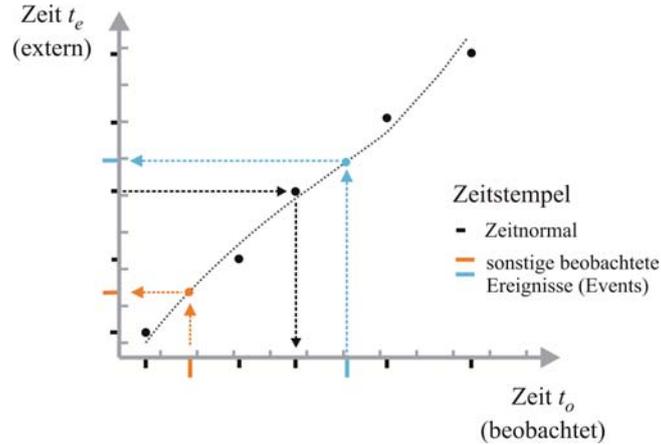


Abbildung 2.5: Transformation zwischen Zeitsystemen

Signalverzögerungen bei der Beobachtung der Zeitstempel unkritisch sind, so weit sie systematisch sind und sowohl für die Zeitnormale als auch für die sonstigen Ereignisse auftreten.

Wird bei der Berechnung von \mathbf{h} davon ausgegangen, dass Abweichungen \mathbf{e} nur seitens der beobachteten Zeitpunkte t_o auftreten können und dass sich ferner \mathbf{h} mit den Parametern β linearisieren lässt mit

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \beta} \Big|_{t_e}, \quad (2.22)$$

so gilt

$$t_o + \mathbf{e} = \mathbf{A} \cdot \beta. \quad (2.23)$$

Für die optimierte Lösung kann die Zielfunktion

$$\mathbf{e}^T \mathbf{e} \rightarrow \min \quad (2.24)$$

definiert werden. Bei der Bestimmung der Parameter β wird angenommen, dass der Zusammenhang \mathbf{h} bekannt ist und durch die Linearisierung ausreichend approximiert wird. Im Fall der Zeittransformation wird für \mathbf{h} vielfach eine lineare Drift vermutet. Abweichungen von dieser Modellvorstellung werden durch die Bedingung aus Gl. 2.24 nicht berücksichtigt. Werden jedoch darüber hinaus auch bezüglich \mathbf{A} Abweichungen \mathbf{E} einbezogen, so führt dies zu

$$t_o + \mathbf{e} = (\mathbf{A} + \mathbf{E})\beta. \quad (2.25)$$

Die Bedingung für eine optimierte Lösung (sog. *total least-squares*) lautet dann

$$\min \|\mathbf{E}; \mathbf{e}\|_F, \quad (2.26)$$

wobei $\|\cdot\|_F$ die Frobenius-Norm bezeichnet. Nähere Beschreibungen und die optimierte Lösung für die Bedingung nach Gl. 2.26 zeigt [AKYILMAZ 2007]. Da die Designmatrix \mathbf{A} an der Stelle t_e approximiert wird, können durch die Einführung von \mathbf{E} letztlich Abweichungen vom Modell \mathbf{h} und damit auch von den externen Zeitpunkten t_e mit einbezogen werden.

Sollen in einem Mobile-Mapping-System einzelne gescannte Punkte bzw. Profile in ein externes räumliches System gemäß Gl. 2.20 überführt werden, so ist bei der Verwendung des GNSS der Zeitpunkt des Scannens eines Punktes in ein externes zeitliches System zu überführen. Die Zeitpunkte t_0 können dabei über ein externes Echtzeitsystem, als Events mit dem GNSS-Receiver oder bei mehreren Sensoren über einen Multiplexer geschaltet durch den Laserscanner selbst erfasst werden. Zur Synchronisation der Zeiten von Scanprofilen terrestrischer

Laserscanner vergleicht [HESSE 2007] mögliche Erfassungsvarianten und diskutiert sie auch in technischer Hinsicht.

Die Einführung eines übergeordneten Zeitsystems, auf das sich die Messungen der beteiligten Sensoren beziehen, ist nicht zwingend. Der funktionale Zusammenhang h kann auch direkt zwischen den beteiligten Sensoren aufgestellt werden. So nutzen [VENNEGEERTS et al. 2008] räumliche Bedingungen aus dem Objektraum, um Messungen eines referenzierenden und scannenden Sensors zu synchronisieren. Die gleichzeitigen Messzeitpunkte von räumlichen Passpunkten werden dabei mithilfe der referenzierenden Einheit und des Scanbildes bestimmt.

2.3.4. Semantische Aspekte

Neben den geometrischen Eigenschaften lassen sich Objekte einer Umgebung mit weiteren Attributen kennzeichnen. Objekte können so auch ein sachliches (semantisches) Merkmal erhalten. Das semantische Merkmal ist sprachlich ausgeprägt, wodurch die Art und ggf. eine zugehörige Menge assoziiert werden kann. Der menschliche Betrachter nutzt eine Vielzahl sensorischer Eindrücke und Erfahrungen, um semantische Informationen zu gewinnen. Geometrische Eigenschaften der Objekte und deren räumliche Beziehung zueinander sind dazu vielfach prägend.

Eine geometrische Eigenschaften ergänzende Beschreibung von Objekten ist charakteristisch für die kartographische Darstellung. Objekte werden dort neben dem räumlichen Bezug durch mindestens ein weiteres Attribut angegeben, das zeitliche oder semantisch ausgeprägt sein kann [HAKE et al. 2002]. In der Kartographie werden semantische Merkmale durch Symbole ausgedrückt, deren abgebildete räumliche Bezüge schließlich eine kartographische Darstellung ergeben.

Der Vorgang einer inhaltlichen Beschreibung von Objekten auf Basis von Bildern ist Gegenstand der Bildanalyse. Bedeutsam dabei ist, wie das Modell festgelegt wird, nach dem die Objekte inhaltlich strukturiert werden. Dieses Modell kann entweder vorab definiert werden oder die Modellierung ist Teil der Analyse [HEIPKE 2008].

[KUHN 2005] überträgt das Konzept der räumlichen Referenzsysteme auf sog. semantische Referenzsysteme. Analog zu den geometrischen Bezugssystemen sollen dadurch Beziehungen innerhalb semantischer Räume und Transformationen zwischen semantischen Modellen ermöglicht werden.

Durch das Scannen einer Umgebung wird diese in Form einer Menge von Einzelpunkten abgebildet. Objekte können daher ausschließlich durch den räumlichen Bezug der Einzelpunkte repräsentiert werden. Zum Zweck einer semantischen Darstellung schlägt [NÜCHTER 2009] einen streng sukzessiven Ansatz vor. Ausgehend von einer zusammenhängenden registrierten Punktwolke, zu deren Erstellung alle sechs Referenzierungsparameter der erfassenden Einheit bekannt sind (sog. *6D SLAM*), wird dabei zunächst die Szene - also der umgebende Raum - zu Punktgruppen einzelner Objekte segmentiert. So werden in Innenräumen z. B. Objekte von Wand-, Boden- und Deckenflächen getrennt. [RUSU et al. 2009] zeigen, wie von gescannten Innenräumen Tischflächen segmentiert werden können, um anschließend darauf stehende Objekte zu trennen. Sind die Untermengen definiert, folgt anschließend die Modellierung der Objekte. Bei Gegenständen werden überwiegend die Parameter von Primitiven wie Ebenen, Zylinder, Kugeln usw. geschätzt (z. B. [SCHNABEL et al. 2007]) oder in den Untermengen werden weitere Objekte wie Personen modelliert.

Die Richtung der Auswertung, um Karten mit semantischem Informationsgehalt zu erstellen, ist in diesem Ansatz vorgegeben. So werden zunächst die 3D-Punktwolken registriert, die dann die Basis für die weitere Analyse bilden. Diese Richtung ist jedoch nicht zwingend. Eine Integration semantischer Eigenschaften von Objekten erscheint gerade für den Fall der kinematischen Erfassung hilfreich, da dort zum Bewegungsverhalten einer Plattform im Raum prinzipiell keine Annahmen getroffen werden. Ist jedoch ein Objekt inhaltlich beschrieben, lassen sich dadurch objektbezogene geometrische und topologische Annahmen formulieren. Am Beispiel einer Wandfläche können so Erwartungen wie Ebenheit und Ausrichtung entworfen werden. So wie bei der statischen Erfassung Annahmen bezüglich eines Sensors - wie ein zeitweilig konstantes Beobachtungszentrum - getroffen

werden, lassen sich über den Weg des semantischen Kontextes auch Annahmen bezüglich Objekten und deren geometrischen Eigenschaften festlegen, um auf diese Weise eine Referenzierung zu stützen.

Dass semantische Informationen für die Erfassung dreidimensionaler Modelle verwendbar sind, zeigen [IOCCHI und PELLEGRINI 2007]. Zur Modellierung von Innenräumen erzeugen sie mittels horizontal ausgerichtetem Profilschanner pro Etage eines Gebäudes zunächst eine 2D-Abbildung. In dieser werden semantische Strukturen wie Wände, Stufen etc. detektiert. Außerdem wird mithilfe einer Stereokamera ein lokales, texturiertes 3D-Modell aufgenommen, in dem ebenfalls dieselben Strukturen gesucht werden. Der Ansatz verknüpft also selbst hybride Erfassungsmethoden.

Eine Objekterkennung für die Aufgabe der statischen Registrierung nutzt auch [DOLD 2010]. Dabei werden vorab in den statischen Scans Ebenen gesucht, deren Ebenenparameter als mittelbare Beobachtungen zur Berechnung der Transformationsparameter angesehen werden. [RABBANI et al. 2007] verwenden zusätzlich Oberflächen höherer Ordnung wie Kugel, Zylinder und Torus, ohne die Objekte zwangsläufig inhaltlich zu beschreiben. Die Flächenparameter werden dort in einem integrierten Ansatz zusammen mit den Transformationsparametern geschätzt. Die Auswertung erfolgt zweistufig: Zunächst werden die Transformationsparameter mithilfe des orthogonalen Abstands Ω_i eines Punktes zur i -ten Oberfläche geschätzt, was zur Zielfunktion

$$\sum_{i=1}^{\mathcal{O}} \sum_{j=1}^{P_i} \Omega_i^2 (\mathbf{R}_i \mathbf{x}_j + \mathbf{t}_i) \rightarrow \min \quad (2.27)$$

aller \mathcal{O} Oberflächen führt. Insgesamt werden pro Oberfläche i jeweils P_i Punkte verwendet. Im zweiten Schritt werden alle Parameter - die der Transformation und der Oberflächen - in einer Bündelblockausgleichung geschätzt. Mit dieser sogenannten direkten Methode können zwar bessere Anpassungen für die Transformationsparameter erreicht werden, der Ansatz setzt jedoch aufgrund der Linearisierung gute Näherungswerte für die Parameter und eindeutige Korrespondenzen der Oberflächenobjekte voraus.

Bei der indirekten Methode werden vorab die Oberflächenparameter bestimmt. In diesem Zusammenhang bietet eine varianzbasierte Schätzung von Oberflächenparametern die Möglichkeit, dass Merkmale (Invarianten) auf der Basis statistischer Tests bestimmt werden und dass Korrespondenzen zwischen Oberflächen mehrerer Scans individuell gewichtet werden können.

2.4. TLS im ingenieurgeodätischen Kontext

Das TLS findet in der Ingenieurgeodäsie zunehmend Anwendung. Soll die Nutzbarkeit über den Zweck einer ausschließlichen Substitution etablierter Verfahren ausgeschöpft werden, ist ein weitergehendes Verständnis notwendig, das die speziellen Eigenschaften des TLS berücksichtigt. Nachfolgend wird das TLS vor dem Hintergrund geodätischer Grundsätze diskutiert.

Der Begriff der Ingenieurgeodäsie (engl.: *engineering geodesy*) assoziiert zunächst eine technische Komponente der geodätischen Aufgaben. Eine allgemeine Beschreibung der Ingenieurgeodäsie bzw. eine Definition finden sich in [KAHMEN 2006, BRUNNER 2007]. Dabei beschreibt [KAHMEN 2006] die Tätigkeiten, wie sie für technische Vermessungen charakteristisch sind. Diese werden in die drei Aufgabenkomplexe (1) Aufnahme und Darstellung des örtlichen Bestandes, (2) geometrische Übertragung und messtechnische Kontrolle und (3) Überwachung eingeteilt (siehe hierzu auch DIN 18710-1). Zu deren Umsetzung sind Anforderungen zu definieren, wie die Abschätzung einer Messgenauigkeit und deren interdisziplinäre Kommunikation.

Neben den technischen Aufgaben diskutiert [BRUNNER 2007] die Ingenieurgeodäsie im Kontext wissenschaftlicher Disziplinen. Demnach ist es für einen wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn erforderlich, die Gültigkeit von Theorien eindeutig zu belegen. Die technischen Disziplinen hingegen verlangen, Entwicklungen abgestuft zu bewerten, um schließlich einen Fortschritt erreichen zu können. Für die Entwicklungen lassen sich aus wissenschaftlicher Sichtweise dann methodische Grundsätze identifizieren, die für die technischen Disziplinen

charakteristisch sind. Für den Bereich der Geodäsie formuliert [BRUNNER 2007] zehn solcher methodischen Elemente:

1. Diskretisierung von natürlichen Oberflächen und Objekten
2. Abgrenzung des Beobachtungsraumes von den Koordinaten
3. Definition eines Referenzsystems
4. Spezifikation der unbekannt Parameter und der erforderlichen Präzision
5. Planung eines geodätischen Netzes und der Beobachtungen
6. Qualitative Prüfung der technischen Ausrüstung
7. Qualitative Kontrolle der Beobachtungen
8. Aufstellung eines Modells der Beobachtungen
9. Aufstellung eines Modells der geschätzten Parameter
10. Qualitative Bewertung der Ergebnisse

[BRUNNER 2007] verwendet die Grundsätze, um damit auch ingenieurgeodätische Prozesse zu beschreiben und zu bewerten. Nachfolgend werden sie zur Charakterisierung der Verfahren eingesetzt, die das terrestrische Laserscanning einbeziehen. Da sich die inhaltlichen Ausprägungen der Grundsätze überschneiden, werden sie in den vier Abschnitten Diskretisierung und Repräsentation (Abschnitt 2.4.1), Beobachtungsraum und Koordinatenraum (Abschnitt 2.4.2), Referenzsystem und geodätisches Netz (Abschnitt 2.4.3) sowie Kontrolle und Beschreibung der Beobachtungen (Abschnitt 2.4.4) zusammenhängend diskutiert.

2.4.1. Diskretisierung und Repräsentation

Wird ein Objekt im Sinne der Mechanik als Kontinuum angesehen [WELSCH et al. 2000], so können dessen Eigenschaften modellhaft beschrieben werden: Aus der Sicht der Ingenieurgeodäsie bilden diskrete Messpunkte in den Dimensionen Raum und Zeit ein Modell, das ein Objekt und dessen Verhalten repräsentiert. Die Wahl der Punkte und deren Erfassungsrate ist von zentraler Bedeutung und jeweils der Objektgröße, der Beschaffenheit, dem Verhalten und der Zugänglichkeit etc. anzupassen. Ziel der Diskretisierung ist ein *Objektmodell* als abgebildete Approximation eines Messobjektes, das einen Übergang von der Kontinuumsmechanik zur Punktmechanik darstellt [WELSCH et al. 2000]. Umgekehrt sind die diskreten, punktorientierten Modelle zu generalisieren, um wiederum ein Modell der Kontinuumsmechanik zu erhalten.

Beim Einsatz hochauflösender Sensoren ist die Aufgabe der Diskretisierung nicht mit der Abtastung einzelner Punkte gelöst, da rohe Massenpunkte kaum für geodätische Auswertemethoden, wie z. B. Deformationsanalysen eingesetzt werden können. Beim Übergang von gescannten Einzelpunkten zu repräsentativen Modellparameter (Objektmodell aus *Modellpunkten*) ist eine geometrische und zeitliche Approximation des Objektes inklusive der zugehörigen Unsicherheit zu gewährleisten. Dies erfordert eine dem Objekt angepasste Filterung bzw. Aggregation, die jeweils generalisierende Wirkung haben.

Beim Scannen werden die Objekte in natura rasterförmig erfasst. Dies ist ein prinzipieller Unterschied zur klassischen Bildung eines Objektmodells. Im Gegensatz zur tachymetrischen Aufnahme findet die Diskretisierung ohne vorherige Identifikation statt. In gescannten Punktwolken sind also Zielpunkte nachträglich zu finden oder repräsentative Punkte bzw. Formen zu definieren. In diesem Kontext weist [HENNES 2007] auf das *objektgebundene und flächenhafte Messen* hin. Danach werden räumliche Zusammenhänge nicht über externe Referenzrahmen sondern zunehmend durch das Objekt selbst definiert. Um Unsicherheiten im objektbezogenen Referenzrahmen angeben zu können, sind dabei auch die der gescannten Punktwolken notwendig.

Die Zuordnung identischer Modellpunkte ist Voraussetzung für klassische Auswertungen, sei es für eine Ausgleichung geodätischer Netze oder für die kinematische Modellierung. Zum Zweck einer Registrierung oder Referenzierung werden daher (Pass-) Punkte markiert, die sich möglichst universell

und automatisch eindeutig identifizieren lassen. Außerdem soll die hohe räumliche Dichte der gescannten Einzelpunkte genutzt werden, um die Erfassung der Position repräsentativer Punkte zu verbessern. Zur Suche markanter Bereiche sind in der Bildverarbeitung seit langem Algorithmen verbreitet, die auf Basis der Autokorrelationsfunktion charakteristische Stellen wie Einzelpunkte und Kanten detektieren [FÖRSTNER und GÜLCH 1987, HARRIS und STEPHENS 1988]. In den Intensitätsbildern terrestrischer Laserscans lokalisiert [ABMAYR et al. 2008] symmetrische Punktzeichen mittels Kreuz-Korrelation und projiziert sie anschließend in den 3D-Raum. Einzelne so ermittelte Punkte werden mehreren Scans zugeordnet und bilden die Grundlage für die räumliche Transformation. Die Homologie der Punkte ist dabei implizit. Im Gegensatz dazu setzt das Verfahren des ICP keine homologen Punkte voraus, die Lösungen der räumlichen Transformationen sind daher geprägt sowohl durch eine geometrische Komponente, d.h. durch die Position der Punkte im Raum als auch durch eine identifizierende Komponente, die Punkte und deren Korrespondenzen festlegt. Beide Komponenten sind nur bedingt und je nach Strategie der Zuordnung voneinander trennbar.

Für ingenieurgeodätische Sensoren zeigt die Abbildung 2.6 typische Auflösungen in den Dimensionen Zeit und Raum. Sie verdeutlicht vor allem den Fortschritt terrestrischer Laserscanner hinsichtlich der Messgeschwindigkeit.

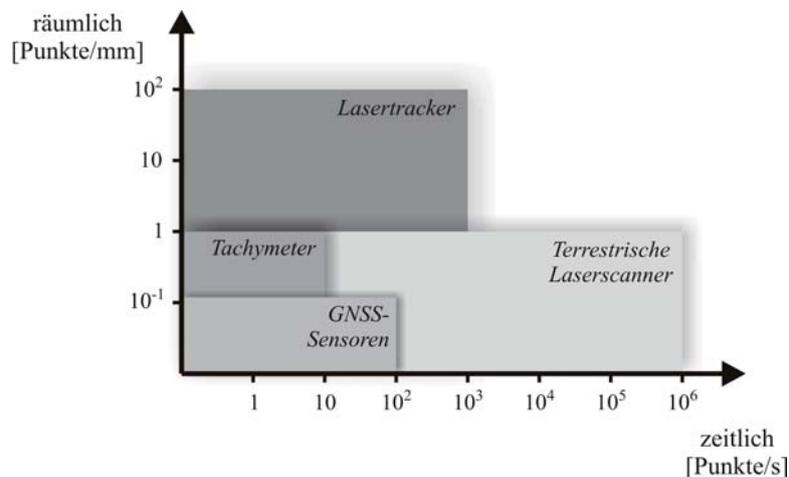


Abbildung 2.6: Erreichbare räumliche und zeitliche Auflösungen typischer in der Ingenieurgeodäsie eingesetzter Sensoren

Die rasterförmige, identifikationslose Abtastung stellt dann eine Herausforderung dar, wenn das Laserscanning für Überwachungsmessungen eingesetzt wird. Sind Objektzustände unterschiedlicher Epochen miteinander zu vergleichen und auszuwerten, so setzt dies eine eindeutige räumliche Zuordnung repräsentativer Zustände voraus. Gleichfalls ist der Vorteil der hohen räumlichen Auflösung möglichst zu erhalten. Im Vergleich zu den klassischen Sensoren für Überwachungsmessungen wie Tachymeter, Neigungssensoren etc. erfordert das Verfahren des terrestrischen Laserscannings stets eine geometrische Modellierung des Objektes, da die einzelnen gescannten Punkte von untergeordneter Bedeutung sind. Zum Zweck der Bauwerksüberwachung vergleicht [ELING 2009] dazu eine Reihe von Ansätzen zur räumlichen Approximation von Oberflächen.

Trotz hoher Messfrequenzen und damit verbundenen hohen zeitlichen und räumlichen Auflösungen ist in semantischer Hinsicht die Auflösung jedoch gering. Die Transformation zwischen unterschiedlichen Auflösungsstufen mit variablem semantischen Informationsgehalt (Generalisierung) ist eine klassische Aufgabe der Kartographie. Bei der automatischen Generalisierung kann die semantische Relation zwischen Objekten mithilfe einer semantischen Distanz berücksichtigt werden [HAUNERT 2008].

Der Prozess des Scannens ist je nach Vorkenntnissen zum Objekt (Existenz, Ausdehnung, Verhalten etc.) und zur Objektumgebung zu gestalten, damit schließlich ein Objekt durch ein Modell umfassend repräsentiert werden kann. Die Vorkenntnisse zum Objekt können auf verschiedene Weise gewonnen werden. So wird im statischen Fall vielfach eine Begehung und Inaugenscheinnahme vor Ort durchgeführt, um die Anzahl und Vertei-

lung einzelner Scanstandpunkte zu wählen. Ist ein Objekt bereits in einem Modell abgebildet und automatisch zugänglich (z. B. auf Basis vorheriger Aufnahmen) so lassen sich einzelne Standpunkte bzw. Trajektorien bewegter Plattformen vorab auch automatisch festlegen.

Im Gegensatz dazu werden im Ansatz des SLAM keine Vorkenntnisse vorausgesetzt. Ein Modell wird inkrementell aufgestellt und eine Szene so automatisch abgebildet. Ob durch ein so erstelltes Modell ein Objekt ausreichend repräsentiert wird, ist für den Scanprozess zunächst nicht bedeutsam. Die Frage, von wo eine bewegte Plattform ein Objekt für eine umfassendes Modell zu scannen hat, kann demnach automatisch nur beantwortet werden, wenn aus dem Scan eine Repräsentation der Objekte bewertet werden kann. Dies erfordert eine Modellbildung, die auch die Repräsentation als Teil der Beschreibung eines Objektes versteht, quantifiziert und mit Unsicherheiten ausdrückt. In diesem Zusammenhang besteht also eine unmittelbare Wechselwirkung zwischen einer aus der gescannten Szene abgeleiteten Repräsentation von Objekten und dem Scanprozess selbst.

2.4.2. Beobachtungsraum und Koordinatenraum

[BRUNNER 2007] bezeichnet die Trennung von Beobachtungsraum und Koordinatenraum als methodisches Merkmal der Ingenieurgeodäsie. Für automatisch messende Systeme ist diese strikte Abgrenzung innerhalb des sensoreigenen Koordinatensystems oft nicht möglich. Dies gilt sowohl für terrestrische Laserscanner als auch für satellitengestützte Sensoren, falls nur Koordinatenwerte für Punkte zugänglich sind. [BRUNNER 2007] fordert, dass eine Transformation zwischen Beobachtungen und Koordinaten möglich sein soll. Im Fall von polar messenden Systemen kann diese Unterscheidung hilfreich sein, um Genauigkeiten eines Sensors zu analysieren und zu quantifizieren. Die sog. *Komponentenkalibrierung* [NEITZEL 2006, SCHULZ 2007] setzt diese Trennbarkeit voraus, wobei eine separate Betrachtung der geometrischen Beobachtungselemente Winkel und Strecken hinreichend sein soll. In geodätischen Netzen sind dann die polaren Elemente als Beobachtungen anzusehen, um Bedingungen wie die Winkelsumme von Dreiecken einführen zu können. Für die Stationierung eines Laserscanners in einem Netz können flächen- oder volumenhafte Zielmarken gescannt werden, aus deren Zentren sich anschließend polare Elemente zurückführen lassen. [ELING 2009] nutzt zusätzlich Intensitätswerte, um daraus das Zentrum einer Zielmarke zu bestimmen.

Letztlich sind beim flächenhaften Verfahren des Laserscannings aus den Massenpunkten wiederum identifizierte Punkte zu aggregieren, die dann quasi als Beobachtungen im herkömmlichen Sinne weiterverarbeitet werden können. Auch für diesen Übergang ist eine durchgängige Betrachtung der Unsicherheit notwendig.

2.4.3. Referenzsystem und geodätisches Netzwerk

In ingenieurgeodätischen Prozessen sind einzelne Beobachtungen definierten Koordinatensystemen in Form von Netzen zuzuordnen. Zum Aufbau geodätischer Netze werden vielfach geodätische Raumverfahren wie GNSS eingesetzt. Klassischerweise wird die Zuordnung über vermarktete Punkte realisiert. Alternativ lassen sich auch temporär markierte Punkte verwenden, die z. B. nur für die Aufnahme von einen Tachymeterstandpunkt erstellt werden. Sollen terrestrische Scans automatisch referenziert werden, so sind referenzierende und scannende Sensoren in einem gemeinsamen System zu integrieren [VENNEGEERTS et al. 2009]. Dadurch ist die räumliche und zeitliche Beziehung zwischen den Systemkomponenten realisiert [GLÄSER und SCHOLLMEYER 2004].

Zur räumlichen Transformation von Multi-Sensor-Systemen zeigt die Abbildung 2.7 den Übergang zwischen den Koordinatensystemen. Danach werden alle Beobachtungen \mathbf{y} der messenden Komponenten im jeweiligen sensorspezifischen Koordinatensystem angegeben [FOPPE et al. 2004]. Beobachtungen objekterfassender Sensoren \mathbf{y}_i wie terrestrische Laserscanner, bildgebender Sensoren usw. sind über eine lokale Transformationen \mathbf{T}_i in das Koordinatensystem des Multi-Sensor-Systems \mathbf{x}_M zu überführen. Der zeitabhängige Übergang $\mathbf{T}_M^Z(t)$ in ein Zielsystem \mathbf{x}_Z kann durch Messungen referenzierender Sensoren \mathbf{y}_k festgelegt werden. Beispielhaft

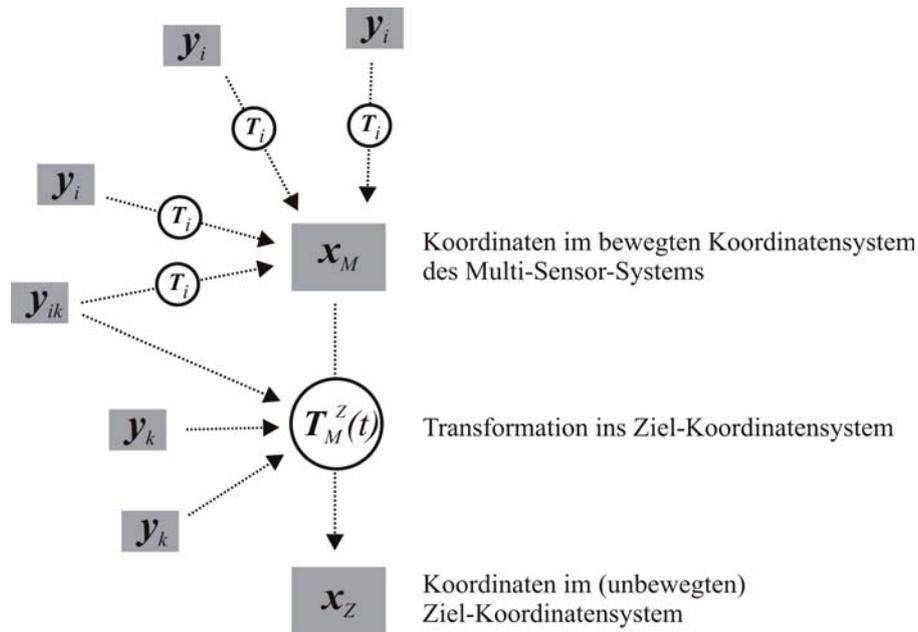


Abbildung 2.7: Relation zwischen Koordinatensystemen in Multi-Sensor-Systemen (in Anlehnung an [FOPPE et al. 2004])

hierfür ist der Einsatz von GNSS-Sensoren, von Neigungssensoren, die den Bezug zum lokalen Erdschwerefeld herstellen oder von Kreiseln, die eine Azimutrichtung angeben. Denkbar sind auch Beobachtungen von bifunktionalen Sensoren y_{ik} , die sowohl referenzierende als auch objekterfassende Aufgaben erfüllen. Beispiel hierfür ist ein Tachymeter, das auf einer bewegten Plattform sowohl für die Bestimmung der Trajektorie als auch für die polare Aufnahme der Objektumgebung eingesetzt wird. [BAYOUND und SKALLOUD 2008] verwenden bildgebende Sensoren um auf der Basis von SLAM in Kombination mit einer inertialen Messeinheit die Transformation in das Zielsystem aufzustellen. Bildgebende Sensoren können sowohl für die Referenzierung als auch - wie SLAM immanent - für die Erfassung des Objektraumes eingesetzt werden. Zur Integration aller beteiligten Komponenten sind die jeweiligen Transformationen als auch die gemeinsame Transformation vom Multi-Sensor-System in ein Zielsystem (Referenzsystem) aufzustellen.

2.4.4. Kontrolle und Beschreibung der Beobachtungen

Für den Einsatz der Sensoren ist zu gewährleisten, dass die Qualität der Messungen den angegebenen Spezifikationen genügt. Daher werden die Sensoren einer Prüfung unterzogen, wobei das vordergründige Ziel die Entscheidung ist, ob ein Sensor gegenwärtig die instrumentenspezifischen Vorgaben erfüllt oder nicht [GOTTWALD et al. 2009]. In diesem Sinne ist ein Prüfverfahren ein Test auf Funktionstüchtigkeit, wie das sog. *Feldprüfverfahren* [GOTTWALD et al. 2009], das auf der ISO-Norm 17123 [ISO 2007] basiert.

Neben der Funktionsprüfung sollen mittels Prüfverfahren ebenfalls verschiedene Scannertypen und Scannergenerationen miteinander vergleichbar werden. Deshalb werden Qualitätskriterien definiert, die quantitative Aussagen ermöglichen, was zu Kenngrößen und deren Unsicherheiten führt. Voraussetzung für die Vergleichbarkeit ist ein einheitliches Verfahren. Bezogen auf terrestrische Laserscanner unterbreitet [HEISTER 2006] erste Vorschläge für ein solches standardisiertes Prüfverfahren (sog. *Labor-Prüfverfahren*). Die Prozedur orientiert sich an der Richtlinie VDI/VDE 2634 [VDI 2002] für bildgebende Sensoren.

Neben einer Prüfung, die dem Nutzer die Funktionstüchtigkeit und das Qualitätsniveau der Messungen angibt, sind darüber hinaus auch die Parameter für den Übergang von physikalischen zu geometrischen Größen zu quantifizieren. Es ist festzustellen, ob die präsentierten Werte mit denen einer Messung zugrunde liegenden,

tatsächlichen Größen übereinstimmen (DIN 1319). Dies wird im Rahmen einer Kalibrierung untersucht und bei terrestrischen Laserscannern durchweg von den Herstellern durchgeführt. Da dadurch keine Informationen zum zugehörigen mathematisch-physikalischen Kalibriermodell vorliegen, können letztlich nur geometrische Soll-Ist-Vergleiche durchgeführt werden. Für diesen geometrischen Vergleich sind Bedingungen einzuhalten, die das Messergebnis beeinflussen. So sind neben den atmosphärischen Bedingungen, die Beschaffenheit der Oberfläche, die Konstellation einer Aufnahme und der sich daraus ergebende Auftreffwinkel etc. entscheidene Einflussgrößen für das Messergebnis. Diese Menge abhängiger Einflussparameter erschweren die Aufstellung allgemein gültiger Korrekturmodelle. Die Schwierigkeit besteht demnach nicht darin, Abweichungen unter bestimmten Bedingungen festzustellen, sondern ein Modell zu entwickeln, das alle signifikanten Einflussgrößen beinhaltet, um schließlich Korrekturwerte für tatsächliche Scans ermitteln zu können. Die systematischen Abweichungen lassen sich nur interpretieren, falls Kenntnisse zur physikalisch-technischen Funktion der Sensorkomponenten und zum Kalibriermodell vorliegen. Dies ist eine Voraussetzung, um Kalibrierparameter zu bestimmen, mit der generell Messwerte korrigiert werden sollen.

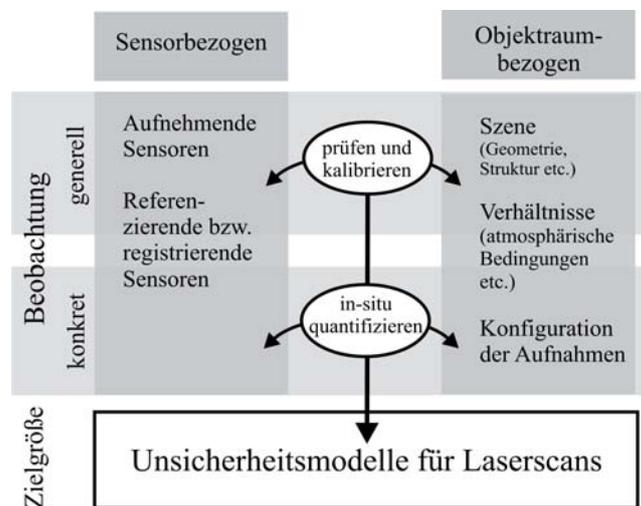


Abbildung 2.8: Unsicherheitsmodellierung für terrestrische Laserscans

Die Abbildung 2.8 illustriert den Zusammenhang. Danach richtet sich eine Prüf- bzw. Kalibrierprozedur generell nach den Eigenschaften des Sensors und nach denen des Objekttraumes. Dies gilt vor allem aufgrund der reflektorlosen Distanzmessung. Die Prozedur bildet damit Unsicherheiten eines Sensorsystems ab, die für jeweilige Objektumgebungen gültig sind. Beispiele dafür sind Auftreffwinkel, Oberflächenstruktur wie Rauigkeit und Helligkeit, Entfernung zum Objekt usw. Die Menge der Einflussgrößen und die Masse der Daten verlangen dazu eine effiziente Varianzfortpflanzung, die zu den Ausführungen in Kapitel 4 motiviert.

Um Beobachtungen zu beschreiben, unterscheidet [BRUNNER 2007] zwischen drei Modellen: (1) peripheres Modell, (2) integrales Modell und (3) stochastisches Modell. Beim peripheren Modell werden systematische Effekte instrumenteller Art oder Gegenheiten der Messumgebung autark ermittelt. Ein Beispiel dafür ist die Erfassung atmosphärischer Bedingungen, um die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale zu bestimmen. So werden bei Messungen mit einem EDM Korrekturanteile zu einer Normalatmosphäre ermittelt und an den Messungen angebracht. Im integralen Modell werden dagegen die Korrekturparameter als Unbekannte in der Auswertung mitgeschätzt. Schließlich werden im stochastischen Modell zufällige Abweichungen abgebildet. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass sich ein Messwert y aus den Komponenten

$$y = y_{wahr} + \Delta y_{zufällig} + \Delta y_{systematisch} \quad (2.28)$$

zusammensetzt (vgl. [KUTTERER und SCHÖN 2004]). Für die Verteilung der zufälligen Anteile gilt der zentrale Grenzwertsatz. Seien danach Y_k , $k = 1, \dots, n$ unabhängige, identisch verteilte Zufallsvariablen mit $E(Y_k) = \mu$ und $V(Y_k) = \sigma^2 \in [0, \infty)$, dann gilt bei $n \rightarrow \infty$ für

$$Z = \frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \mu)}{\sqrt{n\sigma^2}} \rightarrow Z \sim N(0, 1). \quad (2.29)$$

Um zufällige Anteile zu berücksichtigen, wird daher auf Basis des zentralen Grenzwertsatzes die genäherte Normalverteilung angenommen. Wird der systematische Anteil mangels Informationen durch eine Gleichverteilung bzw. Dreiecksverteilung beschrieben, sind wahrscheinlichkeitstheoretisch die Anteile nicht durch Überlagerung der Verteilungen sondern durch Faltung zu kombinieren. Dies hat unmittelbaren Einfluss auf die resultierende Verteilung einer Messgröße und somit auch auf die Entscheidung von Hypothesentests [KUTTERER und SCHÖN 2004].

Zufällige und systematische Einflüsse können kombiniert werden, wenn Einflussfaktoren und deren Verteilungen mithilfe der Monte Carlo Simulation modelliert werden. Im Sinne des Bayes-Theorems lassen sich dann auch systematische Anteile als Zufallsgröße behandeln, wenn nicht ihre Existenz sondern ausschließlich ihre Größe als zufällig angesehen wird [KOCH 2008]. Neben der Berücksichtigung beliebiger Verteilungsfunktionen sind keine Linearisierungen erforderlich. Fehlerhafte Annahmen aufgrund der linearen Varianzfortpflanzung erläutert [HENNES 2007] anhand spezieller Beispiele. Neben der Abschätzung der Varianzen einer Zielgröße können aus der Monte Carlo Simulation auch zugehörige Konfidenzbereiche quantifiziert werden. [KOCH 2008] zeigt die Vorgehensweise und nutzt die Simulation für ein Anwendungsbeispiel, bei dem abgeschätzt wird, welche Unsicherheit ein Laserscanner aufweisen dürfte, um aus Scans Neigungen einer Fahrbahnoberfläche mit vorgegebenen Abweichungen zu berechnen.

Die Masse der Beobachtungen und die Menge der Einflussfaktoren erschweren die Angabe von Unsicherheiten für Massendaten. Sie werden daher vielfach nur pauschal und unter Berücksichtigung einer minimalen Anzahl von Einflussfaktoren quantifiziert. Das Kapitel 4 zeigt verschiedene Varianten, um Varianzen für Massendaten fortzupflanzen. Zur Reduzierung des Rechenaufwands wird auch eine inkrementelle Variante der Varianzfortpflanzung entwickelt. In diesem Kapitel wird zudem vorgeschlagen, wie massenhafte Kovarianzmatrizen visualisiert werden können.

Für ingenieurgeodätische Aufgaben ist es bedeutsam, dass nicht nur die Messgrößen und Ergebnisse mit Unsicherheiten beschrieben werden, sondern dass diese auch in der Auswertekette durchgängig einbezogen werden. Dies ist aufgrund der massenhaften Daten vor allem bei der Nutzung terrestrischer Laserscans relevant, weil hier nicht einzelne gescannte Punkte, sondern daraus abgeleitete Modellparameter wie Oberflächenformen etc. genutzt werden. Bezogen auf Mobile-Mapping-Systeme heißt dies, dass bei Nutzung von Objektrauminformationen für die Registrierung und Referenzierung auch bei der Prozessierung von Scandaten eine metrisch interpretierbare Unsicherheit zu integrieren ist. Diese Forderung ist wegweisend für das hier beschriebene Verfahren zur kombinierten Georeferenzierung.

3. Mathematische Grundlagen

3.1. Berechnung fortgeplanter Varianzen

Als Zufallsvariablen werden Abbildungen des Ergebnisses eines Zufallsexperimentes auf (reelle) Zahlen bezeichnet [HÄNSLER 2001]. Um Zufallsvariablen zu beschreiben, stellen Varianzen eine bedeutende Kenngröße dar. Deren Definition wird anschließend kurz erläutert. Darauf aufbauend werden verschiedene Ansätze gezeigt, wie Varianzen transformiert und quantifiziert werden können. Neben der klassischen linearen Varianzfortpflanzung (Abschnitt 3.1.1) lassen sich diese auch mit den Verfahren der numerischen Approximation auf der Basis deterministisch verteilter Punkte (*unverzerrte Transformation*) ermitteln. Dies wird im Einzelnen in Abschnitt 3.1.2 betrachtet.

Die in diesem Abschnitt gezeigten Verfahren bilden die Basis zur Berechnung von Varianzen für Massendaten; dies ist Thema des anschließenden Kapitels 4.

3.1.1. Klassische Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung

Im stochastischen Sinne können Messungen einer Größe durch eine Zufallsvariable L beschrieben werden. Die Realisierung sei durch eine Beobachtung l angegeben, wobei die Verteilungsdichtefunktion durch $f(l)$ dargestellt werden kann. Dann gilt für den Erwartungswert μ einer kontinuierlichen Zufallsvariablen L (erstes Moment):

$$\mu = E(L) = \int_{-\infty}^{+\infty} l \cdot f(l) dl. \quad (3.1)$$

Der Erwartungswert ist demnach der Mittelwert über eine Schar von Realisierungen einer Zufallsvariablen. Daher wird er auch als Scharmittelwert oder Ensemblemittelwert bezeichnet (z. B. [HÄNSLER 2001]). Dagegen bezeichnen Mittelwerte der k -ten Potenz von Zufallsvariablen das k -te Moment von Zufallsgrößen. Wird von den Zufallsgrößen der Erwartungswert abgezogen, führt dies zum Begriff der zentralen Momente k -ter Ordnung. Das zweite zentrale Moment - auch *Varianz* oder *Dispersion* genannt - ergibt sich aus

$$V(L) = \int_{-\infty}^{+\infty} (l - \mu)^2 f(l) dl, \quad (3.2)$$

falls auch dieses Integral existiert. Übertragen auf den mehrdimensionalen Fall aus n Zufallsvariablen \mathbf{L} beschreibt

$$\Sigma_{ll} = E \left((\mathbf{l} - E(\mathbf{L})) (\mathbf{l} - E(\mathbf{L}))^T \right). \quad (3.3)$$

dann die *Kovarianzmatrix* oder *Dispersionmatrix* von \mathbf{l} mit dem Erwartungswertvektor $\boldsymbol{\mu}_l = E(\mathbf{L})$.

Sei ferner g eine Funktion, die eine Zufallsvariable L auf eine Variable X eindeutig abbildet, dann gilt für den Erwartungswert

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(l) \cdot f(l) dl \quad (3.4)$$

und für die zugehörige Varianz

$$V(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (g(l) - E(X))(g(l) - E(X))dl. \quad (3.5)$$

Bildet im mehrdimensionalen Fall die vektorwertige Funktion \mathbf{h} insgesamt n Zufallsvariablen in \mathbf{L} linear auf m Variablen \mathbf{X} ab mit

$$\mathbf{h} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m, \quad \mathbf{x} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{l} + \mathbf{b}, \quad (3.6)$$

dann gilt nach dem *Varianz-Kovarianz-Fortpflanzungsgesetz*

$$\Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Sigma_{\mathbf{l}\mathbf{l}}\mathbf{A}^T. \quad (3.7)$$

Bei nicht-linearen Beziehungen \mathbf{h} kann dieselbe mithilfe der Jacobi-Matrix

$$\mathbf{J} = \left. \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{l}} \right|_{\mathbf{l}=\mathbf{l}_0} \quad (3.8)$$

an der Stelle \mathbf{l}_0 linearisiert werden (z. B. [KOCH 1997]), wodurch allgemein gilt

$$\Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}} = \mathbf{J}\Sigma_{\mathbf{l}\mathbf{l}}\mathbf{J}^T. \quad (3.9)$$

Für den Erwartungswert wird dabei angenommen, dass zumindest $E(\mathbf{x}) \approx \mathbf{h}(E(\mathbf{l}))$ gilt. Die Fortpflanzung ist unabhängig von der Verteilung, jedoch werden nur lineare Anteile der Funktion \mathbf{h} berücksichtigt. Für eine erweiterte funktionale Approximation werden bei der *nicht-linearen Varianzfortpflanzung* auch Terme zweiter Ordnung verwendet [GRAFAREND und SCHAFFRIN 1993]. Dies führt bei hochgradig nicht-linearen Beziehungen zu einer verbesserten Transformation der Varianzen.

Die Aufstellung der Jacobi-Matrix ist dann aufwändig, wenn umfangreiche Funktionsterme auftreten. Zwar liefert das symbolische Differenzieren die Ableitungen maschinengesteuert automatisch, jedoch steigt damit vielfach der Aufwand so erheblich, dass die direkt abgeleiteten Funktionen kaum mehr verwendet werden können. Daher werden Ableitungen vielfach auf Basis finiter Differenzen (FD) - auch *numerisches Differenzieren* genannt - gebildet. Dieser Ansatz als auch das Verfahren des *algorithmischen (automatischen) Differenzierens*, das Ableitungen in Rechengenauigkeit ermöglicht, wird im Abschnitt 3.2.2 näher beleuchtet.

3.1.2. Unverzerrte Transformation (Unscented Transformation)

Die klassische Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung approximiert die funktionale Beziehung \mathbf{h} durch eine Linearisierung in Form der Jacobi-Matrix. Wie erwähnt ist die lineare Fortpflanzung unabhängig von der Verteilungsfunktion. Andererseits kann auch die Verteilungsfunktion approximiert werden - und zwar in Form einzelner, diskreter Punkte. Sei $\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{l}}$ der Erwartungsvektor von n Zufallsvariablen und $\Sigma_{\mathbf{l}\mathbf{l}}$ die zugehörige Kovarianzmatrix. Bei einer symmetrischen Verteilung um den Erwartungsvektor $\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{l}}$ bilden k die Verteilung approximierende Punkte die Spalten der Matrix (nachfolgend in Anlehnung an die Beobachtungen mit \mathcal{L} bezeichnet)

$$\mathcal{L} = \underset{n,k}{\mathbf{1}} \otimes \underset{1,k}{\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{l}}} + \underset{n,1}{\boldsymbol{\Gamma}} \quad (3.10)$$

mit dem Vektor $\mathbf{1} = [1 \dots 1]$. Die Spalte j von $\boldsymbol{\Gamma}$ werde für alle $j = 1, 2, \dots, k$ mit $\boldsymbol{\Gamma}^{(j)}$ angegeben. Sie entspricht der relativen Lage eines von k approximierenden Punkten um $\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{l}}$.

Die Verteilungsdichtefunktion kann durch zufällig generierte Werte vertreten werden. Dieser Ansatz wird bei der *Monte-Carlo-Simulation* verfolgt. Um einen Beobachtungsvektor mit $\mathbf{l} \sim N(\boldsymbol{\mu}_l, \boldsymbol{\Sigma}_l)$ zu repräsentieren, lassen sich die Punkte mithilfe der Standard-Normalverteilung erzeugen. Es folgt daraus:

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(j)} = \mathbf{A} \mathbf{z}_j \quad (3.11)$$

mit $\dim \mathbf{z}_j = \dim \mathbf{l}$ und $\mathbf{z}_j \sim N(0, 1) \forall z = 1, 2, \dots, k$ [KOCH 2008]. Die Matrix \mathbf{A} nach $\mathbf{A} \mathbf{A}^T = \boldsymbol{\Sigma}_l$ lässt sich als quadratische Wurzel einer positiv definiten Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_l$ mittels Cholesky-Zerlegung berechnen. Für eine gute Approximation der Verteilungsdichtefunktion wird k i.A. sehr groß gewählt. Hier setzt die Idee der unverzerrten Transformation (engl: *unscented transformation*, *UT*) an: Anstatt zufällig erzeugter Punkte werden bei der UT verhältnismäßig wenige, deterministisch verteilte Punkte eingesetzt. Allgemein wird bei der UT eine n -dimensionale multivariate Verteilungsdichtefunktion der Beobachtungen durch eine Anzahl von k sog. *Sigma-Punkten* angenähert. Die Menge und die Lage der Sigma-Punkte definieren erstmalig [JULIER und UHLMANN 1997] im klassischen Ansatz wie folgt (hier kompakt mittels Blockmatrizen notiert):

$$\boldsymbol{\Gamma}_{n,k} = \sqrt{n + \kappa} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{A} & -\mathbf{A} \\ n,1 & n,n & n,n \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

In der Implementierung wird $\boldsymbol{\mu}_l = \mathbf{l}$ angenommen. Mit dem Faktor $\kappa \in \mathfrak{R}$ kann skaliert werden, wie weit die Sigma-Punkte um eine Beobachtung \mathbf{l} entfernt liegen. Je nach angenommener Verteilungsdichtefunktion kann damit eine Approximation höherer Momente erreicht werden. Im Fall einer Normalverteilung empfehlen [JULIER und UHLMANN 1997] $\kappa = n - 3$. Insgesamt sind also $k = 2n + 1$ Punkte zur Approximation erforderlich. Obendrein wird eine Gewichtung eingeführt, mit der der zentrale Sigma-Punkt an der Stelle der Beobachtung \mathbf{l} höher gewichtet wird:

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{n + \kappa} \begin{bmatrix} \kappa, \underbrace{\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2}}_{2n} \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Jeder Sigma-Punkt kann nun entsprechend einer funktionalen Beziehung $\mathbf{x} = \mathbf{g}(\mathbf{l})$ instanziiert werden mit

$$\boldsymbol{\mathcal{X}}^{(j)} = \mathbf{g}(\boldsymbol{\mathcal{L}}^{(j)}), \quad (3.14)$$

dabei ist $\boldsymbol{\mathcal{L}}^{(j)}$ die j -te Spalte von $\boldsymbol{\mathcal{L}}$. Als transformierter Erwartungswert folgt schließlich

$$\bar{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\mathcal{X}} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (3.15)$$

und als zugehörige Varianz mit $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\boldsymbol{\omega})$ (vgl. Gl. 3.3)

$$V(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} = (\boldsymbol{\mathcal{X}} - \mathbf{1} \otimes \bar{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\Lambda} (\boldsymbol{\mathcal{X}} - \mathbf{1} \otimes \bar{\mathbf{x}})^T. \quad (3.16)$$

Bei der unverzerrten Transformation werden also Verteilungen eines mehrdimensionalen Beobachtungsvektors durch diskrete Sigma-Punkte approximiert und jeweils einzeln instanziiert. Über ein gewichtetes Mittel der transformierten Punkte können dann ein Erwartungswert und die zugehörige Varianz repräsentiert werden.

Der große Vorteil der unverzerrten Transformation gegenüber der linearen Varianzfortpflanzung liegt darin, dass keine Ableitungen gebildet werden müssen. Damit ist das Ergebnis der Varianz einer Zielgröße nicht geprägt durch die funktionale Linearisierung. In diesem Zusammenhang zeigt [WENDEL 2007], dass mit der UT eine nicht-lineare Funktion \mathbf{g} bis zum Linearisierungsgrad zweiter Ordnung angenähert werden kann. Nachteilig bei UT ist dagegen, dass Diskontinuitäten von \mathbf{g} in der Nähe von \mathbf{l} zu Abweichungen in den transformierten Varianzen führen können. Falls sie erkannt werden, kann in diesem Fall im klassischen Ansatz der Faktor κ verkleinert werden. Dies bewirkt eine verringerte Streuung der Sigma-Punkte um die Beobachtung \mathbf{l} .

Eine Generierung massenhafter Punkte nach Gleichung 3.11 ist typisch für Monte-Carlo- (MC-) Simulationen. Sind diese zufällig verteilten Punkte erzeugt, können für die instanziierten Größen auch Varianzen berechnet werden - die Gleichungen 3.14 - 3.16 gelten entsprechend. Die Punkte werden i. A. gleich gewichtet. Da für eine gute Approximation der Verteilung von \mathbf{l} sehr viele $\mathcal{L}^{(j)}$ erzeugt werden müssen, ist die MC-Simulation zur Berechnung von Varianzen für Massendaten nur bedingt geeignet. Nachfolgend wird daher - unter Annahme einer Normalverteilung - das Verfahren der UT bevorzugt.

3.2. Numerische Verfahren zum Differenzieren

3.2.1. Differenzieren mittels finiter Differenzen

Die Jacobi-Matrix setzt sich aus den einzelnen partiellen Ableitungen der Funktionen nach den Beobachtungen zusammen (s. Gl. 3.8). Sie können auch als gerichtete Ableitungen $\dot{\mathbf{l}}_j$ in Richtung einer j -ten Beobachtung angesehen werden. Dann ist die Ableitung in dieser Richtung definiert nach

$$\dot{\mathbf{x}} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\mathbf{g}(\mathbf{l} + h\dot{\mathbf{l}}_j) - \mathbf{g}(\mathbf{l})}{h}. \quad (3.17)$$

Die Methode der finiten Differenzen nutzt diesen Zusammenhang unmittelbar für diskrete kleine $h \in \mathbb{R}$ mit

$$\dot{\mathbf{x}} \approx \frac{\mathbf{g}(\mathbf{l} + h\dot{\mathbf{l}}_j) - \mathbf{g}(\mathbf{l})}{h}. \quad (3.18)$$

Die Implementierung dieses Ansatzes ist zwar einfach, für jede partielle Ableitung sind die Funktionswerte jedoch doppelt zu berechnen, wodurch der Aufwand proportional mit der Anzahl der Beobachtungen steigt. Dies ist besonders dann nachteilig, wenn - wie für die Varianzfortpflanzung - in einem hoch-dimensionalen Beobachtungsraum die vollständige Jacobi-Matrix erforderlich ist.

Zudem ist die ausreichend kleine Wahl von h der Rechengenauigkeit anzupassen. [KOWARZ 2008] zeigt dies anhand der Definition der floating-point-Arithmetik, wodurch deutlich wird, dass h nur jeweils einzeln angepasst verkleinert werden kann.

Diese Einschränkungen führen zum algorithmischen Differenzieren, bei dem die genannten Nachteile nicht auftreten und das Ergebnis eine Lösung in Rechengenauigkeit darstellt.

3.2.2. Algorithmisches Differenzieren (AD)

Die nachfolgenden Ausführungen und Notationen basieren auf [GRIEWANK und WALTHER 2008], die alle grundsätzlichen Ansätze präsentieren. Die Grundidee des *algorithmischen* bzw. *automatischen Differenzierens* (AD) beruht darin, dass eine beliebige Funktion in eine Menge elementarer Funktionen $\varphi_i \in \Phi$ zerlegt werden kann. Zur Ableitung kann die Kettenregel angewandt werden, wonach für den Fall von zwei Funktionen $y = f(u)$ und $u = g(x)$ gilt

$$(f \circ g)'(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{df}{dg} \frac{dg}{dx}. \quad (3.19)$$

Die Voraussetzung ist, dass sich g in x bzw. dass sich alle Funktionen φ_i differenzieren lassen. Das numerische Ergebnis der Folge elementarer Operationen an der Stelle φ_i sei durch v_i mit $i = 1, \dots, l$ ausgedrückt. Die Abhängigkeit zwischen einzelnen v_i wird auch mit dem Operator \prec ausgedrückt: $j \prec i$ bedeutet demnach, dass v_i von v_j abhängig ist. Entsprechend gilt für die Verkettung elementarer Funktionen

$$v_i = \varphi_i(v_j)_{j \prec i}. \quad (3.20)$$

Der Ablauf des AD ist damit für den sog. *forward mode* sofort ersichtlich. Für das Argument v_i kann die Ableitung \dot{v}_i nämlich direkt durch v_j und dessen Ableitung \dot{v}_j ausgedrückt werden. Es gilt allgemein analog zu Gleichung 3.19

$$\dot{v}_i = \sum_{j < i} \frac{\partial \varphi_i(v_j)_{j < i}}{\partial v_j} \dot{v}_j. \quad (3.21)$$

Werden an der n -dimensionalen Entwicklungsstelle alle Argumente $v_{i-n} = x_i \forall i = 1, \dots, n$ und alle \dot{v}_{i-n} mit $\dot{v}_{i-n} = 1 \forall i = 1, \dots, n$ instanziiert, so ergibt sich jeder weitere Schritt gemäß Gleichung 3.21 mit der äußeren Ableitung $\frac{\partial \varphi_i(v_j)_{j < i}}{\partial v_j}$ und der inneren \dot{v}_j . Für die elementaren Funktionen φ_i können die Ableitungen einfach aufgestellt werden (s. Tab. 3.1).

$v = c$	$\dot{v} = 0$
$v = u$	$\dot{v} = 1$
$v = u \pm w$	$\dot{v} = \dot{u} \pm \dot{w}$
$v = u \cdot w$	$\dot{v} = \dot{u} \cdot w + u \cdot \dot{w}$
$v = \sin(u)$	$\dot{v} = \cos(u) \cdot \dot{u}$

Tabelle 3.1.: Einige elementare Regeln zur Ableitung der Argumente

Am Beispiel der Transformation von Polarkoordinaten in kartesische Koordinaten (Gl. 2.9) ist in Abbildung 3.1 der Verlauf anhand eines Graphen dargestellt.

Die Kette der Elementarfunktionen und deren Ableitungen wird durch das Überladen von Funktionen implementiert, für deren Ablauf eine Reihe von Strategien entwickelt worden sind. Neuere Ansätze basieren zunehmend auf der parallelisierten Berechnung der Operationen. [KOWARZ 2008] erläutert unterschiedliche Vorgehensweisen und validiert diese für mehrere Anwendungsbeispiele.

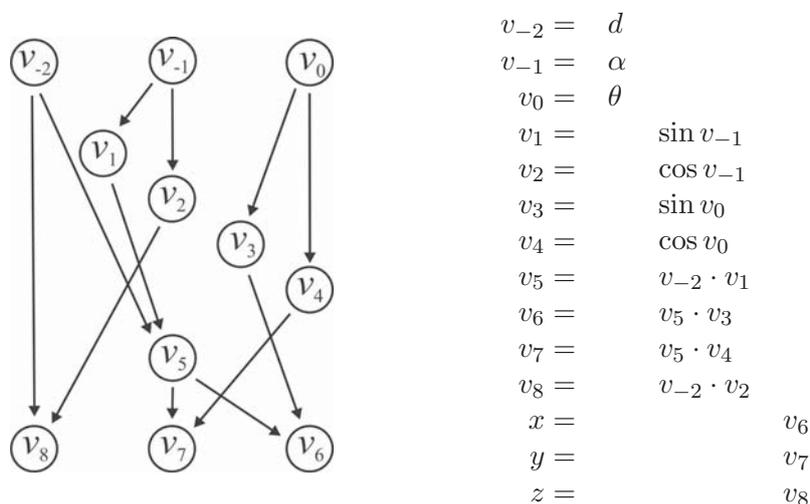


Abbildung 3.1: Ablauf des algorithmischen Differenzierens am Beispiel der Koordinatentransformation (Verkettung elementarer Funktionen)

3.3. Kalman-Filterung

3.3.1. Allgemeiner konzeptioneller Ansatz und optimierte Lösung

Zeitabhängige Zustände von Systemen sind oftmals zu filtern, wenn die Messungen zur Erfassung dieser Zustände mit Unsicherheiten behaftet sind. Anders als bei den Filtern der Zeitreihenanalyse, die Zustände ausschließlich im Beobachtungsraum modellieren, werden in der Kalman-Filterung das Systemverhalten und die Messungen in einem gemeinsamen Ansatz ausgewertet. Angenommen sei ein lineares dynamisches System, das mittels Differentialgleichungen beschrieben werden kann

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{T}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(t)\mathbf{w}(t). \quad (3.22)$$

Das Änderungsverhalten wird als Überlagerung dreier Anteile formuliert. Dabei beinhaltet zeitabhängig die Transitionsmatrix $\mathbf{T}(t)$ den ungestörten Fortschritt des Zustandes, die Stellmatrix $\mathbf{B}(t)$ zusätzliche, äußere Einflüsse $\mathbf{u}(t)$ und die Störmatrix $\mathbf{S}(t)$ die stochastischen Anteile $\mathbf{w}(t)$. Eine Lösung für den diskreten Fall kann über die Summe einzelner (partikulärer) Lösungen gebildet werden mit (u. a. [WELSCH et al. 2000, GELB et al. 2001])

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{T}_{k+1|k}\mathbf{x}_k + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{T}(t_{k+1}, \tau)\mathbf{B}(\tau)\mathbf{u}(\tau)d\tau + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{T}(t_{k+1}, \tau)\mathbf{S}(\tau)\mathbf{w}(\tau)d\tau. \quad (3.23)$$

Wird für die Lösung der Differentialgleichung im diskreten Fall davon ausgegangen, dass sowohl die Größen $\mathbf{T}(t)$, $\mathbf{B}(t)$ und $\mathbf{S}(t)$ als auch $\mathbf{u}(t)$ und $\mathbf{w}(t)$ zumindest stückweise, d. h. zwischen zwei diskreten benachbarten Zeitpunkten konstant sind, lassen sich die Integralterme epochenweise substituieren. Übertragen auf den linearen diskreten Fall lässt sich ein dynamisches Modell dann wie folgt angeben:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k}[\mathbf{x}_k \ \mathbf{u}_k \ \mathbf{w}_k]^T & (a) \\ \mathbf{l}_{k+1} &= \mathbf{A}_{k+1|k} \mathbf{x}_{k+1} & (b) \end{aligned} \quad (3.24)$$

mit

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = [\mathbf{T}_{k+1|k} \ \mathbf{B}_{k+1|k} \ \mathbf{S}_{k+1|k}]. \quad (3.25)$$

Dabei bildet die Designmatrix $\mathbf{A}_{k+1|k}$ den linearen funktionalen Zusammenhang zwischen Zuständen \mathbf{x}_k und den Beobachtungen \mathbf{l}_k ab.

Für dieses dynamische Modell zeigt [KALMAN 1960] eine Lösung unter der Bedingung, dass

$$E \left((\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k) (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)^T \right) \rightarrow \min, \quad (3.26)$$

also der Erwartungswert der Quadratsumme der Verbesserungen zwischen gefiltertem Zustand $\hat{\mathbf{x}}_k$ und tatsächlichem Zustand \mathbf{x}_k minimiert wird. Dies ist gleichbedeutend mit der Minimierung der *spur* ($\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_k}$) der Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_k}$ [GELB et al. 2001]. Im Sinne der Optimierungstheorie kann dies als ein Kriterium angesehen werden, um bei gegebener Zielfunktion (Gl. 3.26) die Parameter $\hat{\mathbf{x}}_k$ optimal zu schätzen. Die Schätzung $\hat{\mathbf{x}}_k$ wird als *rekursiv* bezeichnet, weil sich die Lösung des momentanen Zustandes aus den momentanen Beobachtungen und dem vorherigen Schätzwert ergibt [HÄNSLER 2001].

Zur Lösung wird der Zustand $\bar{\mathbf{x}}_{k+1}$ zunächst prädiert, ohne dass ein stochastischer Anteil berücksichtigt wird:

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{T}_{k+1|k} \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_{k+1|k} \mathbf{u}_k. \quad (3.27)$$

Außerdem wird die zugehörige Varianz fortgepflanzt mit $\Sigma_k = \text{diag}([\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_k} \ \Sigma_{\mathbf{u}\mathbf{u}_k} \ \Sigma_{\mathbf{w}\mathbf{w}_k}])$ und

$$\Sigma_{\bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}}_{k+1}} = \mathbf{P}_{k+1|k} \Sigma_k \mathbf{P}_{k+1|k}^T. \quad (3.28)$$

Die genannte Minimumsbedingung führt zur Lösung des aufdatierten bzw. gefilterten Zustands

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k+1} = \bar{\boldsymbol{x}}_{k+1} + \boldsymbol{K}_{k+1} \boldsymbol{d}_{k+1} \quad (3.29)$$

und der Innovation

$$\boldsymbol{d}_{k+1} = \boldsymbol{l}_{k+1} - \boldsymbol{A}_{k+1} \bar{\boldsymbol{x}}_{k+1}. \quad (3.30)$$

Mit der Kofaktormatrix der Beobachtungen

$$\boldsymbol{Q} \boldsymbol{u}_{k+1} = \frac{1}{\sigma_0^2} \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{u}_{k+1} \quad (3.31)$$

folgt für die Innovation entsprechend der Varianzfortpflanzung

$$\boldsymbol{Q} \boldsymbol{d} \boldsymbol{d}_{k+1} = \boldsymbol{Q} \boldsymbol{u}_{k+1} + \boldsymbol{A}_{k+1} \boldsymbol{Q} \bar{\boldsymbol{x}} \bar{\boldsymbol{x}}_{k+1} \boldsymbol{A}_{k+1}^T. \quad (3.32)$$

Mit der optimierten Lösung der Verstärkungs- bzw. Kalman-Matrix

$$\boldsymbol{K}_{k+1} = \boldsymbol{Q} \bar{\boldsymbol{x}} \bar{\boldsymbol{x}}_{k+1} \boldsymbol{A}_{k+1}^T \boldsymbol{Q} \boldsymbol{d} \boldsymbol{d}_{k+1}^{-1} \quad (3.33)$$

lautet die resultierende Kofaktormatrix des gefilterten Zustands

$$\boldsymbol{Q} \hat{\boldsymbol{x}} \hat{\boldsymbol{x}}_{k+1} = \boldsymbol{Q} \bar{\boldsymbol{x}} \bar{\boldsymbol{x}}_{k+1} - \boldsymbol{K}_{k+1} \boldsymbol{Q} \boldsymbol{d} \boldsymbol{d}_{k+1} \boldsymbol{K}_{k+1}^T, \quad (3.34)$$

aus der der Zugewinn der Aufdatierung deutlich wird. Zur Filterung transformiert also die Kalman-Matrix die Innovation linear in den Zustandsraum.

Die Innovation als Differenz aus Beobachtung und prädiziertem Zustand zeigt, ob eine aktuelle Messung dem erwarteten Systemverhalten entspricht. Sie wird daher verwendet, um die aktuelle Verträglichkeit von Mess- und Systemgleichung zu testen (*Verträglichkeitstest*). Der Ablauf entspricht dem multivariaten Test für Erwartungswerte. Für die Nullhypothese H_0 lautet dieser

$$E(\boldsymbol{d}_{k+1}) = \mathbf{0} \mid H_0. \quad (3.35)$$

Entsprechend gilt - unter Annahme einer normalverteilten Innovation - für die Testgröße

$$T = \boldsymbol{d}_{k+1} \boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{d} \boldsymbol{d}_{k+1}}^{-1} \boldsymbol{d}_{k+1}^T \sim \chi_{n_{\boldsymbol{d}_{k+1}}}^2 \mid H_0 \quad (3.36)$$

mit $n_{\boldsymbol{d}_{k+1}}$ beteiligten Beobachtungselementen.

3.3.2. Erweiterung und Modifikation

Die Prädiktion und Varianzfortpflanzung setzt ein lineares Systemverhalten voraus. Ist dieses Verhalten wie in vielen Anwendungsfällen nicht gegeben, so kann eine allgemeine Beziehung

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{f}_{k+1|k}(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k) + \boldsymbol{S}_{k+1|k} \boldsymbol{w}_k \quad (3.37)$$

und die Messgleichung

$$\boldsymbol{l}_{k+1} = \boldsymbol{h}_{k+1|k}(\boldsymbol{x}_{k+1}) \quad (3.38)$$

mittels Linearisierung als Taylor-Reihe an den Stellen \boldsymbol{x}_k und \boldsymbol{u}_k bzw. $\bar{\boldsymbol{x}}_{k+1}$ approximiert werden. Diese erweiterte Modellierbarkeit führt zum Begriff des *Extended Kalman Filter* (EKF) [GELB et al. 2001], charakterisiert durch die Ordnung der Reihenentwicklung. Eine Linearisierung ist jedoch nicht zwingend. Alternativ können auch die allgemeinen Zusammenhänge der Gleichungen 3.37 und 3.38 eingesetzt werden. Dabei werden gefilterte Zustände $\hat{\boldsymbol{x}}_k$ und deren Varianzen $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\boldsymbol{x}}_k}$ durch eine Punktmenge repräsentiert, die entweder auf der Basis

einer zufälligen Monte-Carlo-Stichprobe oder deterministisch als Sigma-Punkte der unverzerrten Transformation nach Abschnitt 3.1.2 (sog. *Unscented Kalman Filter, UKF*) generiert werden. Dies ermöglicht vornehmlich für ein hochgradig nicht-lineares Systemverhalten und bei einem relativ hohen Systemrauschen eine verbesserte Prädiktion.

Insgesamt wird davon ausgegangen, dass diskret quantifizierte Zustände und Messungen zeitlich nicht korreliert sind; für das Mess- und Systemrauschen wird also jeweils weißes Rauschen angenommen. Farbige Rauschprozesse werden in sog. *Form-Filter*-Ansätzen modelliert [RAMM 2008]. Das Rauschen wird dabei in einen informativen (korrelierten) und einen nicht-informativen (nicht-korrelierten) Teil separiert. Der informative Teil wird funktional beschrieben und dessen Parameter in einer zusätzlichen Partition des Zustandsraumes mitgeschätzt. Diese Berücksichtigung ist sowohl für eine Modellierung des Mess- als auch des Systemrauschens möglich.

Die Zusammenführung von System- und Messgleichung motiviert zur Anwendung der Kalman-Filterung in der Ingenieurgeodäsie. Wird diese Unterscheidung als Theorie (System) und Empirie (Messung) interpretiert, so kann ein System im Zustandsraum nicht nur geometrisch, sondern auch mit zusätzlichen (physikalischen) Parametern beschrieben und identifiziert werden (sog. *Identifikation eines Strukturmodells*) [HEUNECKE 1995]. Die Erweiterung um zusätzliche Parameter führt zum Begriff der *adaptiven Kalman-Filterung*. Angemerkt sei, dass zur Aufstellung der Systemgleichung derzeit überwiegend linearisierte Ansätze verfolgt werden.

Als Sonderfall eines kinematischen Modells kann dessen kausale Modifizierung [EICHHORN 2005] angesehen werden. Bei Fahrzeugbewegungen treten infolge kurzzeitiger Lenkwinkeländerungen teilweise sehr hohe Dynamiken auf. Werden diese über Kreiselmessungen beobachteten Größen in den Zustandsraum mit aufgenommen, kann das ausschließlich deskriptive Modell dieses Verhalten nicht abbilden. Daher werden dort die Lenkwinkeländerungen als Stellgröße mithilfe der Stellmatrix $B(t)$ berücksichtigt.

Die Kalman-Filterung soll in dieser Arbeit eingesetzt werden, um die referenzierenden Parameter einer bewegten Plattform zu schätzen. Der Vorteil der Filterung liegt hier darin, dass in den Messgleichungen neben Zuständen auch Geschwindigkeiten als Beobachtungen integriert ausgewertet werden können. Das in Kapitel 5 dargestellte Verfahren der kombinierten kinematischen Georeferenzierung nutzt diese Möglichkeit, um in einem gemeinsamen Filteransatz aus den hybriden Beobachtungselementen die Parameter der Georeferenzierung zu bestimmen.

4. Unsicherheitsbetrachtung für Massendaten

4.1. Hintergrund, Motivation und Zielsetzung

Um natürliche und technische Zusammenhänge verstehen zu können, werden sie in Modellen abgebildet. In den technischen Disziplinen können diese Modelle aus zwei Teilen zusammengesetzt werden: Aus den formal bzw. *funktional* beschreibbaren Zusammenhängen und aus den *Modellparametern*. Funktionale Zusammenhänge und Modellparameter entsprechen damit einer (theoretischen) Vorstellung der Realität.

Die funktionale Beziehung kann vorgegeben werden, wenn die geometrische und die physikalische Konfiguration bekannt sind. Es verbleibt die Schätzung der Modellparameter, die als *feste* und *freie* Modellparameter unterschieden werden. Die festen Parameter folgen physikalischen Eigenschaften wie z. B. der Lichtgeschwindigkeit oder sind wiederum Bestandteile untergeordneter Modelle. So können beispielsweise auch Parameter eines atmosphärischen Modells als feste Parameter interpretiert werden. Die freien Parametern hingegen haben einen situativen bzw. momentanen Charakter. Sie werden mithilfe von Experimenten geschätzt; ihre Realisierungen werden daher als Beobachtungen bezeichnet.

In technischen Messungen wird angenommen, dass Beobachtungen und Parameter unsicher sind. Der Umgang mit solchen Unsicherheiten ist von der ISO im *GUM (Guidance to the expression of uncertainty in measurement)* bereits 1995 standardisiert worden. GUM unterscheidet zwei Typen von Unsicherheiten - und schlägt vor, wie diese behandelt werden können: Anteile von Beobachtungen, die zufälligen Charakter haben und experimentell, d. h. mit statistischen Methoden bestimmt werden können, werden unter dem Typ A zusammengefasst. Der sog. Typ B enthält dagegen Anteile, die auf Grundlage eines verfügbaren Wissens angegeben werden. Dies kann sich laut GUM aus vorherigen Messungen, aus Kenntnissen zum Einfluss äußerer Bedingungen (Temperatur, Luftdruck etc.) auf die Messung und aus externen Quellen wie standardisierte Systemuntersuchungen, Herstellerangaben usw. zusammensetzen.

Die Behandlung von Unsicherheiten wird vielfältig diskutiert: Aus dem Bereich der Geodäsie weisen [KUTTERER und SCHÖN 2004] darauf hin, dass - anders als zunächst im GUM vorgeschlagen - beide Typen von Unsicherheiten nicht rein stochastisch kombiniert werden können. [KOCH 2008] beschreibt die Vorgehensweise, wie sich Unsicherheiten mittels Monte-Carlo-Simulation integriert behandeln lassen. Mehrere Varianten zur Kombination beider Typen vergleichen [ALKHATIB et al. 2009]. Neben der rein stochastischen Variante werden dort Unsicherheiten auch mittels Monte-Carlo-Simulation und mittels unscharfer Komponenten der Fuzzy-Theorie festgelegt. [NEUMANN 2009] diskutiert in diesem Zusammenhang die Wechselwirkung zwischen Modell und Beobachtung und motiviert, verbleibende systematische Abweichungen durch unpräzise Größen in die Modellierung mit einzubeziehen. Er erweitert dazu die Modelle der Parameterschätzung (Gauß-Markov-Modell, Gauß-Helmert-Modell usw.), entwickelt Hypothesentests und berücksichtigt die Impräzision bei der Deformationsanalyse.

Die Zusammenhänge zwischen Beobachtungen und Modellparametern können zweistufig aufgestellt werden. Auf der Ebene der Beobachtungen beschreibt ein sog. *Messmodell*

$$l = g(l^*, p) \quad (4.1)$$

den Übergang von sog. *originären Beobachtungen* l^* zu den *Beobachtungsergebnissen* l . Die Parameter x eines Modells (in der Geodäsie auch als *geodätisches Modell* bezeichnet) folgen dann nach

$$x = f(l, p). \quad (4.2)$$

Außerdem werden Einflussgrößen p in Form von Korrekturparametern an die Beobachtungen angebracht (z. B. [NEUMANN 2009]). Diese können sowohl sensor- / modellbezogen als auch physikalisch / geometrisch interpretiert werden. So werden in automatischen Messsystemen wie terrestrischen Laserscannern die Beobachtungselemente der Distanz und Winkel durch interne Kalibrierparameter korrigiert. Prinzipiell können diese Korrekturparameter - sofern sie zugänglich sind - ebenfalls als Beobachtungen angesehen werden. Dies ermöglicht es, auch deren Unsicherheiten zu berücksichtigen.

Wie die Beobachtungsmodelle lassen sich auch (geodätische) Modelle parametrisch erweitern, was vielfach auf Kosten des Messmodells geschieht. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn im geodätischen Modell atmosphärische Modellparameter mit geschätzt werden. Erfassende Sensoren, die Massen von Beobachtungen erzeugen, erlauben es, ergänzende Korrekturmodelle einzuführen und zusätzliche Korrekturparameter zu bestimmen, mit denen Beobachtungen „verbessert“ werden sollen. Diese Vorgehensweise findet sich in der Selbstkalibrierung terrestrischer Laserscans [LICHTI 2009, SCHNEIDER 2009]. Diese Parametrisierung setzt jedoch voraus, dass Annahmen zur gescannten Objektgeometrie getroffen werden. Angemerkt sei, dass sich diese meist auf objektbezogene Annahmen wie die Ebenheit von Flächen stützen und absolute Vergleiche wie tatsächliche Abstände von Objekten unberücksichtigt bleiben. Problematisch ist weiterhin die Abgrenzung eines klassischen Korrekturhaushaltes polar messender Instrumente (Achsfehler, Additionskonstante etc.), wenn sensorinterne, herstellereigene Korrekturen gänzlich unbekannt sind. Es ist also kaum abzugrenzen, ob auf diesem Weg quantifizierte Achsfehler tatsächlich physikalisch vorhanden sind oder schlicht durch ein fehlerhaftes internes Korrekturmodell verursacht werden.

Die Abgrenzung zwischen Messmodell und geodätischem Modell ist also nicht eindeutig definierbar [NEUMANN 2009]. In Multi-Sensor-Systemen ist die Modellierung noch vielschichtiger: Für die Menge von Sensoren sind jeweils einzelne Beobachtungsmodelle bzw. Messmethoden zu definieren. Darüber hinaus können zusammenhängende Sensoren, die gemeinsam eine von n Aufgaben (z. B. die der Referenzierung) erfüllen, „Beobachtungen“ liefern. Diese Beobachtungen können bereits einen hohen Prozessierungsgrad erreicht haben. Es gilt:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}_1 \circ \mathbf{g}_2 \circ \dots \circ \mathbf{g}_n \quad (4.3)$$

Der Zusammenhang wird nachfolgend am Beispiel eines Multi-Sensor-Systems erläutert, dass aus referenzierenden und erfassenden Sensoren besteht (Abb. 4.1).

Danach registrieren (a) referenzierende Sensoren die (originären) Beobachtungen bezogen auf ein externes System. Mittels interner (meist für den Nutzer unbekannter) Methoden werden diese auf das System des Sensors bezogen (b). Dies kann eine einzelne Position (wie das Phasenzentrum einer GNSS-Antenne) oder ein dreidimensionales System (z. B. eines Tachymeters, einer inertialer Einheit etc.) sein. Um mehrere Beobachtungen referenzierender Sensoren einer Plattform integriert auswerten zu können, ist ihr Bezug im System der Plattform zu definieren (c). Der Bezug lässt sich - im stabilen Fall - durch eine einmalige Systemkalibrierung herstellen. Die integrierte Lösung aller referenzierenden Sensoren, also ein Bezug zum externen System, liefern Methoden wie kinematische Filter (d). Typisches Beispiel ist die Kombination von INS/GNSS. Auch hier stehen i.A. nicht die originären Beobachtungen der beteiligten Sensoren zur Verfügung, sondern ausschließlich gefilterte Lösungen beider Komponenten.

Bei den Sensoren, die Umgebungen erfassen, werden die originären Beobachtungen nach Anwendung einer sensorinternen Transformation ebenfalls im sensoreigenen System angegeben (e). Ist der Bezug zum plattformbezogenen (f) und zum erdfesten System (d) bekannt, lassen sich diese Beobachtungen ins erdfeste System transformieren.

Die Verkettung der Beobachtungsmodelle hat für die Angabe von Unsicherheiten der Zielgrößen folgende Konsequenzen:

- Vielfach sind Beobachtungen mehrerer integrierter Sensoren nicht direkt zugänglich, sondern es stehen nur intern prozessierte Lösungen der beteiligten Sensoren zur Verfügung. Eine massenhafte Herstellung von Systemkomponenten für den Einsatz in erweiterten Anwendungsfeldern wird diesen Trend zur Modularisierung der Systemkomponenten zukünftig noch verstärken. In der Modellierung können die

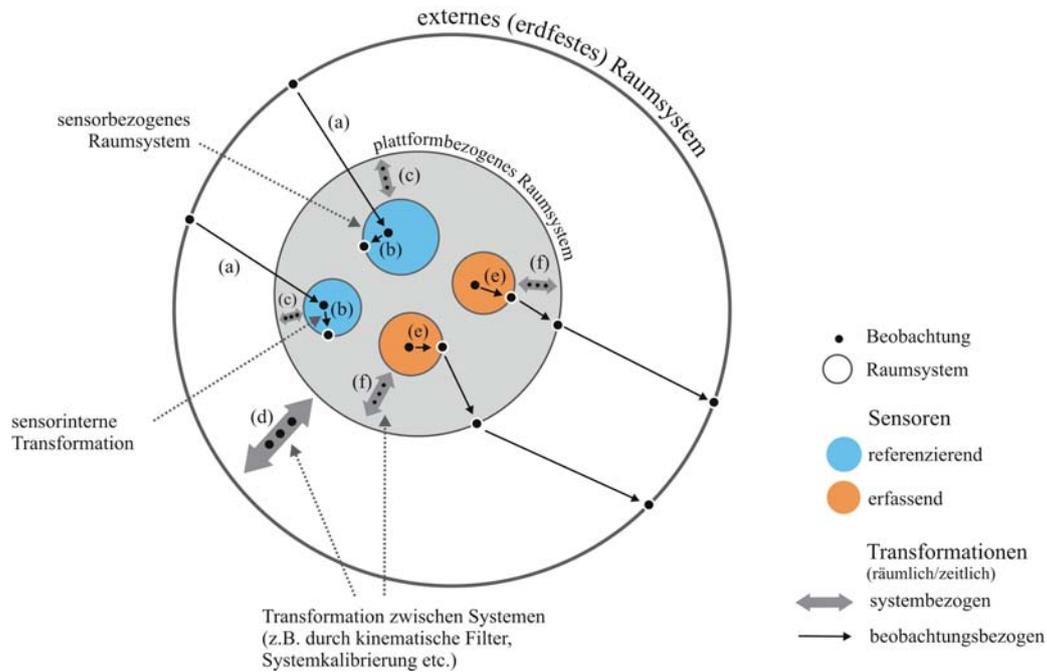


Abbildung 4.1: Relationen eines Multi-Sensor-Systems

Lösungen wiederum als Beobachtungen angesehen werden, die zusammen einen hoch-dimensionalen Beobachtungsraum aufspannen.

- Die Beobachtungselemente stehen durch die Reihe der räumlichen und zeitlichen Transformationen in einem hochgradig nicht-linearen Zusammenhang.
- Die hochauflösenden Sensoren erzeugen massenhafte Beobachtungen. Die Berechnung der Unsicherheit ist daher auf Effizienz zu optimieren.

Aufgrund dieser Voraussetzungen werden bei Massendaten hochauflösender Sensoren Unsicherheiten vielfach nur rudimentär angegeben. Entweder werden pauschale Größenordnungen genannt oder nur typische Anteile einzelner Beobachtungselemente quantifiziert. [GLENNIE 2007] untersucht für bewegte Scanning-Systeme (terrestrisch und flugzeuggetragen), wie groß exemplarisch der Einfluss von Scanentfernung, Scanwinkel, Kalibrierung, Orientierungswinkel und Position am gesamten Budget ist. Die Analyse quantifiziert die typischen Größenordnungen und beschreibt anteilmäßige Ursachen. Jedoch kann - vor allem bei Nutzung des GNSS - eine resultierende Unsicherheit nur instantan angegeben werden. Dies gilt für Bereiche, die völlig oder auch teilweise von GNSS abgeschattet sind. [SCHAER et al. 2007] zeigen für ein Scanning-System eines Helikopters punktbezogene Unsicherheiten. Neben Unsicherheiten aus der Referenzierung werden auch Einflüsse des Auftreffwinkels integriert. Der Auftreffwinkel wird aus einer kleinräumigen Umgebung abgeschätzt. Alle Unsicherheitsanteile - aus der Referenzierung und dem Auftreffwinkel - werden in einem gemeinsamen Index zusammengefasst. Dieser sog. *q-indicator* soll die Genauigkeit in Scanmodellen kennzeichnen. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird das stochastische Modell stark vereinfacht. So werden keinerlei Korrelationen zwischen den referenzierenden Beobachtungen berücksichtigt, was die Berechnung der fortgepflanzten Größen erleichtert. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz soll auch Korrelationen zwischen den Beobachtungselementen einbeziehen.

Die Angaben von Unsicherheiten für Massendaten haben zweierlei Vorteile: Sie indizieren die Erfassungsqualität der gescannten Szene. Damit wird deutlich, wie sich Unsicherheiten im Raum auswirken. Im statischen Fall dient dies der Planung, um abzuschätzen, welche Unsicherheiten sich bei einer gewählten Standpunkt-konfiguration ergeben und ob weitere Standpunkte eingefügt werden müssen. Außerdem lassen sich für die Parameterschätzung (z. B. von Formen wie Ebenen, Kugeln und Freiflächen) ohne zusätzliche Unsicherheits-

informationen die gescannten Punkte nur einheitlich gewichten. Hier ergibt sich der zweite Vorteil: Werden Unsicherheiten für einzelne Punkte abgeschätzt, können solche abgeleiteten Parameter auf Basis individuell gewichteter Punkte geschätzt werden.

Unter diesen Voraussetzungen stellen sich für die Beschreibung von Unsicherheiten massenhafter Daten folgende Fragen:

- Wie können Unsicherheiten der Modellparameter massenhaft abgeschätzt werden?
- Wie lassen sich massenhafte Varianzen geeignet visualisieren?

Das folgende Kapitel geht diesen beiden Fragen nach. Die Unsicherheiten aller Beobachtungen werden durchgehend stochastisch behandelt. Zur Transformation der Varianzen der Beobachtungen in den Zielraum werden verschiedene Varianten gezeigt. So wird für die bereits erwähnte unverzerrte Transformation (UT) nach [JULIER und UHLMANN 1997] (s. Abschnitt 3.1.2) eine Variante vorgestellt, die weniger Sigma-Punkte benötigt (Abschnitt 4.2) und damit für eine Anwendung auf Massendaten besser geeignet ist.

Die Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung basiert auf der linearen funktionalen Approximation in Form der Jacobi-Matrix. Die genannten Eigenschaften führen dazu, dass sich bereits die erste Ableitung von nicht-linearen Funktionen aus sehr umfangreichen Termen zusammensetzt. Diese treten aufgrund des hoch-dimensionalen Beobachtungsraumes außerdem entsprechend häufig auf. Die numerische Berechnung der Jacobi-Matrix ist daher mit einem hohen Aufwand verbunden. Im folgenden Kapitel wird ein erweiterter Ansatz entwickelt, die sog. *inkrementelle Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung (i-VKF)*. Der Aufwand zur Aufstellung der Jacobi-Matrix kann hier mithilfe einer Reihenentwicklung der Jacobi-Matrix erheblich verringert werden.

Die inkrementelle Varianzfortpflanzung als auch die Varianten der unverzerrten Transformation werden anschließend auf ein Mobile-Mapping-System angewandt (Abschnitt 4.4). Dies macht bei geringen Abweichungen eine erhebliche Effizienzsteigerung des Rechenaufwands gegenüber dem klassischen Ansatz der linearen Varianzfortpflanzung deutlich. Die resultierenden numerischen Ergebnisse der inkrementellen Varianzfortpflanzung als auch der unverzerrten Transformationen werden abschließend miteinander verglichen.

Damit einem Nutzer die massenhaften Varianzen anschaulich zugänglich werden, sind diese geeignet zu präsentieren. Im Abschnitt 4.4 wird dazu eine Visualisierungsmethode diskutiert und beispielhaft ausgeführt.

4.2. Modifizierte Variante der unverzerrten Transformation

Der Aufwand für die Berechnung der Varianz-Fortpflanzung mithilfe der unverzerrten Transformation ist abhängig von der Anzahl der repräsentierenden Sigma-Punkte. In ergänzenden Publikationen reduzieren [JULIER 2003] die Anzahl der Punkte und verteilen sie sphärisch um die Beobachtung \mathbf{l} (*spherical simplex UT*). [LI et al. 2007] modifizieren diese Variante und benötigen insgesamt nur noch $k = n + 1$ Sigma-Punkte (vgl. Gl. 3.12) mit

$$\underset{n,k}{\mathbf{\Gamma}} = \underset{n,n}{\mathbf{A}} \cdot \underset{n,k}{\mathbf{D}}. \quad (4.4)$$

Zur Berechnung einer unverzerrt fortgepflanzten Varianz-Kovarianz-Matrix der Beobachtungen sollen die Sigma-Punkte und damit deren Verteilung gemäß \mathbf{D} folgende Bedingungen erfüllen:

$$\mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

mit

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{n+1} [1 \dots 1]^T \quad (4.6)$$

sowie

$$\mathbf{D} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{D}^T = \mathbf{I} \quad (4.7)$$

mit

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\boldsymbol{\omega}). \quad (4.8)$$

Auf Basis dieser Bedingungen entwickeln [LI et al. 2007] eine Menge von Sigma-Punkten, die mit (angegeben ist hier eine von n Zeilen)

$$\mathbf{D} = \sqrt{n+1} \begin{bmatrix} \underbrace{\frac{1}{\sqrt{j(j+1)}} \cdots \frac{1}{\sqrt{j(j+1)}}}_{j=1 \dots n} - \frac{1}{\sqrt{(j+1)/j}} \underbrace{0 \dots 0}_{n-j} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

bzw. ausführlich notiert

$$\mathbf{D} = \sqrt{n+1} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{3/2}} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{12}} & \frac{1}{\sqrt{12}} & \frac{1}{\sqrt{12}} & -\frac{1}{\sqrt{4/3}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} & \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} & \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} & \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} & \dots & -\frac{1}{\sqrt{(n+1)/n}} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

und gemäß Gleichung 4.4 um die Beobachtungen verteilt sind. Sie zeigen ferner, dass die Berechnung dieser Variante mit einem geringeren Rechenaufwand als die nach [JULIER 2003] verbunden ist.

Die Abbildung 4.2 illustriert symbolisch die deterministische Verteilung von Sigma-Punkten entsprechend der Ansätze nach Gleichung 3.12 und 4.4 sowie den Ablauf der unverzerrten Transformation.

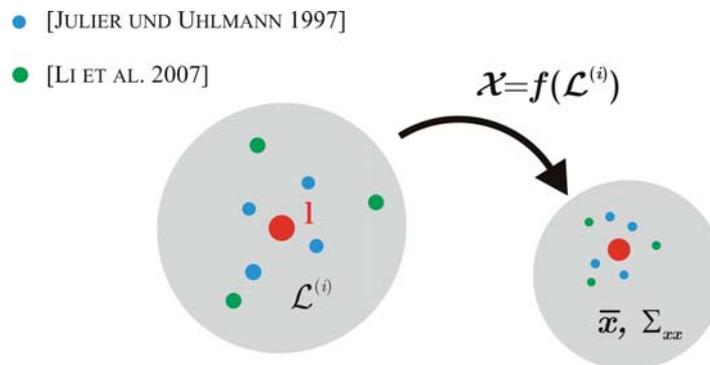


Abbildung 4.2: Ablauf: Unverzerrte Transformation

4.3. Inkrementelle Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung (i-VKF)

Im klassischen Ansatz der Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung wird für jede Beobachtung die Jacobi-Matrix \mathbf{J} neu aufgestellt. Der Aufwand für die Berechnung von \mathbf{J} steigt mit dem Umfang nicht-linearer Beziehungen und der Dimension des Beobachtungsraumes. Wird bei hochauflösenden Sensoren von einer Ähnlichkeit von \mathbf{J} für benachbarte Orte im Raum der Zielparameter \mathbf{x} ausgegangen, kann diese Eigenschaft genutzt werden, um die Jacobi-Matrix inkrementell aufzustellen. Wie aus der Reihenentwicklung nach Taylor bekannt, kann $\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{l})$ an der Stelle $\mathbf{l}^{(i)}$ funktional linear genähert werden mit

$$\mathbf{x} \approx \mathbf{f}(\mathbf{l}^{(i)}) + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{l}} \Big|_{\mathbf{l}^{(i)}} (\mathbf{l} - \mathbf{l}^{(i)}) + \dots \quad (4.11)$$

Analog dazu lässt sich \mathbf{J} an der Stelle $\mathbf{l}^{(i)}$ mit

$$\mathbf{J}(\mathbf{l}) \approx \mathbf{J}^{(i)} + \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathbf{l}^2} \Big|_{\mathbf{l}^{(i)}} (\mathbf{l} - \mathbf{l}^{(i)}) + \dots \quad (4.12)$$

ebenfalls approximieren, wobei die zweite Ableitung

$$\mathbf{H} := \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathbf{l}^2} \Big|_{\mathbf{l}^{(i)}} \quad (4.13)$$

der Hesse-Matrix entspricht mit $\dim \mathbf{H} = u \times n \times n$ bei n Beobachtungen in \mathbf{l} und u Funktionen in \mathbf{f} . Für die Jacobi-Matrix an der Stelle \mathbf{l} über die Entwicklungsstelle $\mathbf{l}^{(i)}$ gilt demnach genähert

$$\mathbf{J}(\mathbf{l}) \approx \mathbf{J}(\mathbf{l}^{(i)}) + \mathbf{H}(\mathbf{l}^{(i)}) * (\mathbf{l} - \mathbf{l}^{(i)}). \quad (4.14)$$

Im inkrementellen Ansatz der Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung werden an den Entwicklungsstellen $\mathbf{H}(\mathbf{l}^{(i)})$ und $\mathbf{J}(\mathbf{l}^{(i)})$ berechnet, an lokal benachbarten Stellen \mathbf{l} wird $\mathbf{J}(\mathbf{l})$ gemäß Gleichung 4.14 ermittelt. Die Strategie, wie die Jacobi-Matrix approximiert werden kann, ist der Applikation entsprechend zu wählen. Dabei sollte gewährleistet sein, dass eine ähnliche Nachbarschaft gegeben ist.

Obwohl für die Varianz-Fortpflanzung höhere Terme eingesetzt werden, unterscheidet sich die inkrementelle Variante von der nicht-linearen Varianz-Fortpflanzung [GRAFAREND und SCHAFFRIN 1993]. Die nicht-lineare Fortpflanzung setzt die Hesse-Matrix für eine bessere funktionale Approximation ein, die inkrementelle Fortpflanzung verwendet sie für eine lokale Approximation der Jacobi-Matrix. Einen direkten Vergleich zwischen der unverzerrten Transformation und der inkrementellen Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung zeigt die Tabelle 4.1.

Die Linearisierung nach Gleichung 4.14 setzt voraus, dass sich die Jacobi-Matrix für benachbarte Beobachtungen linear ändert und sich diese Änderung mithilfe der Hesse-Matrix an der Stelle $\mathbf{l}^{(i)}$ beschreiben lässt. Zur Steigerung der Effizienz gilt es demnach, eine möglichst geringe Anzahl von Entwicklungspunkten zu finden, mit denen die Jacobi-Matrizen der übrigen Beobachtungen approximiert werden können. Insgesamt ist bei bewegten Systemen davon auszugehen, dass diese Forderung eine zeitliche und räumliche Nachbarschaft der Beobachtungen voraussetzt.

Bei sequentiell erfassenden Sensoren wie Laserscannern kann eine räumliche und zeitliche Approximation durch eine Einteilung aus der Folge der Beobachtungen hergestellt werden. Diese Strategie wird in Abschnitt 4.4.3 näher erläutert.

Der modifizierte Ansatz der unverzerrten Transformation sowie die inkrementellen Varianzfortpflanzung wird nachfolgend auf ein Mobile-Mapping-System angewandt.

	Inkrementelle Varianz-Kovarianz -Fortpflanzung (i-VKF)	Unverzerrte Transformation (UT)
	Approximation von $f(\mathbf{l})$	Approximation von $\mathbf{l} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_l)$
funktional:	$\mathbf{x} \approx \mathbf{f}(\mathbf{l}^{(i)}) + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{l}} \Big _{\mathbf{l}^{(i)}} (\mathbf{l} - \mathbf{l}^{(i)}) + \dots$	$\mathcal{L} = \mathbf{1} \otimes \mathbf{l} + \boldsymbol{\Gamma}$ mit $\boldsymbol{\Gamma} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}$
und lokal:	$\mathbf{J}(\mathbf{l}) \approx \mathbf{J}^{(i)} + \underbrace{\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathbf{l}^2}}_{\mathbf{H}(\mathbf{l}^{(i)})} \Big _{\mathbf{l}^{(i)}} (\mathbf{l} - \mathbf{l}^{(i)}) + \dots$	$\boldsymbol{\chi}^{(i)} = \mathbf{f}(\mathcal{L}^{(i)})$
	$V(\mathbf{x}) = \mathbf{J} \boldsymbol{\Sigma}_l \mathbf{J}^T$	$V(\mathbf{x}) = (\boldsymbol{\chi} - \mathbf{1} \otimes \bar{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\Lambda} (\boldsymbol{\chi} - \mathbf{1} \otimes \bar{\mathbf{x}})^T$

Tabelle 4.1.: Vergleich der Varianten zur Berechnung von Unsicherheiten für Massendaten

4.4. Anwendung auf ein Mobile-Mapping-System

4.4.1. Funktionale Zusammenhänge

Die erwähnten Herausforderungen zur Berechnung von Unsicherheiten sind typisch für Multi-Sensor-Systeme und im Speziellen für Mobile-Mapping-Systeme. Hochauflösende Sensoren wie (terrestrische) Laserscanner oder auch bildgebende Sensoren erzeugen massenhaft Beobachtungen, die in den Zielraum zu transformieren sind. Durch die permanente Bewegung einer fahrenden Plattform können die Elemente der Referenzierung nur auf einzelne gescannte Punkte bezogen werden. Demnach sind im Beobachtungsvektor \mathbf{l} eines Punktes alle für die Referenzierung notwendigen Einflussgrößen mit einzubeziehen:

$$\mathbf{l} = [(xyz)_b (\phi\lambda)_b (pr\gamma) (\Delta xyz)_s^b (r_{xyz})_s^b (r_z)_{s2d}^s (d\theta)_{s2d}]^T \quad (4.15)$$

mit

$(xyz)_b$	Position Body (kartesisch, ECEF, earth-centered-earth-fixed)
$(\phi\lambda)_b$	Position Body (Länge, Breite)
$(pr\gamma)$	Rotationswinkel Body (Euler-Winkel) nach DIN 9300
$(\Delta xyz)_s^b$	Translation Scan-System zu Body-System (leverarm)
$(r_{xyz})_s^b$	Rotationswinkel Scan-System zu Body-System (boresight)
$(r_z)_{s2d}^s$	Rotationswinkel um Z-Achse (für 3D-Scanner: 2D-System zu 3D-System)
$(d\theta)_{s2d}$	Position Scanpunkt (Distanz d und Vertikalwinkel θ).

Ein gescannter Punkte $(d\theta)_{s2d}$ kann danach über eine Reihe von Transformationen und Rotation in das erdfeste System $\mathbf{x}_e = (xyz)_e$ überführt werden. Es gilt:

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{R}_n^e \mathbf{R}_b^n (\mathbf{R}_s^b \mathbf{R}_{s2d}^s (d, \theta, 0)_{s2d} + \Delta \mathbf{x}_s^b) + \mathbf{x}_b \quad (4.16)$$

mit

$R_n^e((\phi\lambda)_b)$	Rotationsmatrix: Navigations-System zu ECEF (earth-centered-earth-fixed)
$R_b^n(pry)$	Rotationsmatrix: Body- zu Navigations-System
$R_s^b((r_{xyz})_s^b)$	Rotationsmatrix: Scanner- zu Body-System
$R_{s2d}^s((r_z)_{s2d}^s)$	Rotationsmatrix um Z-Achse (im Fall des Einsatzes eines 3D-Scanners)
Δx_s^b	Translationsvektor: Scanner- zu Body-System
x_b	Position Body (IMU) ECEF (earth-centered-earth-fixed).

In ausführlicher Notation sind die Rotationsmatrizen im Anhang A.1 zu finden. Die Transformationsparameter für den Übergang des Scannersystems s in das Bodysystem der IMU b sind in einer Systemkalibrierung zu schätzen. Ist diese Kalibrierung auch für die inertielle Einheit durchgeführt worden, ist damit das System der IMU realisiert. Meist bilden markierte Passpunkte oder Eckpunkte des Gehäuses einer inertialen Einheit dieses System. Die Parameter in R_s^b und Δx_s^b können dann über identische Passpunkte der Plattform berechnet werden. Diese lassen sich beispielsweise photogrammetrisch im System der IMU und durch einen 3D-Scan im System des Scanners koordinieren.

Nähere Angaben zum Aufbau und zur Systemkalibrierung der Plattform sind als Vorbereitung auf die Validierungsmessungen in Kapitel 6 zu finden.

4.4.2. Stochastische Modelle

Die variablen Bedingungen - vor allem die aufgrund der Integration von GNSS - prägen die Unsicherheiten der referenzierenden Parameter. Für die Varianzfortpflanzung werden Varianzen und Kovarianzen aus den gefilterten Zuständen der Kalman-Filterung verwendet (siehe hierzu auch Diskussion in Abschnitt 4.1). Zu beachten ist, dass die Positionslösungen des GNSS und die Beschleunigungsmessungen der inertialen Einheit mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen vorgenommen wurden. Die Prozessierungsrichtung prägt damit die resultierenden Unsicherheiten der gefilterten Zustände.

Die Unsicherheiten der Transformationsparameter zwischen den Raumsystemen der IMU (Bodysystem) und des Scanners wurden für das verfügbare Instrumentarium gemäß Tabelle 4.2 abgeschätzt. Die Größenordnungen entsprechen denen der Unsicherheiten der ausgeglichenen Parameter der Helmert-Transformation der Plattform. Die Passpunkte wurden hier durch einen 3D-Scan im System des Scanners und photogrammetrisch im System der IMU koordiniert. Die Tabelle enthält obendrein Angaben zur sensorabhängigen Unsicherheit der gescannten Punkte im System des Scanners, angegeben für die Elemente Distanz d und Vertikalwinkel θ .

	Parameter	σ
System Plattform (Scanner- zu Bodysystem)	Translation $(\Delta xyz)_s^b$	2 mm
	Rotation $(r_{xyz})_s^b$	0.01 deg
Z+F Imager 5006	Distanz d	1 mm + 30 ppm
	Vertikalwinkel θ	0.01 deg

Tabelle 4.2.: Unsicherheiten zur Aufstellung des stochastischen Modells der Beobachtungen

4.4.3. Linearisierung für inkrementelle Varianzfortpflanzung

Für die lokale Approximation der Jacobi-Matrix ist zu gewährleisten, dass Beobachtungen l und Entwicklungsstellen $l^{(i)}$ zeitlich und räumlich benachbart sind. Bei polaren, sequentiell erfassenden Messsystemen wie terrestrischen Laserscannern wird hier daher die Jacobi-Matrix mithilfe der Rotation der Umlenkeinheit approximiert. Dieses Vorgehen ist für statische als auch für kinematische Aufnahmen anwendbar. Die Abbildung 4.3 verdeutlicht die Vorgehensweise.

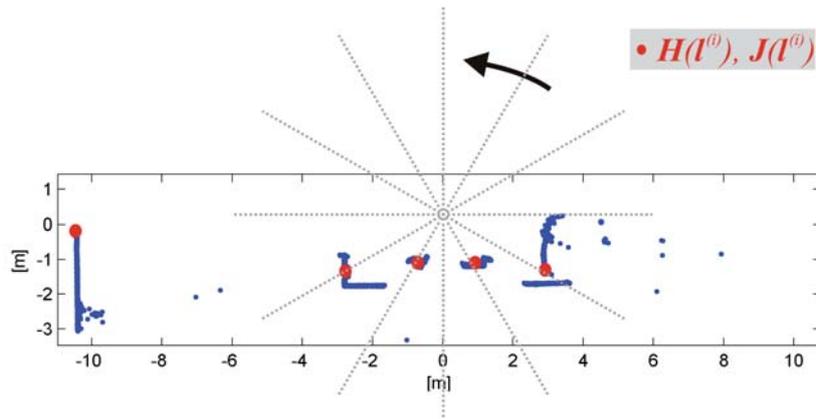


Abbildung 4.3: Linearisierung der Jacobi-Matrix für polar scannende Aufnahmesysteme. Die rot gezeichneten Punkte werden als Entwicklungsstellen verwendet, für die übrigen Punkte (blau) wird eine Jacobi-Matrix gemäß Gl. 4.14 genähert.

Danach wird ein gescanntes Profil in k Kreissegmente unterteilt. Pro Kreissegment wird an der Entwicklungsstelle $l^{(i)}$ die Hesse-Matrix $H(l^{(i)})$ und die Jacobi-Matrix $J(l^{(i)})$ mithilfe des algorithmischen Differenzierens (s. Abschnitt 3.2.2) berechnet. Die Jacobi-Matrix der übrigen gescannten Punkte eines Kreissegmentes kann dann nach Gleichung 4.14 linear angenähert werden. Anschließend werden Varianzen und Kovarianzen analog zum klassischen Ansatz fortgepflanzt.

Alternativ wären für eine zweiseitige räumliche Approximation auch Entwicklungspunkte denkbar, die im mittleren Bereich der Kreissegmente liegen. Die hier vorgeschlagene Vorgehensweise ist streng sukzessiv und hat damit folgenden Vorteil: Sie ist prinzipiell echtzeitfähig. Sie ist zudem leicht parallelisierbar, da nach dem Scannen eines Punktes bereits bekannt ist, ob dies ein Entwicklungspunkt ist oder nicht. Damit wird es möglich, dass die Berechnung der Hesse-Matrix schon während des Scannens der folgenden Punkte eines Segmentes durchgeführt werden kann.

4.4.4. Vergleich der Rechenzeiten und der numerischen Ergebnisse

Der Aufwand zur Berechnung der fortgepflanzten Varianzen steigt mit der Anzahl der Beobachtungen und mit dem Umfang der funktionalen Beziehungen zwischen den Beobachtungen und Zielgrößen. Für das Anwendungsbeispiel eines Mobile-Mapping-Systems vergleicht die Abbildung 4.4, wie viele Varianz-Kovarianz-Matrizen Σ_{xx} ($\dim \Sigma_{xx} = 3 \times 3$) in einer Minute in den vorgestellten Varianten fortgepflanzt werden können. Bei den referenzierenden Beobachtungselementen wurden dabei Varianzen und deren Kovarianzen mit berücksichtigt. Die Berechnungszeiten beziehen sich auf einen Desktop-PC (Core 2 Quad 2.4 GHz, 3 GB RAM, 32 bit). Die Ableitungen wurden durchgängig durch das algorithmische Differenzieren berechnet, implementiert auf Basis der Bibliothek IntLAB [RUMP 2010].

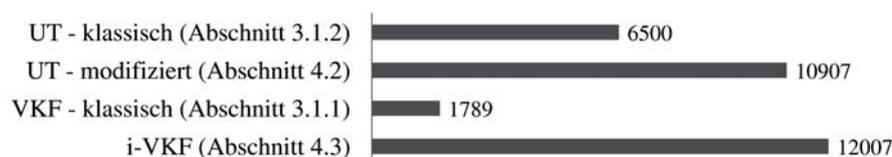


Abbildung 4.4: Vergleich der Rechenzeiten zur Berechnung der fortgepflanzten Varianz-Kovarianz-Matrizen [Punkte/min]

Danach ist die Berechnung von Varianzen mit der modifizierten Variante der UT (Abschnitt 4.2) ca. 1.7 mal schneller als die klassische Variante der UT (Abschnitt 3.1.2). Dieses Verhältnis ist annähernd zu erwarten, da

die modifizierte Variante $n + 1$ Sigma-Punkte nutzt, statt $2n + 1$ Sigma-Punkte bei der klassischen Version. Die schnellste Variante zur Berechnung von Varianzen ist hier die inkrementelle Varianzfortpflanzung. Sie benötigt ca. 10 % weniger Zeit als die modifizierte Variante der UT und ist hier insgesamt 6.7-fach schneller als die klassische Varianzfortpflanzung. Der Vorteil der inkrementellen Variante ist offensichtlich abhängig von der gewählten Strategie zur Linearisierung, in diesem Fall von der Anzahl der Kreissegmente. Entscheidend ist die Relation von Entwicklungspunkten zu Punkten mit approximierter Jacobi-Matrix. Dies wird durch die Dichte und die Verteilung der gesamten Punkte geprägt. Sie ergeben sich aus der Auflösung und aus der Struktur der gesamten Szene. Die zukünftige Entwicklung zu höher auflösenden Sensoren wird demnach den Vorteil der inkrementellen Variante weiter erhöhen.

Zum Vergleich der numerischen Ergebnisse der Varianzfortpflanzung werden die Varianten der UT und die lineare VKF näher betrachtet. Dabei wird die mittlere Koordinatenunsicherheit

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\text{spur}(\Sigma_{xx})}{3}} \quad (4.17)$$

herangezogen. Das Histogramm in Abbildung 4.5 (links) enthält die Differenzen zwischen den Varianten der UT.

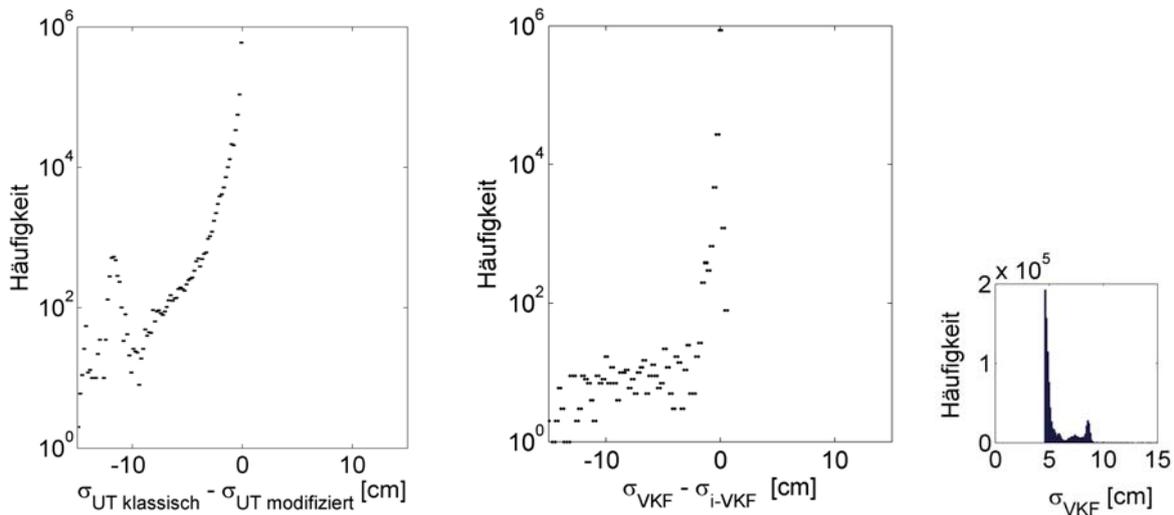


Abbildung 4.5: Differenz der mittleren Koordinatenunsicherheit berechnet in den Varianten des UT (links), Differenz der mittleren Koordinatenunsicherheit berechnet mittels klassischer VKF und i-VKF (mittig) und Verteilung der mittleren Koordinatenunsicherheit der ausgewerteten Szene (rechts)

Die weit überwiegende Mehrzahl der Differenzen liegt danach im Bereich unterhalb von 1 cm. Verglichen mit dem Gesamtniveau der mittleren Koordinatenunsicherheit (Abb. 4.5, rechts) von ca. 5 - 10 cm sind die Differenzen gering. Auffällig ist, dass alle Differenzen negativ sind, d. h. in der modifizierten Variante der UT wird die mittlere Koordinatenunsicherheit stets größer fortgepflanzt. Die Verteilungsfunktion im Beobachtungsraum wird danach durchgängig zu konservativ genähert. Dies zeigt, dass eine Approximation der Verteilungsfunktion durch eine geringere Anzahl von Sigma-Punkten für die Fortpflanzung von Varianzen zumindest für einzelne Beobachtungen zu Abweichungen führen kann.

Ein Vergleich der Varianten der linearen Varianzfortpflanzung veranschaulicht die Abbildung 4.5 (mittig) - hier sind die mittleren Koordinatenunsicherheiten mittels klassischer und inkrementeller Varianzfortpflanzung berechnet worden. Die Beträge der Differenzen liegen mit großer Mehrheit (99.87 %) in einem Bereich unterhalb von 1 cm. Einzelne wenige Differenzen liegen oberhalb des Gesamtniveaus existenter mittlerer Koordinatenunsicherheiten (ca. 10 cm, s. Abb. 4.5, rechts). Wird auf Basis einer Dichteverteilung aller mittleren Koordinaten-

unsicherheiten einer Szene (vgl. Abb. 4.5, rechts) eine Obergrenze für maximale Unsicherheiten angenommen, können diese einzelnen Punkte entsprechend gefiltert werden.

4.4.5. Visualisierung mittels stochastischer Punktwolke

Sind Unsicherheiten einzelner Punkte in Form von Kovarianzmatrizen quantifiziert, sind diese geeignet zu präsentieren. Vielfach werden einzelne eindimensionale Kenngrößen aus den Matrizen abgeleitet. Neben der mittleren Koordinatenunsicherheit (Gl. 4.17) sind alternativ auch Werkmeister'sche Punktfehler etc. denkbar, die jedoch zusätzlich die Berechnung der Determinante der Kofaktormatrix erfordern. Zur Visualisierung von Kovarianzmatrizen in Abhängigkeit von Punktlagen sind in der Geodäsie Konfidenz(hyper-)ellipsoide gebräuchlich. Zwar kennzeichnen sie Unsicherheiten separat in den Achsrichtungen des Zielraumes, für Massendaten aus eng beieinander liegenden Einzelpunkten erscheint diese Darstellungsform jedoch wenig übersichtlich.

Daher werden die Unsicherheiten hier durch eindimensionale, skalare Kenngrößen (wie z. B. nach Gl. 4.17) ausgedrückt, deren Beträge in den gescannten Punktwolken grau- bzw. farbcodiert werden. Dies führt zum Begriff der stochastischen Punktwolke. Sie erlaubt einen raschen Überblick über die Unsicherheitssituation der gescannten Szene.

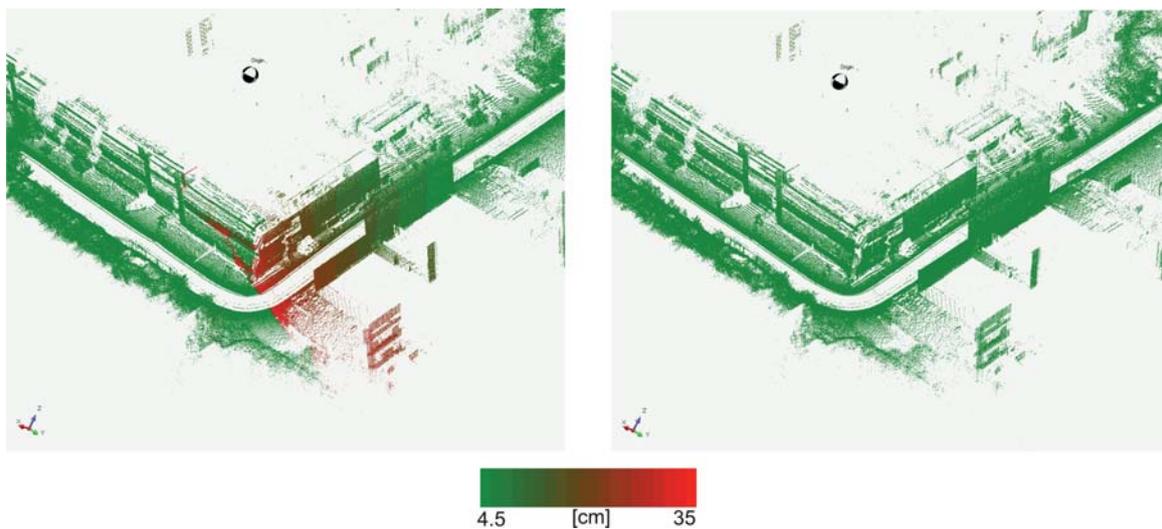


Abbildung 4.6: Farbcodierte mittlere Koordinatenunsicherheit $\bar{\sigma}$ von gescannten Punkten (s. Gl. 4.17) - dargestellt an einer Kurvenfahrt eines Mobile-Mapping-Systems [Campus TU-Darmstadt (Lichtwiese), Petersenstraße]
 Links: Auswirkungen einer simulierten Unterbrechung (30 s) von GNSS-Positionen (über die Zeit in eine Richtung gefiltert)
 Rechts: Unsicherheiten ohne längerfristige Unterbrechung (tatsächliche Situation)

Die Abbildung 4.6 zeigt beispielhaft die Kurvenfahrt eines Mobile-Mapping-Systems. Bei der Filterung der Referenzierung wurde eine Unterbrechung von 30 s simuliert (Abb. 4.6, links). Die Auswirkungen auf die gescannte Szene sind deutlich erkennbar: Die mittlere Koordinatenunsicherheit $\bar{\sigma}$ steigt hier bis zu Beträgen von 35 cm an. Innerhalb der Kurve sind wieder GNSS-Positionen verfügbar. Die mittlere Koordinatenunsicherheit verbessert sich demzufolge sprunghaft. Zum Vergleich zeigt die Abbildung 4.6 (rechts) die tatsächliche Situation ohne längerfristige Unterbrechungen verfügbarer GNSS-Positionen. Hier sind die Koordinatenunsicherheiten homogen verteilt.

Das Beispiel veranschaulicht, dass in stochastischen Punktwolken Auswirkungen auf die mittleren Koordinatenunsicherheiten sofort erkennbar werden. In der vergleichenden Darstellung in Abbildung 4.6 trägt vor-

nehmlich die Referenzierung zum Unsicherheitsbudget der gescannten Punkte bei. Angemerkt sei, dass alle im Beobachtungsvektor (Gl. 4.15) beteiligten Größen einen Beitrag liefern. Stochastische Punktwolken sind demnach auch auf einzelne statische, nicht georeferenzierte Punktwolken anwendbar, bei denen sich die resultierenden Unsicherheiten hauptsächlich aus den instrumentellen Unsicherheiten des verwendeten Scanners zusammensetzen.

Insgesamt bietet die Darstellung von Unsicherheitsinformationen für Massendaten die Möglichkeit, die geometrische Qualität einer Aufnahme nicht nur pauschal, sondern objektbezogen zu quantifizieren. Damit kann der Prozess der Aufnahme weiter optimiert werden: im statischen Fall, um bei gegebener Unsicherheitsanforderung die Anzahl der Aufstellungen zu minimieren; im kinematischen Fall, um vor allem den Einfluss nicht verfügbarer GNSS-Positionen auf das Scanergebnis durchgreifend erkennbar zu machen.

5. Kombinierte kinematische Georeferenzierung

5.1. Motivation

Der derzeitige Stand der Strategien zur räumlichen Zuordnung terrestrischer Laserscans wurde in Abschnitt 2.4.4 angegeben. Die Systeme unterscheiden sich sowohl in ihrem konzeptionellen Aufbau als auch in der Art der genutzten Sensoren. Die Abbildung 5.1 illustriert, welche Sensorkomponenten eingesetzt und jeweils zur Berechnung der Parameter verwendet werden.

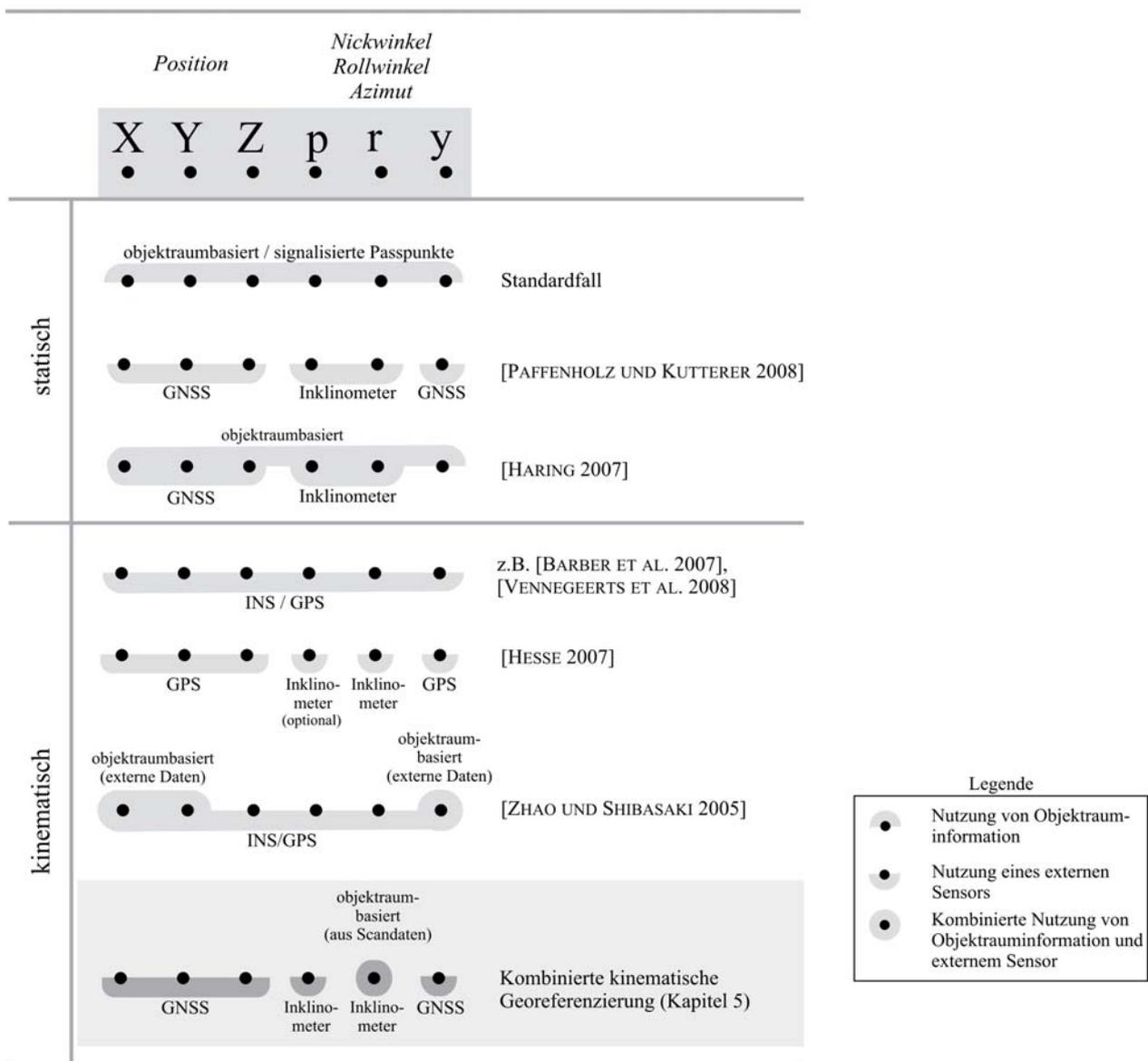


Abbildung 5.1: Varianten zur Berechnung der Parameter der Georeferenzierung für terrestrische Plattformen

Um die Ansätze vergleichen zu können, werden im Folgenden Kriterien definiert, anhand derer sich die Ansätze bewerten lassen. Die Diskussion motiviert zur Entwicklung der Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung, die anschließend detailliert vorgestellt wird.

Die untersuchten Kriterien lassen sich nach den Bereichen Universalität, Aufwand und Qualität klassifizieren. Anhand von sieben diesen Bereichen zugeordneten Merkmalen werden die Ansätze charakterisiert. Die Merkmale lauten:

Universalität - Die Anwendbarkeit des Systems ist abhängig von folgenden Voraussetzungen:

- *Objektraumstruktur*: Zur Referenzierung wird Objektrauminformation integriert, wobei an die Objektstruktur Anforderungen zur geometrischen Gestalt wie Ebenheit, Rundheit sowie ausreichende Reflexionseigenschaften etc. gestellt werden. Das Merkmal kennzeichnet, ob an die Objektraumstruktur Anforderungen gestellt und wie streng diese definiert werden.
- *GNSS-Verfügbarkeit*: Die Anbindung an ein erdfestes Bezugssystem erfordert im Allgemeinen eine Integration von GNSS-Beobachtungen. Dieses Merkmal beschreibt den Grad der Abhängigkeit von diesen Beobachtungen.
- *Aufnahmekonfiguration*: Um eine Umgebung umfassend abzubilden, ist im statischen Fall eine entsprechende Aufnahmekonfiguration der einzelnen Beobachtungsstandpunkte vorauszusetzen. Bei der kinematischen Aufnahme von einer bewegten Plattform bedeuten Anforderungen an das Aufnahmeszenario maximale Dynamiken, denen ein System auf einer bewegten Plattform ausgesetzt sein darf.

Aufwand - Die Herstellung des Systems bzw. die Durchführung der Messungen erfordert folgenden Einsatz:

- *Kostenaufwand*: Dies bezeichnet die Kosten, die mit der Anschaffung der referenzierenden Sensorkomponenten verbunden sind.
- *Zeitaufwand*: Je nach Strategie der Referenzierung ist die Dauer der örtlichen Erfassung einer Umgebung sehr unterschiedlich. Insgesamt sei angemerkt, dass die Ansätze zur Referenzierung auch bei ähnlicher Kosten-Zeit-Relation nicht beliebig substituierbar sind. So können teure, schnelle Verfahren nicht uneingeschränkt durch kostengünstige, langsame Verfahren ersetzt werden, wenn äußere Rahmenbedingungen nur eine maximale Zeitspanne für die Erfassung erlauben. Dies ist überwiegend der Fall, wenn von einer Straßenfläche die Umgebung ohne größere Verkehrsbehinderungen zu scannen ist.

Qualität - Die nachfolgend betrachteten Qualitätsmerkmale beschreiben geometrische Eigenschaften. Sie kennzeichnen ein Ergebnis und sie charakterisieren insbesondere auch den Auswerteprozess:

- *Unsicherheitsbasierte Evaluation*: Dieses Merkmal beschreibt, ob in den einzelnen Auswerteschritten Unsicherheiten berücksichtigt werden, ob Entscheidungen statistisch begründet sind oder ob Entscheidungen ausschließlich nach heuristischen Gesichtspunkten getroffen werden. Die unsicherheitsbasierte Evaluation gewährleistet damit, dass Beurteilungen nicht vorab für spezielle äußere Bedingungen festgelegt werden müssen, sondern im Rahmen der Auswertung abgegeben werden können.
- *Ergebnisqualität*: Dieses Merkmal gibt die geometrische Qualität referenzierter Scanmodelle an, wie sie sich aus der Folge aller beteiligten Prozesse aus Aufnahme und Referenzierung ergibt. Die Ergebnisqualität spiegelt also die geometrische Genauigkeit als auch die Dichte der gescannten Punkte wider.

Die Tabelle 5.1 fasst zusammen, wie die Verfahren bezüglich der Merkmale bewertet werden können. Aufwand auf die dargestellten Ansätze ergeben sich für die Kriterien folgende Einstufungen.

Grundsätzlich wird bei allen Mobile-Mapping-Systemen ein möglichst hoher Grad an Universalität angestrebt, d.h. die Systeme sollen möglichst unabhängig von den Rahmenbedingungen der Umgebung die Elemente der Georeferenzierung bestimmen können. Dies resultiert - mit Ausnahme der Kombination von INS/GNSS - in einer gegenseitigen Wechselwirkung zwischen der Abhängigkeit von verfügbaren GNSS-Signalen und den Anforderungen an die Objektraumscene. So steigt offensichtlich die Abhängigkeit von verfügbaren GNSS-Signalen, wenn keine Objektrauminformationen in die Auswertung integriert werden [HESSE 2007, PAFFENHOLZ und KUTTERER 2008]. Das auf dem ICP-Algorithmus basierende System

	<i>Statische (direkte) Georeferenzierung</i>		<i>Kinematische Georeferenzierung (on-the-fly)</i>		
	[PAFFENHOLZ und KUTTERER 2008]	CityGRID [HARING 2007]	INS/GNSS (z.B. [BARBER ET AL. 2007])	VLMS [ZHAO und SHIBASAKI 2005]	RAMSYS [HESSE 2007]
Universalität					
<i>Objektraumstruktur</i>	keine	hoch	keine	hoch	keine
<i>GNSS-Verfügbarkeit</i>	absolut	bedingt	bedingt	bedingt	absolut
<i>Aufnahmekonfiguration</i>	hoch	hoch	gering	hoch	hoch
Aufwand					
<i>Kostenaufwand</i>	gering	gering	sehr hoch	hoch	gering
<i>Zeitaufwand</i>	hoch	hoch	gering	mittel	gering
Qualität					
<i>Unsicherheitsbasierte Evaluation</i>	ja ¹	bedingt	ja ¹	bedingt	ja ¹
<i>Ergebnisqualität</i>	hoch	hoch	hoch	hoch	mittel

¹ ausschließlich bezogen auf referenzierende Parameter

Tabelle 5.1.: Beurteilung der Verfahren der Georeferenzierung

CityGRID [HARING 2007] kann Abhängigkeiten von GNSS-Beobachtungen zwar verringern, es setzt jedoch ausreichend korrespondierende Flächenelemente zwischen benachbarten Scans voraus. Dies ist gerade bei langgestreckten, dicht bebauten Straßenzügen nur mit eng benachbarten Standpunkten erreichbar. Werden Objektinformationen nicht im Erfassungsprozess, sondern extern aus digitalen Oberflächenmodellen (DSM) gewonnen [ZHAO und SHIBASAKI 2005], verringert auch dies die Abhängigkeit vom GNSS. Andererseits steigen gleichfalls die Anforderungen an die verschiedenen Abbildungen. In den Datensätzen, die zeitlich, räumlich und verfahrenstechnisch unterschiedlichen Ursprungs sind, sind dazu korrespondierende Elemente zu finden. [ZHAO und SHIBASAKI 2005] verwenden dazu zwar wenige, jedoch manuell bestimmte Passpunkte.

Alle Ansätze - wiederum mit Ausnahme der Georeferenzierung mittels INS/GNSS - stellen hohe Anforderungen an die Aufnahmekonfiguration. So wird bei den statischen Ansätzen durchweg davon ausgegangen, dass das Aufnahmezentrum des Scanners ruhend ist. Dies stellt vor allem dann eine Herausforderung dar, wenn der Scanner auf ein Fahrzeug montiert wird, um so zügig den Standpunkt wechseln zu können [HARING 2007]. Bei kinematischen Systemen, bei denen keinerlei Annahmen zum Bewegungsverhalten einer Plattform vorausgesetzt werden können, sind die Elemente der Georeferenzierung auch bei hochdynamischer Fahrweise permanent zu registrieren. [HESSE 2007] verwendet zur Bestimmung der Neigung in den Richtungen p und r ausschließlich ein Inklinometer. Die Neigungssensoren unterscheiden sich in der Art, wie Auslenkungen von Körpern physikalisch registriert werden [SCHLEMMER 1996]. Für einen robusten Einsatz eignen sich kapazitive Neigungssensoren mit Flüssigkeitshorizont, weil keine starren Körper bewegt werden. Die Trägheit beim Ausgleich des Flüssigkeitsstandes zwischen den Kammern schränkt jedoch die Nutzbarkeit bei einer höher dynamischen Fahrweise ein.

Zur Bewertung des materiellen Aufwands werden hier die Anschaffungskosten für die referenzierenden Sensorkomponenten betrachtet. Werden ausschließlich externe Sensoren wie geodätische GNSS-Empfänger und Neigungssensoren genutzt, sind die Anschaffungskosten im Verhältnis zu den Kosten eines terrestrischen Laserscanners relativ gering. In ähnlichem Verhältnis stehen auch Kosten für synchronisierende Einheiten wie Echtzeitrechner usw. Werden hingegen inertielle Messeinheiten integriert, steigen die Systemkosten erheblich [SCHWARZ und EL-SHEIMY 2007]. [ZHAO und SHIBASAKI 2005] nutzen ebenfalls eine INS/GNSS-Kombination, jedoch können die Anforderungen an die inertielle Einheit geringer definiert werden, weil hier Informationen aus dem Objektraum einbezogen werden. Andererseits sind in ihrem Fall prinzipiell zusätzlich externe Datensätze zu erwerben.

Der zeitliche Aufwand - bezogen auf den Erfassungsprozess - ist für die verschiedenen Ansätze sehr unterschiedlich. Sollen lang gestreckte Umgebungen wie Straßenzüge erfasst werden, ist dies für die polare statische Aufnahmekonfiguration ungünstig, denn zur Aufnahme derartiger Szenen ist eine Vielzahl einzelner Standpunkte erforderlich. Zum messtechnischen zeitlichen Aufwand kommt in diesem Fall vor allem ein logistischer hinzu. [HESSE 2007] vergleicht diesen Aufwand mit dem einer kinematischen Aufnahme. Auch wenn überdies noch höhere rechentechnisch bedingte Auswertezeiten berücksichtigt werden, kann eine kinematische Aufnahme letztlich in einem Bruchteil der Zeit abgeschlossen werden. In einem kalkulierten Beispiel wird das zeitliche Verhältnis mit ca. 1/5 bzw. 1/10 zugunsten der kinematischen Aufnahme quantifiziert.

Einen nicht zu unterschätzenden Anteil am zeitlichen Aufwand nimmt im statischen Fall die Planung ein. Dies gilt besonders dann, wenn sich die Auswertung auf die Geometrie des Objektraums stützt. So ist bei allen Verfahren zu gewährleisten, dass eine ausreichende Menge korrespondierender Elemente in den Scans vorhanden ist. Um dies sicherzustellen, ist eine dem Objekt angepasste ausreichende Standpunktdichte zu wählen. Resultierende Auswirkungen auf die Referenzierung zeigt [HARING 2007] anhand einiger Beispiele.

Um ein Unsicherheitsniveau von Zielgrößen realitätsnah abschätzen zu können, sind diese begleitend in den Auswerteschritten zu integrieren. Bei hochauflösenden Erfassungssystemen wird dies vielfach vernachlässigt. Im Wesentlichen sind dafür zwei Gründe verantwortlich: Zum einen erfordert die Menge der Daten und Einflussfaktoren angepasste Auswertestrategien, um überhaupt Unsicherheitsangaben in akzeptabler Zeit prozessieren zu können. Zum anderen liefern viele Sensorkomponenten Daten, die einen hohen Prozessierungsgrad erreicht haben und für deren Lösungen teilweise keine Unsicherheitsangaben verfügbar sind. Typische Beispiele hierfür sind Positionslösungen von GNSS-Sensoren oder bereits integrierte Beschleunigungsmessungen inertialer Messeinheiten. Die georeferenzierenden Systeme ohne Integration von Objektrauminformation liefern zumindest für die Parameter der Georeferenzierung die Möglichkeit, Unsicherheiten abzuschätzen, sofern ein Bewegungsverhalten angenommen und in kinematischen Filtern modelliert wird. Bei Systemen, die Objektrauminformationen zur Referenzierung nutzen, sind die Unsicherheiten vielfach nur bedingt interpretierbar. So gewichtet [HARING 2007] zwar einzelne Standpunkte in der Ausgleichung, die darauf basierende Korrespondenz zwischen Flächenelementen aus den Scans benachbarter Standpunkte wird jedoch nicht statistisch bewertet. Gleiches gilt für das System VLMS [ZHAO und SHIBASAKI 2005], wobei dort zudem Korrespondenzen zwischen den verschiedenen Datensätzen wie Scans und DSM zu bewerten wären.

Bezüglich der Ergebnisqualität unterscheiden sich die einzelnen Systeme wie folgt. In allen Verfahren kann die Punktdichte durch eine entsprechende Aufnahmekonfiguration variiert werden. Entscheidend ist hier, mit welcher Geschwindigkeit sich die Beobachtungsrichtung ändert. Im statischen Fall ist die Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels und um die Stehachse prägend, im kinematischen Fall mit profilmessendem Scanner die vertikale Rotationsgeschwindigkeit der Umlenkeinheit und die Fahrgeschwindigkeit der Plattform. Ist die Fahrtgeschwindigkeit frei wählbar, ist dies für eine kinematische Aufnahme langgestreckter Umgebungen vorteilhaft, um so eine gleichmäßige Verteilung der Punkte zu erreichen.

Hinsichtlich der Unsicherheiten geben [PAFFENHOLZ und KUTTERER 2008] für ihr System im Entfernungsbereich von 20 m Abweichungen in der Größenordnung von wenigen cm an. Vergleichbare Größenordnungen lassen sich - verfügbare GNSS-Beobachtungen vorausgesetzt - auch mit dem System CityGRID [HARING 2007] erreichen. Bei kinematischen Systemen sind bei Nutzung inertialer Einheiten ähnliche Abweichungen im Bereich von wenigen cm erreichbar [BARBER et al. 2008, VENNEGEERTS et al. 2008]. Bei ausschließlicher Nutzung von GNSS spezifiziert [HESSE 2007] das System im dm-Bereich.

5.2. Methodik - Überblick

Auf Grundlage der beschriebenen Kriterien werden nachstehende Anforderungen an die zu entwickelnde Methode der Georeferenzierung gestellt. Danach soll die referenzierte Punktwolke eine hohe Ergebnisqualität erreichen, d. h. resultierende Unsicherheiten sollen im sub-dm Bereichen liegen. Zudem soll die Prozessierung unsicherheitsbasiert erfolgen. Dies bezieht sich sowohl auf die kinematische Filterung der referenzierenden

Parameter als auch auf die Prozessierung der Scanszene. Der Aufwand soll - materiell wie zeitlich - gering sein. Für die Referenzierung bedeutet dies in erster Linie, dass keine kostspieligen inertialen Messeinheiten integriert werden. Außerdem sollen nur geringe Anforderungen an die Aufnahmekonfiguration gestellt werden. Im kinematischen Fall sollen beim Scannen von einer bewegten Plattform also auch höhere Dynamiken, wie sie bei Fahrzeugen üblich sind, durch das System erfasst und abgebildet werden können. Da die Positionsangaben ausschließlich aus den GNSS-Positionen abgeleitet werden, ist deren Verfügbarkeit Voraussetzung. Die Referenzierung soll mithilfe der gescannten Objektraumscene gestützt werden. Dies bedingt zwar Abhängigkeiten von der Objektstruktur, die Erwartungen daran sollen jedoch gering definiert werden.

Die Anforderungen motivieren zur Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung, deren Ablauf die Übersicht in Abbildung 5.2 grafisch veranschaulicht.

Eine Umgebung werde räumlich von einer bewegten Plattform aus erfasst, auf der ein terrestrischer Laserscanner montiert ist. Als Aufnahmemodus sei der 2D-Profilmodus gewählt (s. Abb. 2.2, b). Üblicherweise werden aufgrund fehlender Redundanzen Profilsfans nicht für registrierende bzw. referenzierende Aufgaben eingesetzt. Stattdessen werden Navigationssensoren verwendet, die die Transformationsparameter separat und ausschließlich liefern. Diese strikte Trennung zwischen referenzierenden und erfassenden Einheiten wird hier auch für den bewegten Fall überwunden.

Szenen, die auf Basis von Profilsfans erfasst werden, enthalten bei einmaliger Fahrt und einer ausschließlich vertikalen Rotation der Umlenkeinheit grundsätzlich keine Redundanz. Für einen lokalen Bereich begrenzter Ausprägung wird jedoch eine Erwartung in der Form formuliert, dass stückweise ebene Flächen in der Szene auftreten. Im fahrenden, bewegten Einsatz werden diese dann in einzelnen Profilszenen als Liniensegmente abgebildet. Zwischen (mehreren) benachbarten Profilen werden diese Liniensegmente anschließend für die Aufgabe der Referenzierung genutzt.

Zunächst sind in einzelnen Profilen die Liniensegmente zu finden. Wie diese schnell deklariert werden können, ist Inhalt des Abschnittes 5.3. Wegweisend für die Prozessierung ist hier, dass die Liniensegmente effizient gefunden werden können. Außerdem soll die Auswertung unsicherheitsbasiert erfolgen, d. h. Liniensegmente sollen auf statistische Entscheidungen beruhend erkannt werden.

Die Parameter der Georeferenzierung sollen sich im hohen Maß unabhängig von der Objektszene ermitteln lassen. Dieser Forderung wird nachgekommen, in dem nicht die absolute Ausrichtung der Linien betrachtet wird. So soll keine Ebenheit von Flächen gleicher Höhe oder ein lotrechter Verlauf von Wänden vorausgesetzt werden. Daher werden ausschließlich Änderungen der Rotation von korrespondierenden Liniensegmenten benachbarter Profile betrachtet. Für eine fahrende Plattform können diese als Rollwinkelgeschwindigkeit interpretiert werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sich Neigungsänderungen auch in den Scanprofilen abbilden. Grundsätzlich muss dies nicht zwingend der Fall sein: Angenommen sei eine Kreisfahrt auf einer geneigten ebenen Fläche. In diesem Fall kommt es zu Neigungsänderungen, die - abgesehen von höherfrequenten Anteilen - nicht aus dem Scanprofilen erkannt werden können. Für die ebenen Flächenelemente, die durch die Scans genutzt werden, wird also davon ausgegangen, dass sie nicht überwiegend parallel zur Ausrichtung der Plattform verlaufen.

Wie die Rollgeschwindigkeiten aus den Liniensegmenten geschätzt werden können, wird in Abschnitt 5.4 näher erläutert. Schließlich sind die Rollwinkelgeschwindigkeiten mit absoluten Rollwinkeln zu kombinieren. Die Rollwinkel werden - in einer erheblich niedrigeren Frequenz als die Profilsfans - durch Inclinometer beobachtet. Die anschließende Kombination mit dem Ergebnis gefilterter Rollwinkel schildert der Abschnitt 5.5.

5.3. Prozessierung von Profilsfans

Zur Extraktion geometrischer Merkmale in Profilsfans wie Knickpunkte, Linien, Kreise etc. sind eine Reihe von Ansätzen etabliert. Die so extrahierten Primitive werden zur Erfassung einer statischen Umgebung oder

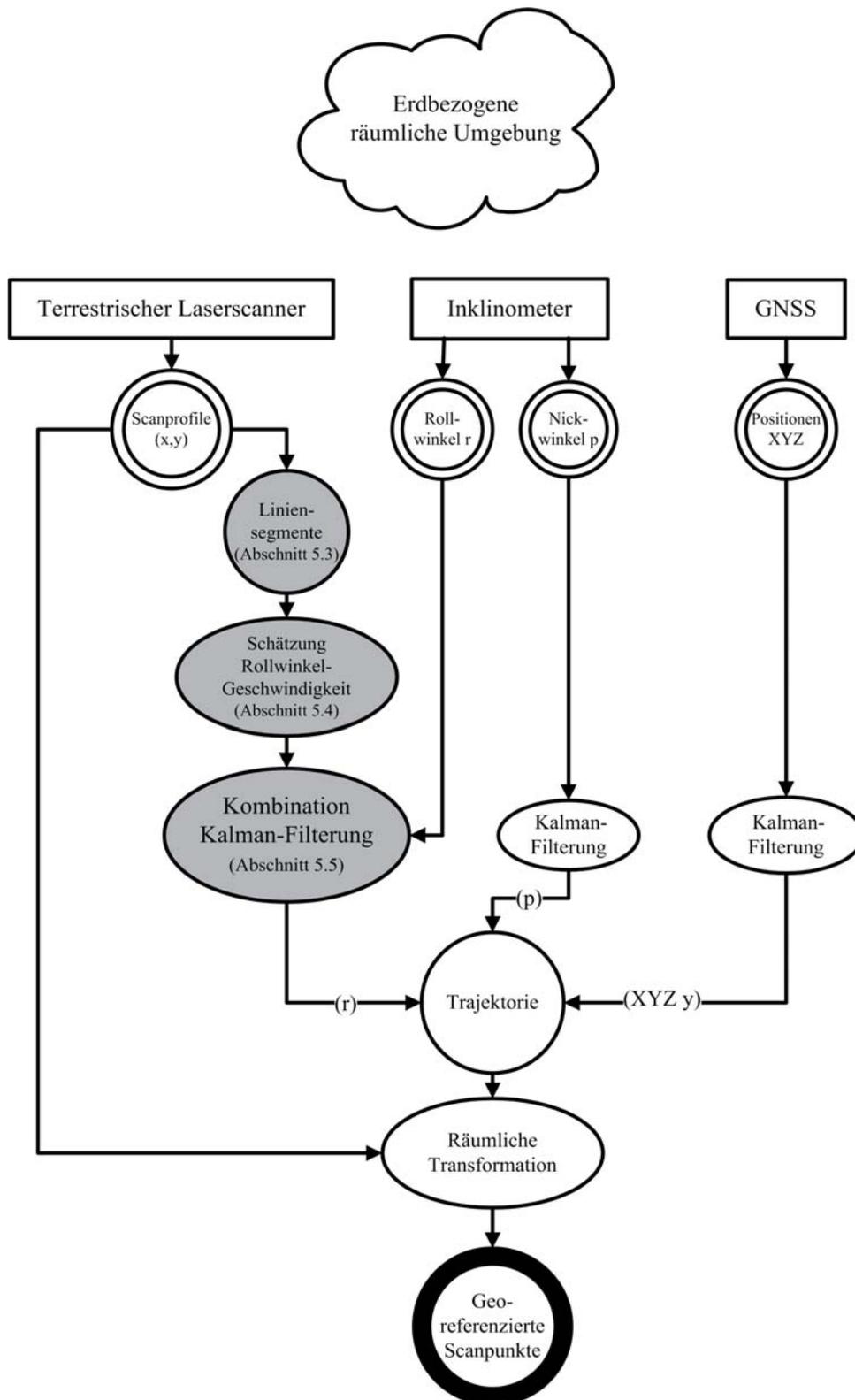


Abbildung 5.2: Übersicht zur kombinierten kinematischen Georeferenzierung

für die Navigation, z. B. zur Vermeidung von Kollisionen eingesetzt. Die Verfahren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Entweder werden Cluster-Algorithmen genutzt, die auf der Basis der Hough-Transformation [DUDA und HART 1973] kollineare Punkte suchen [ARRAS und SIEGWART 1997, CASTRO et al. 2004] oder es werden direkt in den Profilschans Untermengen gesucht, die jeweils eine Linie definieren.

Die Suche nach Punktmengen einer Linie mithilfe der Hough-Transformation hat den Vorteil, dass vorab keine Annahmen zum Rauschniveau der Punkte getroffen werden müssen. Zudem ist die Detektion der Parameter im transformierten Hough-Raum robust gegen Ausreißer. Der große Nachteil hingegen liegt darin, dass der Rechenaufwand proportional mit der Anzahl der Scanpunkte und der Größe des Untersuchungsrasters steigt [MARTINEZ-CANTIN et al. 2006]. Dabei ist die Rastergröße (um damit die Größe der sog. Akkumulatoren) nicht zu klein zu wählen, damit die gesuchten Parameter im Hough-Raum eindeutig erkennbar sind.

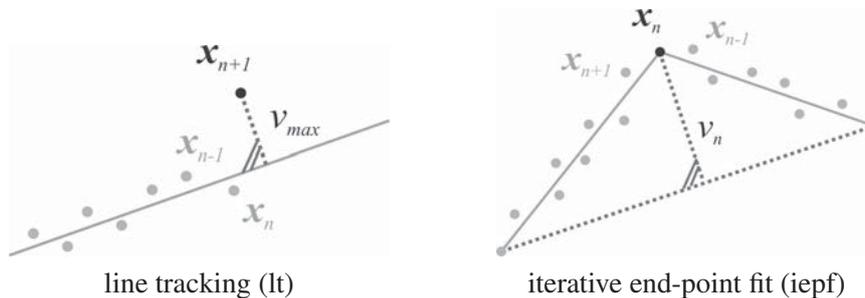


Abbildung 5.3: Algorithmen zur Liniextraktion [BORGES und ALDON 2004]

Bei den direkten Verfahren [SIADAT et al. 1997] lassen sich schlicht Linienverläufe verfolgen (*line tracking*), wobei zusätzliche Punkte x_{n+1} zu einer Linie nur bis zu einem maximalen orthogonalen Abstand v_{max} hinzugenommen werden (s. Abb. 5.3). Das Verfahren der Linienverfolgung ermöglicht aufgrund des einfachen Kriteriums eine schnelle Entscheidung zur Zugehörigkeit von Punkten. Die Schwierigkeit liegt in der Definition dieses Kriteriums, das die Unsicherheit der Linienparameter, der Punktpositionen und der Oberflächenbeschaffenheit der Objektszene zu berücksichtigen hat. Die Einführung konstanter Schwellwerte lassen daher nur eine begrenzte Repräsentativität der so ermittelten Liniensegmente erwarten.

Alternativ können Anfangs- und Endpunkte von Linien auch iterativ ermittelt werden (*iterative end-point fit*) [SIADAT et al. 1997]. Den prinziellen Ablauf nutzen bereits [RAMER 1972, DOUGLAS und PEUCKER 1973] für die kartografische Kurvenglättung und Generalisierung vorhandener Linien. Im rekursiven Ansatz wird eine Punktmenge so lange in Untermengen geteilt, bis sie den Ansprüchen an die Definition einer Linie genügen. Als Ansprüche können dabei eine Mindestlänge der Linie, eine Mindestanzahl von Punkten oder maximale orthogonale Abstände festgelegt werden [MENDES und NUNES 2004, XAVIER et al. 2005].

Im Folgenden wird aufgrund des geringen Rechenaufwands und einer guten Leistungsfähigkeit [BORGES und ALDON 2004] ein modifiziertes rekursives Verfahren zur Prozessierung der Profile integriert. Insgesamt vollzieht sich die Liniendifikation in drei Schritten (Abb. 5.4).

Zunächst werden zur Indizierung Punktmengen gesucht, deren Linien Kandidaten für ein Liniensegment darstellen (Abschnitt 5.3.1). Ziel der Indizierung ist es, die Punktmenge eines Profils schnell in Untermengen zu teilen, aus denen jeweils ein Liniensegment berechnet werden kann. In einem zweiten Schritt werden die Punktmengen gefiltert und einem Verteilungstest unterzogen (Abschnitt 5.3.2). Benachbarte, ähnliche Liniensegmente werden abschließend zu gemeinsamen Liniensegmenten verschmolzen (Abschnitt 5.3.3). Die Unterteilung in die nachfolgend dargestellten Schritte ermöglicht eine zügige Auswertung der Profile, da - wie anschließend erläutert - die Indizierung, die Filterung und die Verschmelzung getrennt betrachtet werden.

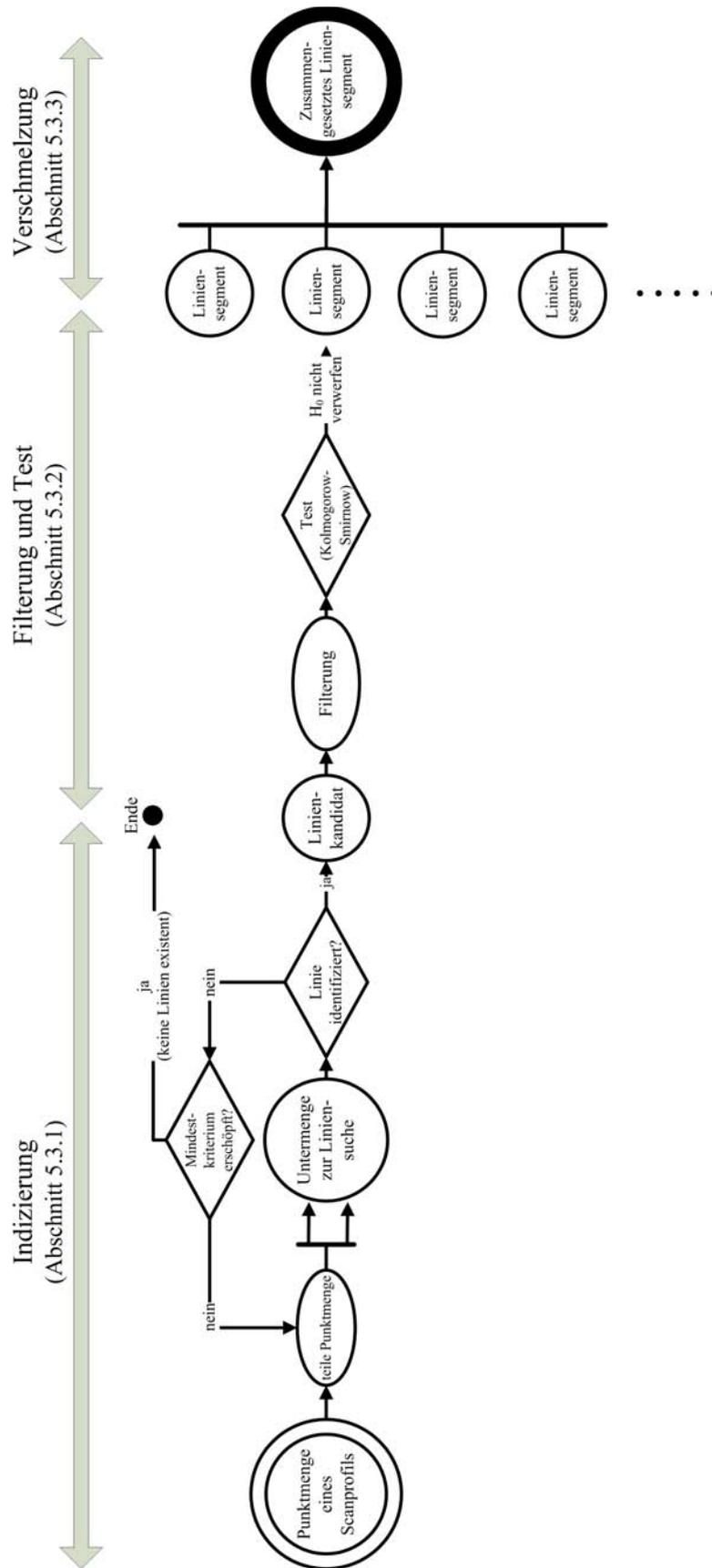


Abbildung 5.4: Übersicht zur Linienidentifikation aus Profilschans

Zur Notation werden nachfolgend Linien ℓ in den Profilsfans mittels

$$n_x x + n_y y + d = 0, \quad (5.1)$$

also in der Hesse-Normal-Form mit

$$\ell = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ d \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

angegeben.

5.3.1. Indizierung von Linienkandidaten

Alle Punkte eines Profils sind entsprechend der Rotationsrichtung des Umlenkspiegels des Scanners sortiert, so dass Liniensegmente stets aus benachbarten Punkten gebildet werden können. Durch diese Eigenschaft vertreten die Indizes der Punkte ihre Reihenfolge und ermöglichen es, direkt Beziehungen zwischen benachbarten Punkten herzustellen. Zudem sind im Profil nur diejenigen Punkte enthalten, die im Ortsraum eine Mindestenergie des Laserlichtes reflektieren. Nicht reflektierende Bereiche müssen somit nicht untersucht werden. Der Algorithmus 2 zeigt den Verfahrensablauf, wie Linienkandidaten indiziert werden können.

Algorithmus 2 Rekursive Indizierung von Linienkandidaten

Require: V

```

1: Proc LineIdentRec( $V$ )
2: if  $\|\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_n\| > d_{min}$  mit  $V \in \{\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n\}$  then
3:   erzeuge zufällige Menge  $U \subset V$  mit  $k$  Elementen
4:   berechne  $\sigma_v$  aus orthogonalen Abständen  $v_i$  zu einer ausgleichenden Gerade
5:   if  $\sigma_v < \text{maximale Rauheit } r_{max}$  then
6:      $\ell_c \leftarrow V$  deklariere  $V$  als Linienkandidat
7:   else
8:     teile  $V$  in Untermengen  $W_1$  und  $W_2$  mit  $W_1 \cup W_2 = V$  und  $W_1 \cap W_2 = \emptyset$ 
9:     LineIdentRec( $W_1$ )
10:    LineIdentRec( $W_2$ )
11:   end if
12: end if
return  $\ell_c$ 

```

Aus einer Punktmenge eines Profils $V \in \{\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n\}$ aus n Punkten wird eine zufällige Menge U von k Punkten erzeugt. Für diese Teilmenge werden jetzt die orthogonalen Abstände v_i zu einer ausgleichenden Gerade bestimmt. Liegt die Standardabweichung σ_v dieser Abstände unterhalb eines Schwellwertes r_{max} , wird das Profilssegment als Linienkandidat angesehen. Es ist zu betonen, dass der Einfluss des Wertes r_{max} hier nur einen vorläufigen Charakter hat, da sowohl irrtümlich erkannte als auch irrtümlich getrennte Liniensegmente nachträglich korrigiert werden können. Liegt die Standardabweichung σ_v oberhalb von r_{max} , wird die Punktmenge vorläufig in die Untermengen W_1 und W_2 geteilt. Für beide Untermengen wird die Funktion wiederum rekursiv aufgerufen. Abbruchkriterium ist ein Mindestabstand d_{min} zwischen den Endpunkten der Profilssegmente.

Die Konvergenz des Verfahrens ist abhängig von der Anzahl der Punkte pro Profil und von der Struktur der Objektszene. Die Auswahl einer zufälligen Untermenge skaliert den Aufwand, wodurch auch hochauflösende Profilsfans schnell zu prozessieren sind. Wird durch die zufällige Auswahl eine Linie zu Unrecht indiziert, kann dies nachträglich erkannt werden (Abschnitt 5.3.2). Im anderen Fall - also bei einer nicht erkannten Linie - führt dies zu einer weiteren Teilung der Punktmenge. Derartig zusammenhängende Bereiche werden daher nachträglich wieder zusammengefügt (Abschnitt 5.3.3).

5.3.2. Filterung und Test

Sind Linienkandidaten in einer Punktmenge gefunden, werden sie in zwei Stufen als Liniensegmente deklariert. Zunächst werden die Linien gefiltert, um einzelne Ausreißer zu entfernen. Die Zugehörigkeit zu einer definierten Oberfläche (Inzidenz) wird wie folgt festgelegt. Zunächst werden alle n Punkte x_i auf ihren Schwerpunkt bezogen ($\Delta x_i = x_i - \bar{x}$) mit $\dim \Delta x = n \times 2$. Die Eigenwertzerlegung der reellen symmetrischen Matrix

$$\Delta x^T \Delta x = M \Lambda M^T \quad (5.3)$$

liefert die Richtung der Hauptachsen des Systems. Mit den 1×2 Eigenvektoren m_{max} des größten Eigenwertes λ_{max} und m_{min} des kleinsten Eigenwertes λ_{min} können alle Punkte in Richtung dieser Achsen transformiert werden

$$u_i = \Delta x_i m_{max}^T \quad (5.4)$$

$$v_i = \Delta x_i m_{min}^T. \quad (5.5)$$

Unter der Annahme, dass die orthogonalen Abstände zur Linie v normalverteilt sind mit $v \sim N(0, \sigma_v^2)$, gilt

$$P(|v| \leq z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_v) = 1 - \alpha \quad (5.6)$$

mit dem Argument der Verteilungsfunktion $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ und dem Signifikanzniveau α (bei einem Signifikanzniveau von 5 % entspricht dies der 2- σ -Regel, z.B. [GHILANI und WOLF 2006]). Somit kann überprüft werden, ob einzelne Punkte einen großen orthogonalen Abstand zur Richtung des größten Eigenwertes aufweisen.

Bilden mehrere Punktgruppen einen Linienkandidaten, können diese Punkte auch innerhalb des Konfidenzbereiches liegen, wenn ihre Verteilung in Richtung des größten Eigenwertes nicht einer für Geradenabschnitte zu erwartenden Verteilung entspricht. Durch die Abbildung 5.5 wird diese Situation deutlich. Sie tritt auf, falls verdeckte Bereiche wie Stufen erfasst werden.

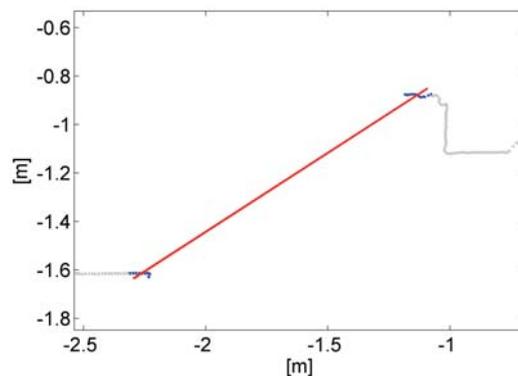


Abbildung 5.5: Identifizierter Geradenabschnitt (rot) in verdeckt gescannten Bereichen wie Stufen

In der Richtung des größten Eigenwertes (u_i) werden die Punkte daher einem Test unterzogen. Dieser basiert auf dem Anpassungstest für Wahrscheinlichkeitsverteilungen nach Kolmogorow-Smirnow (z. B. [BOSCH 1998, HARTUNG 2005]). Als Zufallsgröße wird hier die Koordinate eines Scanpunktes in Richtung des größten Eigenwertes u_i angesehen und quasi-stochastisch behandelt. Ihre (hypothetische) Verteilung wird durch die polare Aufnahmemethode des Laserscanners charakterisiert und ist abhängig von der Entfernung und Neigung eines Liniensegments. Um die Dichtefunktion dieser Verteilung festzulegen, werden zunächst die Anfangs- und Endpunkte (Abb. 5.6) auf eine ausgleichende Gerade projiziert (x_A, x_E). Der Abstand u in

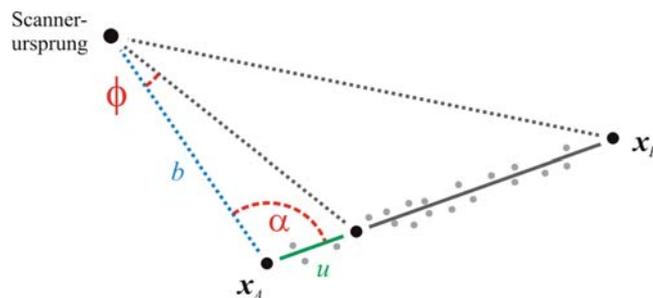


Abbildung 5.6: Numerische Festlegung der Verteilungsfunktion in Abhängigkeit von Start- und Endpunkt eines Geradensegmentes

Richtung der Geraden ergibt sich aus

$$\frac{u}{\sin \phi} = \frac{b}{\sin(\pi - \alpha - \phi)} \quad (5.7)$$

beziehungsweise

$$u = \frac{b \cdot \sin \phi}{\sin(\alpha + \phi)} \quad (5.8)$$

und ist damit abhängig von der Ausrichtung der Geraden α und dem Abstand b zum Anfangspunkt. Die zugehörige Verteilungsfunktion lautet im kontinuierlichen Fall

$$F(u) = \int_{-\infty}^u f(\tau) d\tau. \quad (5.9)$$

Für den hypothetischen Fall werden die Abstände u^* hier entsprechend der vertikalen Auflösung des Scanners für diskrete und n gleichverteilte Abtastwinkel ϕ_k bestimmt (entsprechend Gl. 5.8). Die zugehörige hypothetische Verteilungsfunktion lautet dann

$$F_0(u_k^*) = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta u_i^*}{\sum_{j=1}^n \Delta u_j^*}. \quad (5.10)$$

Die empirische Verteilungsfunktion $S(u_k)$ ergibt sich aus der Verteilung der tatsächlichen Punkte im System einer Geraden (u, v) in Richtung des größten Eigenwertes

$$S(u_k) = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta u_i}{\sum_{j=1}^n \Delta u_j}. \quad (5.11)$$

Die Hypothese

$$H_0 : F_0(u_k^*) = S(u_k) \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (5.12)$$

kann jetzt mithilfe der Testgröße

$$D_n = \sup_{u_k} |F_0(u_k^*) - S(u_k)| \quad (5.13)$$

überprüft werden ($D_{max} = 1.36/\sqrt{n}$ bei einem Signifikanzniveau von 5 %). Der hypothetische und der empirische Verlauf der Verteilungen (zum Scanbeispiel aus Abb. 5.5) ist der Abbildung 5.7 zu entnehmen.

Sind die Punktmengen gefiltert und getestet, können die Linienparameter geschätzt werden. Alle Punkte werden dabei als unkorreliert und zudem gleichgewichtet betrachtet. Dies ermöglicht eine vereinfachte Berechnung der

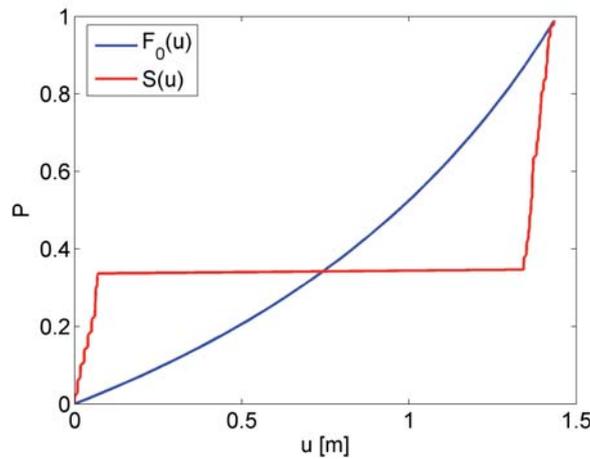


Abbildung 5.7: Hypothetische und empirische Verteilungsfunktionen (zum Scanbeispiel aus Abb. 5.5) für den Anpassungstest nach Kolmogorow-Smirnow

Linienparameter und deren Varianzen. Nach Gleichung 5.3 entspricht der Eigenvektor \mathbf{m}_{min} des kleinsten Eigenwertes λ_{min} dem gesuchten 1×2 Normalenvektor $\mathbf{n} = [n_x, n_y]$ der Linie. Für k Punkte einer Linie lautet der Abstandspareter

$$d = \frac{1}{k} \mathbf{1} \Delta \mathbf{x} \cdot \mathbf{n}^T \quad (5.14)$$

mit dem Vektor $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]$. Der Varianzfaktor beträgt ([DRIXLER 1993])

$$\sigma_0^2 = \frac{\lambda_{min}}{k-2}, \quad (5.15)$$

und skaliert die zugehörigen Kofaktoren. Sie betragen für die Normalenvektoren

$$\mathbf{Q}_{nn} = \frac{1}{\lambda_{max}} \mathbf{m}_{max}^T \mathbf{m}_{max} \quad (5.16)$$

bzw. für den Abstandspareter

$$q_{dd} = \frac{1}{k^2} \mathbf{1} \Delta \mathbf{x} \mathbf{Q}_{nn} \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{1}^T. \quad (5.17)$$

Neben den Linienparametern sind damit auch deren Varianzen bekannt. Sie werden verwendet, um anschließend benachbarte Linien verschmelzen zu können.

5.3.3. Verschmelzung von Liniensegmenten

Die Länge von Liniensegmenten wird durch Unterteilung der Punktmengen vorgegeben. Diese werden nicht deterministisch, sondern auf der Basis zufällig ausgewählter Punkte identifiziert. Dies kann dazu führen, dass Linienkandidaten zunächst getrennt ausgewertet werden, obwohl sie örtlich eine Einheit bilden. Da die Aufnahme des Profils sequentiell polar erfolgt, sind zusammengehörige Linienkandidaten stets benachbart. Ob benachbarte Linienkandidaten ein gemeinsames Linienelement bilden, wird anhand eines Kongruenztests festgestellt (z. B. [WELSCH et al. 2000]).

Für den Vergleich zweier benachbarter Linien ist vorab zu gewährleisten, dass die Erwartungswerte der Varianzfaktoren beider Linienparameter identisch sind. Anhand eines Tests wird untersucht, ob die empirische Varianz s_0^2 der angenommenen Varianz σ_0^2 entspricht. Die Erwartungstreue

$$E(s_0^2) = \sigma_0^2 \mid H_0 \quad (5.18)$$

drückt sich aus in der Nullhypothese H_0 . Dies vorausgesetzt, kann die Identität zweier Linienparameter x_1 und x_2 analog dem Vergleich zweier Einzelepochen mithilfe des linearen Vergleichs $d = x_1 - x_2$ überprüft werden. Bei Linienpaaren lautet die Kofaktormatrix der Differenz zweier benachbarter unkorrelierter Linien

$$Q_{dd} = Q_{x_1x_1} + Q_{x_2x_2} \quad (5.19)$$

womit dann die Testgröße

$$R = d^T Q_{dd}^{-1} d \quad (5.20)$$

festgelegt werden kann. Im Falle eines Vergleichs mit der theoretischen Varianz σ_0^2 unterliegt in der Nullhypothese

$$\frac{R}{\sigma_0^2} \sim \chi_{2,1-\alpha}^2 \mid H_0 \quad (5.21)$$

der χ_2^2 -Verteilung.

Das Ergebnis einer Verschmelzung von Liniensegmenten zeigt die Abbildung 5.8.

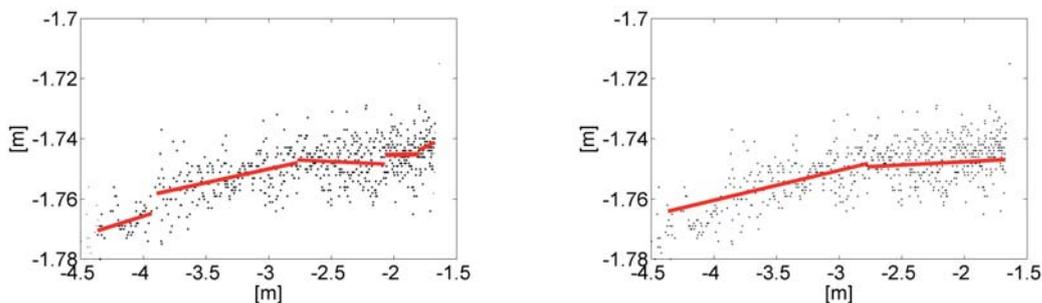


Abbildung 5.8: Vergleich vor (links) und nach (rechts) der Zusammenführung benachbarter Liniensegmente (in vertikaler Achsrichtung stark überhöht gezeichnet)

5.4. Schätzung der Rollwinkelgeschwindigkeit

Auf Basis der identifizierten Liniensegmente sollen nun Rollwinkelgeschwindigkeiten abgeleitet werden. Als Erwartung an die Objektszene wird davon ausgegangen, dass stückweise ebene Flächen im gescannten Raum vorhanden sind. Bei der Aufnahme von einer fahrbaren Plattform bilden sich diese Bereiche sowohl in Fahrtrichtung als auch quer dazu in den Profilszenen ab. Quer zur Fahrtrichtung zeigen sich diese in den Profilen zum Zeitpunkt t als einzelne Liniensegmente $\ell_{(i)}^{(t)}$. Um die stückweise ebenen Flächen auch in Fahrtrichtung zu nutzen, sind für Liniensegmente $\ell_{(i)}^{(t)}$ zum Scanzeitpunkt t die zugehörigen Liniensegmente $\ell_{(j)}^{(t+\tau)}$ des Scanzeitpunktes $t + \tau$ zu finden. Um eine Korrespondenz zu kennzeichnen, kann die Differenz der Linienparameter auf Signifikanz entsprechend den Gleichungen 5.19 - 5.21 getestet werden. Dies setzt voraus, dass im Raum tatsächlich gleiche Objekte gescannt werden. Alternativ kann auch eine maximale Winkeländerung $\Delta\alpha_{max}$ zwischen den Liniensegmenten

$$|\alpha_{(j)}^{(t+\tau)} - \alpha_{(i)}^{(t)}| \leq \Delta\alpha_{max} \quad (5.22)$$

mit

$$\alpha_{(i)}^{(t)} = \arctan \left(\frac{n_{y(i)}^{(t)}}{n_{x(i)}^{(t)}} \right) \quad (5.23)$$

festgelegt werden, um zu definieren, ob Linien zwischen benachbarten Profilen zugehörig sind. Für die bewegte Plattform ist es dadurch auch möglich, Korrespondenzen zwischen Linien verschiedener Orte im Raum zu definieren. Dies hat zur Folge, dass Winkeländerungen korrespondierender Liniensegmente kleiner als $\Delta\alpha_{max}$ als Änderungen der Ausrichtung der Plattform in Richtung des Rollwinkels interpretiert werden.

Zur Ermittlung der Rollwinkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t sind offensichtlich nur die Normalenvektoren der Liniensegmente zu berücksichtigen. Dies wird auch deutlich durch die allgemeine Transformationsvorschrift für Linien. Sei demnach ℓ' die Transformierte einer Linie ℓ , so gilt für eine Rotation α und Translation $[t_x, t_y]$ (z.B. [MCGLONE 2004]) einer Linie

$$\ell' = \left(\mathbf{H}^T \right)^{-1} \cdot \ell \quad (5.24)$$

mit

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & t_x \\ \sin \alpha & \cos \alpha & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.25)$$

Die Matrix $\left(\mathbf{H}^T \right)^{-1}$ ist dabei wie folgt besetzt

$$\left(\mathbf{H}^T \right)^{-1} = \begin{bmatrix} \blacksquare & \blacksquare & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & 0 \\ \blacksquare & \blacksquare & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.26)$$

der Normalenvektor von ℓ' ist ausschließlich vom Rotationswinkel α abhängig.

Es wird erwartet, dass sich ebene Teilstücke nicht nur über direkt benachbarte, sondern über mehrere benachbarte Profile bis zum zeitlichen Abstand δ erstrecken. Dies wird bei Berechnung der Rollwinkelgeschwindigkeiten berücksichtigt. Zunächst wird ausgehend vom Zeitpunkt t für jede Linie $\ell_{(i)}^{(t)}$ in jedem benachbarten Profil $t + \tau$ mit $\tau \in \{-\delta, \dots, \delta\}$ die korrespondierende Linie $\ell_{(j)}^{(t+\tau)}$ gesucht. Von diesen werden nur die Normalenvektoren betrachtet und es wird entsprechend Gleichung 5.23 der Vektor

$$\boldsymbol{\alpha}_{(i)}^{(t)} = \begin{bmatrix} \alpha_{(j)}^{(t-\delta)} \\ \vdots \\ \alpha_{(i)}^{(t)} \\ \vdots \\ \alpha_{(j)}^{(t+\delta)} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

aufgestellt. Somit kann mithilfe der linearen Regression

$$\alpha_{(i)}^{(t)} = \dot{r}_{(i)}^{(t)} \cdot \tau + \alpha_{0(i)}^{(t)} \quad (5.28)$$

die erste Ableitung, also die Änderung des Winkels des Normalenvektors der Linie $\ell_{(i)}^{(t)}$ berechnet werden. Diese lässt sich als Rollwinkelgeschwindigkeit

$$\dot{r}_{(i)}^{(t)} = \frac{\partial \alpha_{(i)}^{(t)}}{\partial \tau} \quad (5.29)$$

bezüglich dieser Linie interpretieren. Sind in einem Profil zum Zeitpunkt t insgesamt m Linien vorhanden, so werden - Korrespondenzen für alle Linien vorausgesetzt - entsprechend viele Rollwinkelgeschwindigkeiten $\dot{r}_{(i)}^{(t)}$ für $i = 1, 2, \dots, m$ geschätzt. Bezogen auf den Einsatz auf einer bewegten Plattform ist dadurch eine Redundanz in zeitlicher und räumlicher Hinsicht gegeben. Als repräsentative Rollwinkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t lässt sich dann z. B.

$$\dot{r}^{(t)} = \text{median} \left(\dot{r}_{(i)}^{(t)} \right) \text{ für } i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (5.30)$$

heranziehen. Die Menge der quantifizierten Rollwinkelgeschwindigkeiten bietet gleichfalls die Möglichkeit, deren Variabilität robust abzuschätzen mit

$$\text{MAD} \left(\dot{r}^{(t)} \right) = \text{median} \left(\left| \dot{r}_{(i)}^{(t)} - \text{median} \left(\dot{r}_{(i)}^{(t)} \right) \right| \right). \quad (5.31)$$

Die Verwendung des MAD-Wertes anstatt einer Standardabweichung wird an folgendem Beispiel näher diskutiert.

Demonstration Rollwinkelgeschwindigkeit

Eine Demonstration soll den Ablauf und das Potential der objektraumbasierten Ableitung der Rollwinkelgeschwindigkeit veranschaulichen. Der Laserscanner wurde dazu im Labor des Geodätischen Instituts der Leibniz Universität Hannover auf einem Pfeiler horizontal und horizontal so ausgerichtet, dass die gescannte Profilebene in Richtung einer Stellschraube des Dreifußes verlief.

Während des Scannens im Profilmodus wurde mithilfe der Stellschraube das Instrument geneigt und die Kippung mittels internem Neigungssensor registriert. Die aus den Liniensegmenten ermittelten Rollwinkelgeschwindigkeiten ergeben integriert über die Zeit die Rollwinkel mit

$$r^{(t)} = \int_0^t \dot{r}(\tau) d\tau. \quad (5.32)$$

Die Kriterien für die erste rekursive Indizierung der Liniensegmente wie Mindestabstand d_{min} und Rauheit r_{max} können der Szene angepasst werden, je nachdem wie lang und eben die Teilstücke sind. Die Wahl der Parameter ist nicht nur von den geometrischen Eigenschaften des Raumes abhängig. So wird die abgebildete Rauheit zudem vom verwendeten Scanner beeinflusst, hervorgerufen durch die Unsicherheit z. B. der Distanzmessung aus Entfernung, Auftreffwinkel und Reflektivität. Angemerkt sei, dass wie erwähnt gemäß der Wahl von r_{max} eine irrtümliche Teilung einer Punktmenge, die genau ein Liniensegment repräsentiert, nachträglich in der Verschmelzung korrigiert werden kann. Dieser Parameter ist daher nicht zu konservativ, d. h. zu groß zu wählen. Die Linienidentifikation setzt also - im Gegensatz zu den Verfahren nach Abbildung 5.3 - keine deterministischen Annahmen voraus. Stattdessen können Streuungen der Punkte durch die Unsicherheitsbetrachtung mit in die Entscheidung zur Liniensuche einbezogen werden. Für das vorliegende Innenraumbeispiel wurden zur Identifikation der Linien folgende Parameter gewählt (Tab. 5.2). Das Verhältnis $|U| / |V|$ gibt an, welcher Anteil der Punktmenge jeweils zur Indizierung der Linienkandidaten herangezogen wird (s. Algorithmus 2, Z. 3). Die endgültigen Linienparameter werden unter Einbezug aller zugehörigen Punkte geschätzt.

Scan		Indizierung		Rollwinkelschätzung	
Vertikale Scangeschw.	12.5 rot/s	d_{min}	0.1 m	δ	3 Profile (240 ms)
Erfassungsrate	500 kHz	r_{max}	0.01 m		
Punkte/Profil	ca. 33.000	$ U / V $	20 %		

Tabelle 5.2.: Parameter der Erfassung und Prozessierung der Profilschans

Mit dem Abstandsparameter δ werden räumlich benachbarte Liniensegmente über die Dimension der Zeit einander zugeordnet. Da die Rollwinkeländerungen zum Zeitpunkt t linear aus den zugeordneten Liniensegmenten nach Gleichung 5.28 ermittelt werden, ist damit je nach Anstand δ eine glättende Filterwirkung verbunden. Andererseits ist δ nicht zu klein wählen, um für jedes Liniensegment eine Rollwinkelgeschwindigkeit robust ermitteln zu können, auch wenn keine direkte, zeitlich benachbarte Zuordnung möglich ist. Im bewegten Einsatz drückt δ also eine Annahme zur Ebenheit von Teilflächen des Objektraums in Fahrtrichtung aus.

Das Ergebnis aus extrahierten Liniensegmenten (Abschnitt 5.3.1 - 5.3.3) und den integrierten Rollwinkelgeschwindigkeiten gemäß Gleichung 5.32 zeigt die Abbildung 5.9 als Zeitreihe der Rollwinkel. Oberhalb sind drei Profile mit indizierten Linien zu drei Zeitpunkten exemplarisch dargestellt. Zum Vergleich dienen Messungen des internen Neigungssensors.

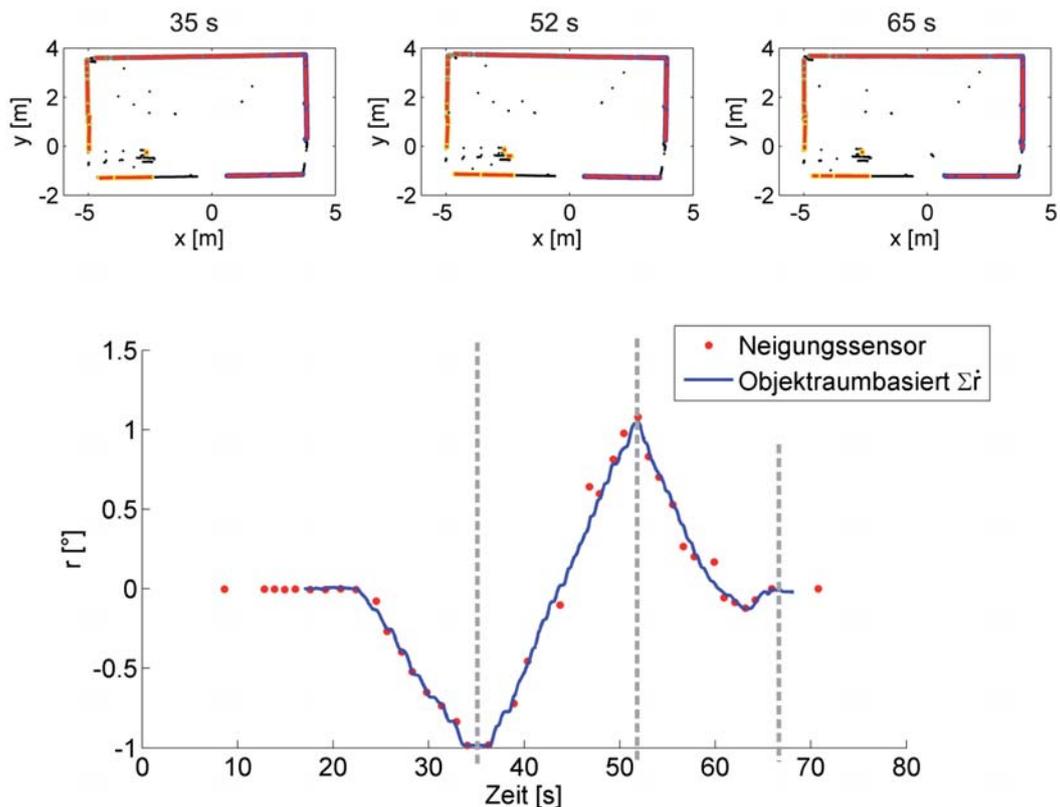


Abbildung 5.9: Rollwinkel objektraumbasiert und mittels Neigungssensor beobachtet (oben: zugehörige Scanprofile)

Im Verlauf der Rollwinkelfunktion sind die manuellen Drehbewegungen der Stellschraube als Form von Stufen deutlich erkennbar. Die Möglichkeit, Linien in den gescannten Profilen zu extrahieren, ist von der Objektszene, also von der Existenz ausreichend ebener Teilflächen abhängig. Gewöhnlich bieten Innenräume dafür gute Voraussetzungen. Die Genauigkeit einzelner Linienparameter ist neben der Oberflächenbeschaffenheit auch bedingt durch die Länge der Linien. Dies ist vornehmlich im Außenbereich vorteilhaft, wenn längere ebene Abschnitte wie Außenwände von Gebäuden sowie ebene Verkehrsflächen vorhanden sind.

Die Notwendigkeit einer robusten Kennzahl zur Angabe der Variabilität geschätzter Rollwinkelgeschwindigkeiten (vgl. Gl. 5.30) verdeutlicht die Abbildung 5.10. Dort sind die Standardabweichungen $\sigma(\dot{r}^{(t)})$ aller Rollwinkelgeschwindigkeiten pro Zeitpunkt t und die MAD-Werte laut Gleichung 5.31 angegeben. Zudem zeigt die Abbildung die zugehörigen Histogramme ermittelt aus allen Zeitpunkten.

Danach verhalten sich die MAD-Werte homogen über die Zeit. Die Standardabweichung aus der Menge der ermittelten Rollwinkelgeschwindigkeiten pro Zeitpunkt t hingegen zeigt über längere Abschnitte ein erheblich

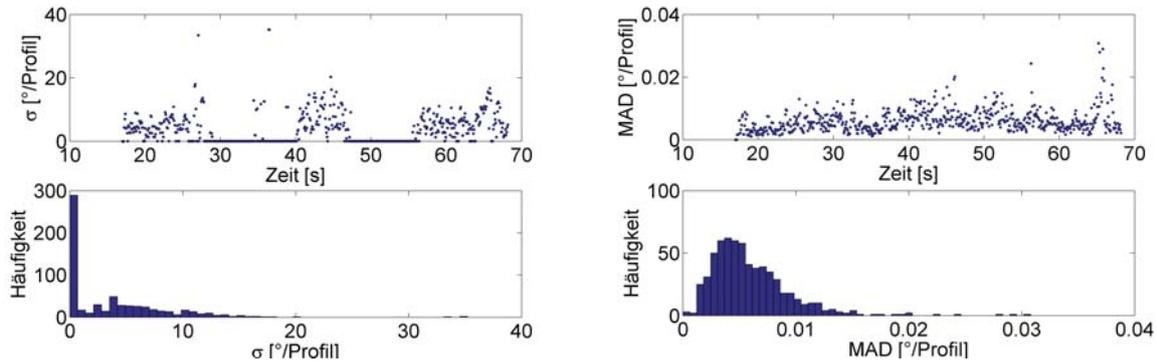


Abbildung 5.10: Standardabweichungen (links) und MAD-Werte (rechts) für $\dot{r}^{(t)}$ - geschätzt jeweils für ein Scanprofil

höheres Niveau, ausgelöst durch Ausreißer. Die Abschätzung des Varianzniveaus der Rollwinkelgeschwindigkeiten erfolgt daher nachfolgend auf Basis der MAD-Werte.

5.5. Kombinierte Filterung

Mit den in den Abschnitten 5.3 und 5.4 dargestellten Verfahren können Rotationsgeschwindigkeiten des Scanners um die Achse des vertikalen Umlenkspiegels geschätzt werden. Um einzelne Profile zudem in ein erdfestes Bezugssystem transformieren zu können, sind weitere Beobachtungen notwendig, die eine schwebbezogene Neigung (Rollwinkel) angeben. Die dazu notwendigen Messungen werden mit einem Inklinometer durchgeführt.

In einem gemeinsamen Ansatz werden die aus den Profilschans abgeleiteten Rollwinkelgeschwindigkeiten \dot{r} und die Messungen des Inklinometers r ausgewertet. Die Kombination erfolgt auf Basis einer Kalman-Filterung, die im Folgenden näher erläutert wird (s. Algorithmus 3).

Da Rollwinkelgeschwindigkeiten und Rollwinkel mit unterschiedlichen Erfassungsfrequenzen ermittelt werden, ist die Design-Matrix abhängig vom Aufdatierungszeitpunkt (Z. 3 bzw. Z. 5) zu konfigurieren. Zur Prädiktion wird hier ein lineares Systemverhalten - ausgedrückt in Form der Transitionsmatrix - vorausgesetzt. Unter der Annahme der Nullhypothese wird zunächst die Verträglichkeit von Mess- und Systemgleichung getestet (Z. 8). Ist diese Annahme zu verwerfen, wird die Innovation d_{k+1} als signifikant angesehen. Die Gründe dafür können in der fehlerhaften funktionalen bzw. stochastischen Modellbildung liegen [WELSCH et al. 2000]. Zunächst werden hier einzelne Elemente der signifikanten Innovation auf Ausreißer hin getestet. Um eine Verträglichkeit herzustellen, sind die Ursachen zu lokalisieren und entsprechende Maßnahmen zu treffen. Dies kann einen Eingriff in das funktionale Modell erfordern, wenn es sich durch ein verändertes System- bzw. Messmodell begründen lässt. Alternativ kann auch das Varianzniveau des Systemzustands iterativ angehoben werden (sog. stochastisches Stabilisieren, Z. 15), damit zukünftig die Messung einen Beitrag zur Filterung leisten kann. Als Abbruchkriterium für den Eingriff in das stochastische Modell dient ein bestandener Test auf Verträglichkeit nach Gleichung 3.36.

Der Ansatz der kombinierten Georeferenzierung wird nachfolgend eingesetzt, um Scanprofile, aufgenommen von einer bewegten Plattform, in ein erdbezogenes System zu transformieren. Die Ergebnisse der Validierung werden in Kapitel 7 ausführlich diskutiert. Dabei werden die Vorgehensweise sowie das Potential des Ansatzes näher beschrieben. Die Messungen wurden mit den Sensorkomponenten durchgeführt, deren Auswahl im nachfolgenden Kapitel erläutert wird.

Algorithmus 3 Kalman-Filterung zur Kombination der heterogenen Beobachtungselemente

```

1: for  $k = 1$  to anzahlEpochen do
2:   if  $\dot{r}$  und  $r$  gleichzeitig existent then
3:      $A_{k+1|k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $l_{k+1} = [r_{k+1} \dot{r}_{k+1}]^T$ ,  $Q_{u_{k+1}} = \frac{1}{\sigma_0^2} \begin{bmatrix} \sigma_{r_{k+1}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\dot{r}_{k+1}}^2 \end{bmatrix}$ 
4:   else
5:      $A_{k+1|k} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $l_{k+1} = [\dot{r}_{k+1}]$ ,  $Q_{u_{k+1}} = \frac{1}{\sigma_0^2} \begin{bmatrix} \sigma_{r_{k+1}}^2 \end{bmatrix}$ 
6:   end if
7:   Prädiktion  $\rightarrow \bar{x}_{k+1}$ ,  $Q_{\bar{x}\bar{x}_{k+1}}$ 
8:   if Testgröße  $T > \chi_{n_{k+1}, 1-\alpha}^2$  then ▷ Verträglichkeitstest:  $H_0$  verwerfen
9:     Suche Ausreißer: Testgröße  $y_{k+1,j} = \frac{e_j^T Q_{dd_{k+1}}^{-1} d_{k+1}}{\sigma_0 \sqrt{e_j^T Q_{dd_{k+1}}^{-1} e_j}} \forall j = 1, \dots, n_{l,k+1}$ 
10:    unter Annahme von  $H_0$ :  $y_{k+1,j} \sim t_{1,1-\alpha}$ 
11:    if alle Beobachtungen Ausreißer then ▷ kein Update
12:      beende
13:    end if
14:    stelle  $A_{k+1|k}$ ,  $l_{k+1}$  und  $Q_{u_{k+1}}$  neu auf
15:    while  $T > \chi_{n_{k+1}, 1-\alpha}^2$  do ▷ stochastisch stabilisieren
16:      erhöhe  $Q_{\hat{x}\hat{x}_k}$ 
17:      und berechne neue Testgröße  $T$ 
18:    end while
19:    Filterung  $\rightarrow \hat{x}_{k+1}$ ,  $Q_{\hat{x}\hat{x}_{k+1}}$ 
20:  end for

```

6. Systemimplementierung

6.1. Anforderungen

Soll eine terrestrische Umgebung von einer bewegten Plattform aus hochauflösend aufgenommen werden, so stellt dies bei gegebenen Fahrgeschwindigkeiten und Fahrwegen entsprechende Anforderungen an die objekt-erfassenden Sensoren. Prinzipielles Ziel einer kinematischen Aufnahme ist die gleichmäßige Abtastung des Objektraumes. Für das kinematische terrestrische Laserscanning wurden mögliche Varianten zur Änderung der Beobachtungsrichtung während der Fahrt bereits in Abschnitt 2.3.1 diskutiert. Hier soll der Profilmodus (2D-Modus) bevorzugt werden, um sicherzustellen, dass die Umgebung umfassend abgetastet werden kann. Beim Einsatz eines 3D-Scanners kann die Rotation um die Stehachse frei eingestellt werden. Wird die Rotationsachse des Umlenkspiegels schräg zur Fahrtrichtung gestellt, werden somit auch Objekte wie Straßenschilder erfassbar, deren Oberflächen in Fahrtrichtung ausgerichtet sind. Andererseits sind bei dieser Ausrichtung eingerückte, tiefer liegende Bereiche zwischen Häusern nur sehr begrenzt einsehbar. Daher wird aufgrund des Einsatzes eines einzigen Scanners eine Profilebene quer zur Fahrtrichtung vorgezogen.

Soll die kinematische Aufnahme im 2D-Modus durchgeführt werden, ist eine hohe Rotationsrate der Profilmessung Voraussetzung. Die Ganghöhe der Helix, d. h. die Strecke, die sich das Fahrzeug bei einer vollen Umdrehung der Umlenkeinheit des Laserscanners fortbewegt, ist direkt proportional zur Fahrgeschwindigkeit. Soll sich das Fahrzeug in Schrittgeschwindigkeit bis zu 2 m/s bewegen, so erfordert dies bei einem maximalen Profilabstand von 5 cm eine Rotationsrate von mindestens 40 rot/s.

Um für den Einsatz im Außenbereich auch weiter entfernt liegende Objekte wie höhere Gebäude erfassen zu können, ist eine entsprechende Reichweite der Distanzmessung zu gewährleisten. Daher werden in straßengebundenen Mobile-Mapping-Systemen häufig Laserscanner eingesetzt, deren Distanzmessung auf dem Impulslaufzeitverfahren basiert. Weil dadurch verfahrensbedingt geringere Raten der Distanzmessung möglich sind, werden vielfach mehrere Scanner montiert, die jeweils nur ein kleineres Gesichtsfeld erfassen. Da bei Laserscannern phasenbasierter Distanzmessung mittlerweile höhere Reichweiten über 50 m üblich sind, eignen sich die Scanner auch für viele Anwendungen im Außenbereich. Durch die höheren Erfassungsraten werden dadurch - auch beim Einsatz eines einzigen Scanners - quer zur Fahrtrichtung hohe Punktdichten (bis zu 10.000 Punkte/Profil) erreicht.

Die Neigungen des Systems in und quer zur Fahrtrichtung (p und r) sollen unterstützend durch zusätzliche Sensoren erfasst werden. Sensoren zur Neigungsmessung (Inklinometer) nutzen Verfahren, die Auslenkungen starrer Körper (Pendel) oder Flüssigkeiten registrieren, um den Bezug zur Lotrichtung herzustellen [SCHLEMMER 1996]. Dabei werden unterschiedliche physikalische Messgrößen abgegriffen (kapazitive, induktive, optische), die dann Rückschlüsse auf die geometrische Neigung ermöglichen. Die Verfahren unterscheiden sich im Messbereich, in der Auflösung (zeitlich/räumlich), in der Robustheit gegen Erschütterungen sowie in dem Einfluss der Trägheit. Im stationären Einsatz sind häufig nur kleine Messbereiche gefordert ($\pm 1^\circ$), an die sehr hohe Anforderungen an Auflösung und Genauigkeit (im Bereich von $1''$) gestellt werden. Daher sind (gedämpfte) Pendel weit verbreitet, die zwar nur Neigungsänderungen langsamer Art, diese jedoch hochauflösend abgreifen können.

In der kinematischen Anwendung kann eine fahrende Plattform hohen Dynamiken ausgesetzt sein, weshalb hier ein flüssigkeitsbasiertes Inklinometer bevorzugt wird. Dies gewährleistet zudem eine hohe Robustheit. Dabei ist zu beachten, dass der Ausgleich des Flüssigkeitshorizonts zwischen den Kammern träge ist und Neigungsänderungen daher nur verzögert messbar sind. Typische Reaktionszeiten liegen im Bereich von 0.5 s. Die kombinierte kinematische Georeferenzierung wirkt dieser Eigenschaft durch die Nutzung von Objektrauminformationen entgegen.

Inklinometer erfassen Neigungen bezüglich der Richtung der Erdbeschleunigung. Wirken darüber hinaus im bewegten Einsatz zusätzliche Beschleunigungen, werden sie - je nach Richtung - ebenfalls registriert [BARSHAN und DURRANT-WHYTE 1995]. Den Zusammenhang verdeutlicht die Abbildung 6.1.

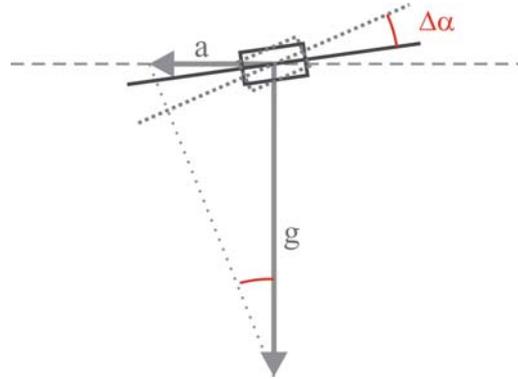


Abbildung 6.1: Abschätzung des Einflusses von Störbeschleunigungen auf die Neigungsmessung

Sei demnach ein Inklinometer einer horizontalen Störbeschleunigung a in Normalenrichtung zur Rotationsachse der Neigung ausgesetzt, so wirkt dies effektiv auf die messbare Neigung. Zusammen mit der Erdbeschleunigung g wird sie wie folgt abgeschätzt (Vorzeichen je nach Richtung).

$$\alpha_{eff} = \alpha \pm \Delta\alpha \quad (6.1)$$

mit

$$\Delta\alpha = \arctan \frac{a}{g}. \quad (6.2)$$

Bedeutsam sind dabei nur die Beschleunigungen, die nicht in Richtung des Schwerevektors wirken. Für den Rollwinkel (r) mögen diese Effekte bei Geradeausfahrten relativ gering sein, wenn Querbeschleunigungen zur Fahrtrichtung verhältnismäßig klein sind. Die in Kurvenfahrten wirkenden Querbeschleunigungen beeinflussen den Rollwinkel. Die Größenordnungen lassen sich folgendermaßen angeben: Angenommen wird eine horizontal wirkende Radialbeschleunigung ($a = \omega^2 r$) aus Winkelgeschwindigkeit ω und Radius r . Beispielhaft für eine Fahrt durch eine 90° -Kurve ergeben sich dann in Abhängigkeit von der insgesamt benötigten Zeit, in der die Kurve durchfahren wird, folgende Korrekturgrößen $\Delta\alpha$ (Abb. 6.2, links). Auf den Nickwinkel (p) wirken vor allem Beschleunigungen in Fahrtrichtung, verursacht durch Anfahrt und Bremsen (Abb. 6.2, rechts).

Bei einer angestrebten Querabweichung der gescannten Punkte von < 5 cm für Entfernungen von 10 m erfordert dies eine maximale Abweichung der Winkel p , r und y von 0.3° . Bei entsprechender Fahrweise sind die Korrekturterme daher explizit zu berücksichtigen.

Die Positionierung als auch die azimutale Ausrichtung y der Plattform sollen hier auf Basis von GNSS-Beobachtungen ermittelt werden. Bei gegebener Fahrtgeschwindigkeit ist daher eine entsprechende Erfassungsrate der GNSS-Positionen anzusetzen. [HESSE 2007] verwertet dazu die Geschwindigkeiten in den horizontalen, orthogonalen Richtungen \dot{X} und \dot{Y} , die mittels linearer Kalman-Filterung aus den prozessierten Positionen geschätzt werden:

$$y = \arctan \left(\frac{\dot{Y}}{\dot{X}} \right). \quad (6.3)$$

Auf Basis der genannten Anforderungen werden die Systemkomponenten ausgewählt, die im Folgenden näher erläutert werden.

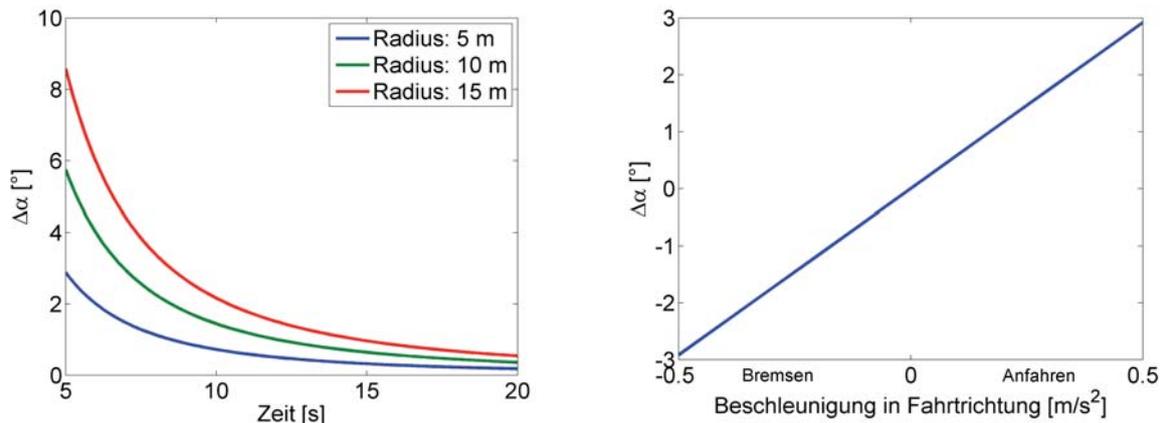


Abbildung 6.2: Auswirkungen auf die Neigungswinkel (Abschätzungen für horizontal wirkende Beschleunigungen)
 Links: Korrekturwerte für Rollwinkel r bei Durchfahrt einer 90° -Kurve in Abhängigkeit von Kurvenradius und Durchfahrtszeit
 Rechts: Korrekturwerte für Nickwinkel p bei Anfahren und Bremsen der Plattform

6.2. Systemkomponenten

6.2.1. Terrestrischer Laserscanner

Als objekterfassender Sensor wird den erwähnten Anforderungen gemäß ein terrestrischer Laserscanner gewählt, dessen Distanzmessung auf das Phasenvergleichsverfahren beruht (Typ Z+F Imager 5006, Firma Zoller+Fröhlich GmbH). Der Scanner ist konzipiert für die Erfassung von statischen 3D-Scans. Bei Feststellung der Rotation des Gehäuses um die Stehachse kann er jedoch optional auch als Profils scanner eingesetzt werden. Insgesamt nutzt der Scanner drei Modulationsfrequenzen, wodurch ein geringes Messrauschen bei großem Eindeutigkeitsbereich erreicht wird (s. Spezifikationen in Tab. A.1, Anhang A.2.1). Im Profilmodus ist eine maximale Frequenz von 50 rot/s möglich. Diese wird im kinematischen Einsatz auf der Plattform durchgehend gewählt, um den Abstand benachbarter Profile in Fahrtrichtung möglichst gering zu halten und um Änderungen des Rollwinkels hochauflösend detektieren zu können. Mit der maximalen Distanzmessfrequenz von 500 kHz resultiert daraus eine Profilauflösung von 10.000 Punkte/Profil. Effektiv verbleiben davon bei einem vertikalen Sichtfeld von 310° schließlich ca. 8600 Punkte/Profil.

Der Sensor verfügt über ein internes Inklinometer, dessen Auflösung mit 0.001° angegeben wird. Damit können während der Aufnahme eines statischen Scans Abweichungen von der Horizontierung signalisiert werden. Zum Zweck der Neigungsmessung auf einer fahrenden Plattform ist ein großer Messbereich und eine hohe zeitliche Auflösung notwendig, die durch das interne Inklinometer jedoch nicht erfassbar sind. Daher wird ein zusätzliches Inklinometer am Gehäuse installiert, dessen Neigungswerte in der Echtzeiteinheit registriert werden, um sie zusammen mit den Positions- und Scandaten zu synchronisieren (Abschnitt 6.2.2).

Die Angaben zum Entfernungsruschen machen deutlich, dass die Genauigkeit der Distanzmessung sowohl von der Entfernung als auch von der Reflektivität der Objektoberfläche abhängig ist. Die Angaben werden für den Profilmodus in Abschnitt 6.4 näher untersucht.

6.2.2. Inklinometer

Zur Messung der Neigungswerte wird ein Zwei-Achs-Inklinometer (Typ NS15-DMG2-U der Firmen Measurement-Specialities und HL Planartechnik) genutzt, bei dem die Neigungen wie folgt aufgezeichnet werden. Die Messzelle ist mit einer Elektrolytflüssigkeit gefüllt. Auf der Unterseite der Zelle sind jeweils zwei

Elektrodenpaare montiert, mit denen per Wechselstrom ein elektrisches Feld erzeugt wird. In horizontaler Lage der Zelle ist der Widerstand beider Elektrodenpaare gleich. Neigt sich die Zelle, so erhöht bzw. sinkt - je nach Richtung - der jeweils gemessene Widerstand. Da beide Elektrodenpaare differentiell geschaltet sind, lässt sich aus dem resultierenden Vorzeichen auf die Richtung der Neigung schließen.

Die Tabelle im Anhang A.2.2 enthält nähere Angaben zu den charakteristischen Eigenschaften des Inklinometers. Neben einer seriellen Schnittstelle bietet das Inklinometer auch die Möglichkeit, Neigungswerte in Form analoger Signale zu registrieren. Dies ist deshalb vorteilhaft, weil die analogen Signale mit einer kürzeren Latenzzeit durch den A/D-Wandler des Echtzeitrechners erfasst und dort mit einem Zeitstempel zum Zweck der Synchronisation versehen werden können.

6.2.3. Inertiales Messsystem (INS)

Um die Ergebnisse validieren zu können, wird ebenfalls eine inertielle Messeinheit (IMU) integriert. Dadurch wird es möglich, die Parameter der Georeferenzierung direkt miteinander zu vergleichen. Für die Komponenten von inertialen Messeinheiten wie Sensoren für Drehraten und Beschleunigungen sind eine Reihe von Einflussgrößen charakteristisch. Allgemein kann ein Korrekturmodell für Drehratensensoren beschrieben werden durch:

$$\omega_{out}^b = M \cdot \omega_{in}^b + b_{\omega}^b + n_{\omega}^b. \quad (6.4)$$

Dabei gibt ω_{out}^b die gemessene Drehrate im Body-System, ω_{in}^b die tatsächliche Drehrate an. Die Korrektur M folgt daraus, dass die sensitiven Achsen nicht orthogonal zueinander stehen (Missweisung). Mittels der Größe b_{ω} wird der Bias berücksichtigt, der nach Abhängigkeit von den wirkenden Beschleunigungen unterteilt wird (g -unabhängig, g -abhängig und g^2 -abhängig). Zudem können in dem Term auch zufällige Driften (random walk) einbezogen werden. Schließlich lassen sich nicht-lineare Anteile in der Größe n_{ω} zusammenfassen. Eine detaillierte Beschreibung, die auch unterschiedliche Sensortypen spezifiziert, findet sich in [TITTERTON und WESTON 2005].

Analog dazu wirken sich bei den Beschleunigungssensoren vor allem konstante Abweichungen sowie skalare Fehlerfaktoren auf die Genauigkeit der Messung aus. Angemerkt sei, dass die Einflussgrößen nicht zwingend im Einzelnen modelliert werden müssen. So verwendet [HEINZE 1996] im Korrekturmodell der Beschleunigungs- und Drehratensensoren nur jeweils einen skalaren Faktor und einen Bias, um damit einer instabilen Filterlösung entgegenzuwirken. Dieser Ansatz ist von der Güte der Sensoren abhängig, das Korrekturmodell ist also den Spezifikationen der Sensoren zufolge aufzustellen.

Aus den sensortypischen Unsicherheiten kann nur bedingt auf resultierende Unsicherheiten der Position und Orientierung geschlossen werden. [TITTERTON und WESTON 2005] schätzen diese mit quadratischem bzw. kubischem Einfluss der Zeit aus dem Bias der Beschleunigung und Drehrate ab. Da sich beispielsweise ein Bias in der Beschleunigung einer Achsrichtung auch auf die Beschleunigungsmessung anderer Achsrichtungen auswirkt, nimmt dies schließlich Einfluss auf Orientierung und Positionierung im übergeordneten System.

Von den Anforderungen her wird eine Referenzlösung der Georeferenzierung wie folgt abgeschätzt. Die Positionsunsicherheit der Plattform im erdfesten System wird vor allem durch die Positionierung mittels kinematischem GNSS bestimmt und hier mit 2-3 cm für die Lagekomponenten bzw. 3-4 cm für die Höhenkomponente veranschlagt. Wird darüber hinaus die Positionsunsicherheit gescannter Punkte als Folge der Ausrichtung des Systems in gleicher Größenordnung quantifiziert, so folgt daraus, dass bei einer Scanentfernung von 15 m die referenzierenden Winkel mit einer Unsicherheit $\leq 0.1^\circ$ anzugeben sind. Diese Anforderungen werden den Spezifikationen nach durch die Systeme Honeywell Lasernav II und iMAR iNAV-RQH-1003 erfüllt. Beide Systeme beinhalten als Drehratensensor einen Ringlaserkreisel (RLG). Charakteristisch für diesen Sensortyp ist, dass der Anteil der wirkenden (quadratischen) Beschleunigungen (g -abhängiger und g^2 -abhängiger Teil des Bias) auf die Drehratenerfassung vernachlässigt werden kann.

Beschleunigungssensoren enthalten Probmassen, deren Auslenkung entweder direkt (open-loop) oder indirekt über benötigte Stellgrößen, die die Probmassen in Ruhelage halten (closed-loop), ermittelt wird. Für ein Kor-

rekturmodell der Beschleunigungssensoren, das mittels Skalenfaktor und Bias beschrieben werden kann, enthält die Tabelle A.3 im Anhang A.2.3 die Größenordnungen der eingesetzten Sensoren.

Im Fall des Systems iMAR iNAV-RQH-1003 beschreiben [DOROBANTU und GERLACH 2004] die einzelnen Komponenten und deren Funktionsweise, erläutern die zugehörigen Beobachtungsgleichungen und werten Lösungen für unterschiedliche Testszenarien aus. Dabei wird deutlich, dass die Lösungen aus der INS/GPS-Integration vor allem von der Fahrdynamik der Trajektorie abhängig sind; insbesondere in Kurvenfahrten steigen aufgrund einer erschwerten Kompensation der Gravitationsrichtung die Unsicherheiten in den Roll- und Nickwinkeln. Insgesamt liegen bei den dort ausgewerteten Testfahrten die Abweichungen der Positionen aus der INS/GPS-Integration (loosely-coupled mit sekundlicher Aufdatierung der Position) und den autark prozessierten kinematischen GPS-Lösungen überwiegend im Bereich von ± 1 cm.

Die räumliche Integration der inertialen Messeinheit in die übrigen Systemkomponenten wird über eine Systemkalibrierung realisiert, deren Ziel es ist, die Parameter der räumlichen Transformation zwischen den räumlichen Systemen der Sensoren (Body-System der IMU, System des Laserscanners etc.) zu quantifizieren. Dies wird im folgenden Abschnitt 6.3 im Einzelnen betrachtet.

6.3. Systemaufbau und Kalibrierung

Mit den erwähnten Systemkomponenten soll die Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung validiert werden. Validierungsmessungen werden von zwei verschiedenen Plattformen aus durchgeführt. Der Aufbau auf einem doppelachsigen Autoanhänger (Trailer) (Abb. 6.3, links) ermöglicht es, Bebauungen straßenseitig zu erfassen. Die fahrdynamischen Eigenschaften der Plattform sind dem eines Automobils ähnlich. Unebenheiten der Fahrbahn werden größtenteils durch die Federung der Achsen gedämpft, Schwingungen können damit überwiegend von der Plattform entkoppelt werden.

Der Handwagen hingegen (Abb. 6.3, rechts) verfügt über keine Schwingungsdämpfer, so dass durch Stöße die Eigenschwingung des Wagen langfristig angeregt wird. Dieser Effekt wird besonders bei unebenen Fahrbahnen deutlich. Der flexible Aufbau ermöglicht es, auch straßenseitig nicht einsehbare Bereiche zu erfassen und er soll daher auch zur Aufnahme von Innenräumen eingesetzt werden.



Autoanhänger mit INS Honeywell LaserNav II



Handwagen mit INS iMAR iNAV-RQH-1003

Abbildung 6.3: Varianten der Plattformen für die Validierungsmessungen

Die relative Lage zwischen den Sensorkomponenten (IMU, GNSS-Antenne, Scannerzentrum und Inklinometer) wird im Rahmen einer Systemkalibrierung hergestellt. Für beide Plattformen werden dazu mehrere Passpunkte (Scantargets), die GNSS-Antenne sowie das Inklinometer im Body-System der IMU koordiniert. Dies geschieht mithilfe einer photogrammetrischen Einmessung. Außerdem werden die Passpunkte im 3D-System

des Scanners erfasst (gescannt). Anschließend können mithilfe einer räumlichen Helmert-Transformation (6-Parameter) der Translationsvektor $(\Delta xyz)_{s2b}$ (Leverarm) sowie die Rotationswinkel $(r_{xyz})_{s2b}$ (Boresight) berechnet werden, die den Übergang vom Scanner- ins Body-System der IMU definieren. Für die Georeferenzierung wirken sich Abweichungen in den Translationen demnach konstant auf die zu georeferenzierenden Scanpunkte aus. Abweichungen der relativen Rotation zwischen Scanner- und Body-System (Missorientierung) nehmen dagegen mit der Scanentfernung zu. Soll der Anteil der Missorientierung bei einer Scanentfernung von 10 m kleiner 1 cm sein, so sind bei einer Basis von 1 m die Passpunkte in beiden Systemen entsprechend mit Unsicherheiten im Bereich von ca. 1 mm zu koordinieren. Die Auswertungen der räumlichen Transformationen ergaben für die vor den Messfahrten durchgeführten Kalibrierungen, dass die Standardabweichungen der Transformationsparameter für die Translationen $s_{\Delta xyz}$ im Bereich von 1-2 mm bzw. für die Rotationen $s_{r_{xyz}}$ im Bereich um 0.05° liegen. Bei einer Scanentfernung von 10 m resultiert demnach aus der Rotationsunsicherheit eine radiale Abweichung in der Größenordnung von ca. 1 cm.

Wird ein 3D-Scanner in Kombination mit einem nordsuchenden Kreisel eingesetzt, ist prinzipiell auch ein alternatives Vorgehen möglich: Anstatt das Body-System über Passpunkte zu realisieren, können die Transformationsparameter auch im erdfesten System berechnet werden. Dazu ist das System der IMU (mittels Alignment, d. h. Festlegung des relativen Bezugs des Body-Systems in einem Referenzsystem) als auch das des Scanners (mittels georeferenzierter Scantargets) im erdfesten System zu koordinieren.

Zur fortwährenden Kontrolle bzw. zur situativen Anpassung ist zusätzlich eine In-Situ-Kalibrierung denkbar. Somit ließe sich die Orientierung aus dem Objektraum über einzelne Kontrollpunkte regulieren. In der Luftbildphotogrammetrie ist der Ansatz als integrierte Sensororientierung (ISO) verbreitet (z. B. [CRAMER 2001]). Im vorliegenden Fall einer nicht-redundanten Erfassung ist dabei Voraussetzung, dass die Kontrollpunkte unabhängig georeferenziert und auch in den kinematischen Scans eindeutig erkennbar sind.

6.4. Untersuchungen zum 2D-Scanmodus (Profilmodus)

Das gesamte Unsicherheitsbudget georeferenzierter Punkte setzt sich aus einer Reihe von Teilkomponenten zusammen. Dazu gehören auch die Unsicherheiten, die durch den erfassenden Sensor verursacht werden. Diese sollen nachfolgend untersucht und deren Größenordnung abgeschätzt werden. Im statischen Fall sind für den 3D-Modus bereits eine Reihe intensiver Untersuchungen publiziert (siehe hierzu auch Ausführungen und Verweise in Abschnitt 2.2).

Diese Ergebnisse lassen sich jedoch nur bedingt vom statischen auf den kinematischen Fall übertragen. Dies hat zwei Gründe: In statischen Scans werden Objekte durch eine Menge von Punkten repräsentiert. Um aus diesen Punkten geometrische Parameter ableiten zu können, werden Mengen von Punkten herangezogen. Diese Punktmengen ermöglichen es, die Parameter überbestimmt zu schätzen. Auf diesem Wege werden geometrische Formen ausgeglichen und die Parameter der Formen im Rahmen von Kalibrierungen mit Sollwerten verglichen. In kinematischen Scans können aufgrund der Variation der Objektgeometrie bzw. der Bewegung des Scanners die Parameter nicht redundant abgeleitet werden. Dies ist nur möglich, wenn das Verhalten der Zielobjekte bzw. des Scanners bekannt ist. In der nachfolgend dargestellten Untersuchung wird daher dieses Verhalten kontrolliert hergestellt.

Die zweite Ursache für den Unterschied zwischen kinematischen und statischen Scans ist die notwendige Synchronisation zwischen den Beobachtungselementen. Im statischen Fall sind dazu ausschließlich scannerintern die Beobachtungselemente der Richtungen und Distanzen auf eine einheitliche Zeitbasis zu beziehen. Im Allgemeinen sind diese extern nicht zugänglich. In kinematischen Anwendungen ist die Synchronisation auf Beobachtungen externer Sensoren zu erweitern. Funktional betrachtet sind also alle Beobachtungselemente jeweils um eine Zeitdimension zu erweitern. Technisch kann dies mithilfe von Zeitstempeln realisiert werden (siehe hierzu auch Bemerkungen in Abschnitt 2.3.3).

Diese Unterschiede motivieren zur Untersuchung des 2D-Modus für kinematische Anwendungen. Nachfolgend werden auf Basis von Referenzmessungen die Unsicherheiten näher analysiert. Die dargestellten Messreihen

wurden durchgängig mit dem terrestrischen Laserscanner Z+F Imager 5006 erfasst, der auch bei den übrigen Versuchen zur Validierung zum Einsatz kam.

6.4.1. Aufbau und Ablauf der Untersuchung

Die Untersuchungen wurden auf der Linearmessbahn PHIL (Precise High speed Linear track) des Geodätischen Instituts Karlsruhe (GIK) durchgeführt. Ein automatisch steuerbarer Wagen trägt dort ein Zielobjekt, das mithilfe eines Interferometers referenziert werden kann (s. Abb. 6.4). Detaillierte Angaben zum Aufbau und zu den charakteristischen Eigenschaften der Messbahn finden sich in [HENNES 2006].

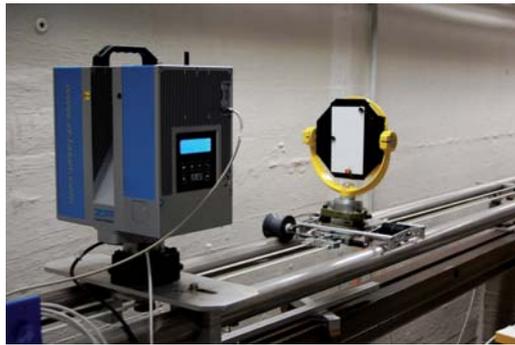


Abbildung 6.4: Scanner und Zieltafel mit Reflektor zur Referenzierung

Um die Positionen der gescannten Punkte mit den referenzierten Positionen der Zieltafel vergleichen zu können, wird ein Lasertracker integriert. Der Scanner sendet beim Nadirdurchgang des vertikalen Umlenkspiegels ein TTL-Signal (*TTL: Transistor-Transistor-Logik*), zu dessen Zeitpunkt t_i die Steuereinheit des Lasertrackers eine zugehörige Position $x_t(t_i)$ im System des Lasertrackers speichert. Die Parameter für die Transformation zwischen dem System des Lasertrackers und des Scanners werden mithilfe identischer Punkte (Kugeln) bestimmt, wodurch die Koordinaten $x_t(t_i)$ der Punkte im System des Lasertrackers direkt als Referenz $x_r(t_i)$ in das System des Scanners transformiert werden können. Die Standardabweichungen der ausgeglichenen Koordinaten der Passpunkte betragen im Mittel $\bar{s}_x = 0.6$ mm, $\bar{s}_y = 0.5$ mm und $\bar{s}_z = 0.6$ mm.

Bei der Untersuchung werden auf der Zieltafel nur die gescannten Punkte ausgewählt, die einen Abstand von mindestens mehreren cm oberhalb des Reflektors aufweisen. In diesem Abstand sind bei ruhender Zieltafel mit und ohne Reflektor keine Abweichungen erkennbar. Der betrachtete Abschnitt auf der Zieltafel hat eine Höhe von ca. 10 cm. Je nach Entfernung wird damit die Zieltafel durch ca. 10 Punkte (bei 20 m Entfernung) bzw. durch ca. 110 Punkte (bei 1 m Entfernung) abgebildet. Die Darstellung in Abbildung 6.5 illustriert schematisch den Aufbau auf der Messbahn mit Scanner und Zieltafel.

Um die Lösungen des Scanners mit der Referenz des Lasertrackers vergleichen zu können, sind nicht nur die Positionen, sondern auch die zugehörigen Zeiten zu transformieren. Da die Position der Zieltafel ausschließlich zu den Durchgangszeiten des vertikalen Umlenkspiegels bekannt sind, werden die Zeiten der einzelnen Scanpunkte - unter der Annahme einer konstanten Umlaufzeit T_M - linear interpoliert. Für den Zeitversatz Δt_j zwischen Nadirdurchgang des Umlenkspiegels und dem Scannen eines Punktes mit dem Nadirwinkel ϕ_j gilt dann

$$\Delta t_j = \frac{\phi_j T_M}{2 \cdot \pi}. \quad (6.5)$$

Dann ist der Scanzeitpunkt t_s eines j -ten Punktes im i -ten Profil

$$t_s = t_i + \Delta t_j. \quad (6.6)$$

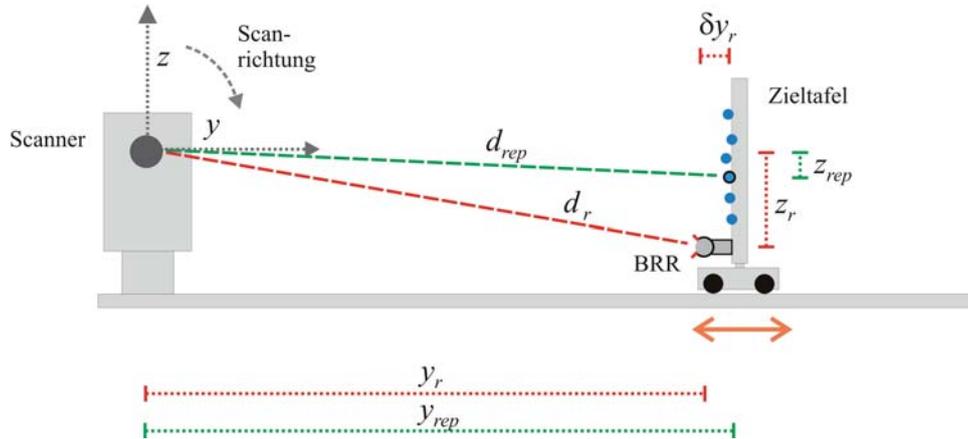


Abbildung 6.5: Aufbau von Scanner und Zieltafel zum Vergleich der Referenz- und Scandistanzen

Die Positionen im System des Lasertrackers $x_r(t_s)$ und damit die des Scanners $x_s(t_s)$ können somit interpoliert werden. Schließlich ist noch die Korrektur δy_r aufgrund des Offsets vom Reflektor zur Zieltafel anzubringen.

Da im Scan einer Zieltafel pro Profil einzelne Ausreißer auftreten, wird ein repräsentativer Punkt ausgewählt und zwar der, dessen Koordinate in Bahnrichtung dem Median der Koordinaten entspricht:

$$y_{rep} = \text{median} \left(y_s^{(j)} \right). \quad (6.7)$$

Von diesem repräsentativen Punkt aus kann die Koordinate in Bahnrichtung (y -Koordinate) schließlich mit der referenzierten Distanz y_r direkt verglichen werden:

$$\Delta y = y_r + \delta y_r - y_{rep}. \quad (6.8)$$

6.4.2. Ergebnisse der kinematischen Untersuchung

Für eine Bahngeschwindigkeit von 1 m/s zeigt die Abbildung 6.6 die resultierenden Differenzen Δy in Relation zur Distanz y_s . Außerdem wurden aus den Scanprofilen für die Abschnitte einer Länge von 1 m konstante Geschwindigkeiten ausgeglichen und aus den Verbesserungen zugehörige Standardabweichungen berechnet.

Die absoluten Differenzen liegen überwiegend im Bereich um 1 mm. Die Abweichungen werden über die Bahnlänge auch für weiter entfernte Bereiche nur geringfügig größer. Die stückweise berechneten Standardabweichungen betragen ca. 0.2 mm und lassen erwarten, dass sich Änderungen zeitlich und örtlich benachbarter Zustände in vergleichbaren Größenordnungen auflösen lassen. Bei den absoluten Differenzen sei erwähnt, dass diese auch Anteile aus der räumlichen Transformation zwischen den Systemen des Lasertrackers und des Scanners beinhalten.

Ein empfangenes Signal wird von einer Menge von Einflussignalen geprägt (*Übersprechen*). Diese können durch die Sende- und Empfangseinheit selbst oder durch die sensorinterne Optik verursacht werden. Wird Licht bereits beim Austritt aus der Sendeoptik reflektiert, z. B. infolge einer verschmutzten Glasoberfläche, so wird bei der phasenbasierten Distanzmessung die resultierende Mischphase und damit die Distanz systematisch verfälscht. Der Effekt ist zyklischer Art und die Amplitude steigt mit der Entfernung [WÖLFELSCHNEIDER et al. 2005]. Optisches Übersprechen tritt ebenfalls auf, wenn im Objektraum Ziele aufgrund der Größe des Strahldurchmessers nicht eindeutig anvisiert werden und keine eindeutigen Distanzen zugeordnet werden können. Auch hieraus resultiert eine gemischte Phasenlage - der Zielpunkt erscheint im Scan je nach Relation vor, zwischen oder hinter der tatsächlichen Zielweite (*Mixed-Pixel-Effekt*).

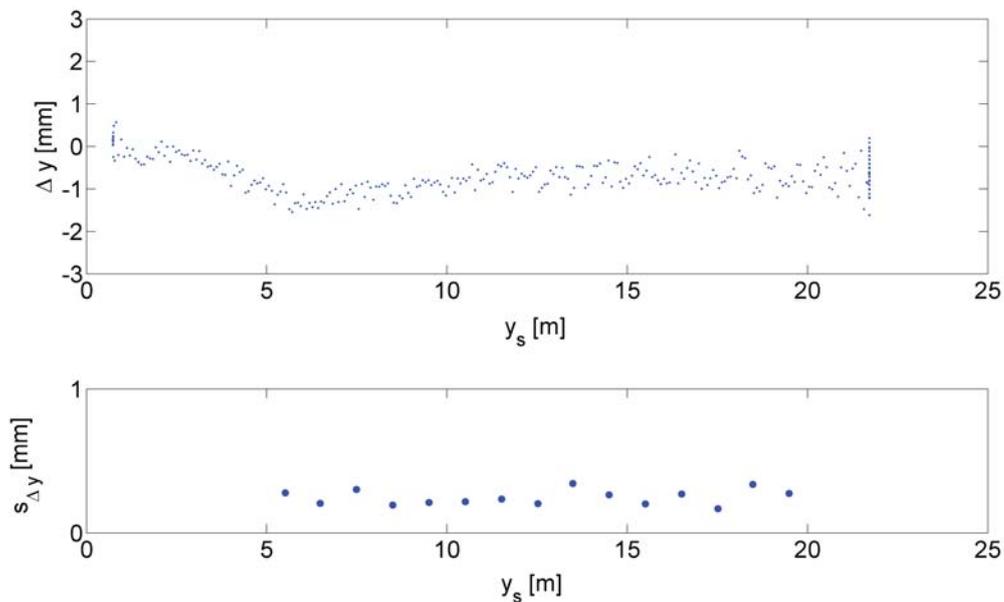


Abbildung 6.6: Differenzen aus Referenz und gescannter Entfernung in Bahnrichtung [oben] sowie Standardabweichungen unter der Annahme einer stückweise konstanten Geschwindigkeit geschätzt aus den gescannten Entfernungen [unten]

Messmodus: 12 rot/s, 500 kHz, Fahrgeschwindigkeit der Zieltafel: 1 m/s

Ein Effekt, der sich ähnlich dem optischen Übersprechen auswirkt, kann bei schnell wechselnden Entfernungen beobachtet werden. Dies verdeutlicht die Abbildung 6.7, bei der analog zur Messfahrt der Abbildung 6.6 die Zieltafel im Profilmodus, diesmal jedoch mit einer Umlaufgeschwindigkeit des Umlenkspiegels von 50 rot/s aufgenommen wurde. Dargestellt sind hier nicht einzelne repräsentative Punkte pro Profil, sondern alle Punkte, die - mit Ausnahme der Punkte in unmittelbarer Nähe zum Reflektor des Lasertrackers - auf der Oberfläche der Zieltafel gescannt wurden. Ausgenommen sind wiederum einzelne Ausreißer, hervorgerufen durch fehlerhaft gelöste Mehrdeutigkeiten.

Im oberen Bereich der Zieltafel ($z \approx -0.02$ m) ist dabei ein zyklischer Effekt deutlich erkennbar, dessen dominante Wellenlänge mit ca. 0.7 m rund ein Zehntel der Wellenlänge des Feinmaßstabs von 7.2 m beträgt. Dieser Bereich wurde entsprechend der Rotation des Umlenkspiegels zuerst gescannt. Da diese systematischen Abweichungen bei langsamer Spiegelrotation nicht auftreten, ist anzunehmen, dass die schnell wechselnden Distanzänderungen und die damit verbundenen Reflektivitätsänderungen effektiv nicht exakt verarbeitet werden können.

Bezogen auf den analysierten Scannertyp kann zusammenfassend zu den Untersuchungen des Profilmodus folgendes festgehalten werden:

- Für die untersuchten Messentfernungen bis ca. 20 m liegen die Abweichungen zu den Referenzdistanzen durchgehend im Bereich von 1-2 mm. Eine Zunahme der Streuung der Differenzen ist auch bei höheren Entfernungen kaum ersichtlich.
- Werden nicht absolute Differenzen, sondern relative Änderungen zur zeitlichen bzw. räumlichen Nachbarschaft betrachtet, so verringert sich die Streuung erheblich, so dass auch kleinere Distanzänderungen auflösbar werden. Bei entsprechender Aufnahmekonstellation, die die zeitliche und räumliche Korrelation berücksichtigt, kann so mit einer differentiellen Auswertestrategie ein kinematisches Verhalten mit sub-mm Auflösung detektiert werden.

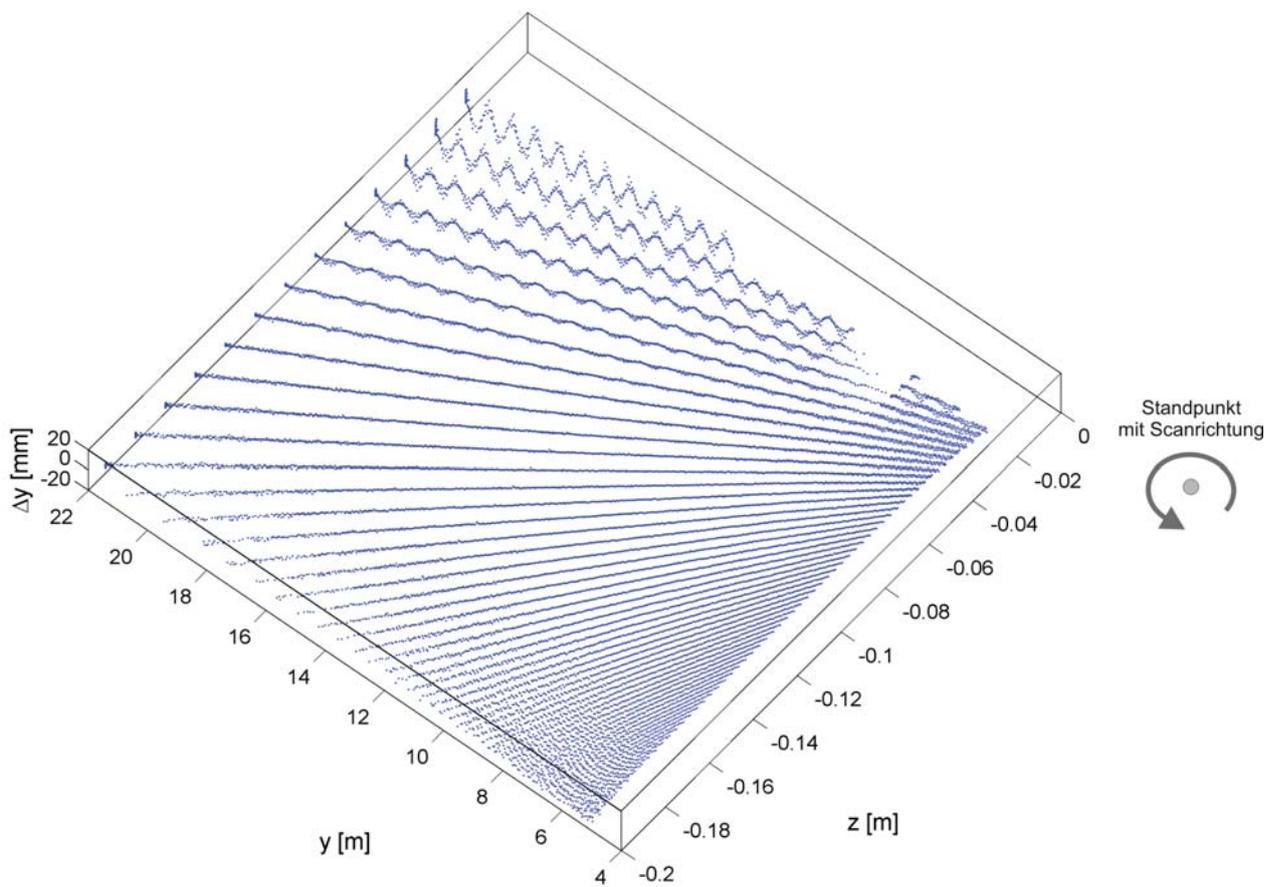


Abbildung 6.7: Differenzen aus Referenz und gescannter Entfernung - alle Punkte auf der Zieltafel
Messmodus: 50 rot/s, 500 kHz, Fahrgeschwindigkeit der Zieltafel: 1 m/s

- An Übergangsstellen bei großen kurzzeitigen Entfernungssprüngen sind darüber hinaus systematische Effekte erkennbar, die sich in Abhängigkeit von der Entfernung zyklisch auswirken und Amplituden bis zu mehreren mm erreichen können.

Mit den hier dargestellten Ergebnissen ist es möglich, das Unsicherheitsniveau der Distanzmessung zu quantifizieren. Bezogen auf das hier untersuchte Zielobjekt mit heller Oberfläche entspricht dies den Größenordnungen, die vom Hersteller angegeben werden (s. auch Tab. A.1). Da im Profilmodus Messungen schnell wiederholbar sind, motivieren die Untersuchungen zudem zum Einsatz des Scanners für die Deformationsmessungen. Dadurch wird es möglich ohne zusätzliche Installationen am Bauwerk auch Bewegungen im Bereich von wenigen 1/10 mm zu detektieren [VENNEGEERTS et al. 2010].

Die auf Grundlage der definierten Anforderungen gewählten Sensorkomponenten werden eingesetzt, um die Validierungsmessungen durchzuführen. Im anschließenden Kapitel werden die gewählten Szenen beschrieben, der Ablauf der Untersuchungen vermittelt sowie die Ergebnisse der kombinierten kinematischen Georeferenzierung diskutiert.

7. Validierung

7.1. Übersicht zu den Validierungsmessungen

Um das Potential des entwickelten Verfahrens der kombinierten kinematischen Georeferenzierung beurteilen zu können, wird es im Folgenden anhand von mehreren Testszenarien detailliert analysiert. Die Validierung soll in zweifacher Hinsicht durchgeführt werden. Die Abbildung eines Scans setzt sich aus der Menge der gescannten Einzelpunkte zusammen. Daher ist es bedeutsam, wie gut einzelne Punkte referenziert werden können. Zur durchgreifenden Beurteilung der Georeferenzierung werden aus diesem Grund die Positionen einzelner transformierter Punkte mit unabhängig referenzierten Kontrollpunkten verglichen.

Außerdem sollen auf Ebene der Parameter auch die Lösungen der Georeferenzierung direkt einer übergeordneten Lösung gegenübergestellt werden. Dies wird möglich durch die Integration einer inertialen Einheit, deren Lösungen hier als Referenz dienen. Dadurch ist auch für den kinematischen Fall eine vollständige Analyse der Parameter der Georeferenzierung gewährleistet, da sich diese nicht nur stichprobenhaft zu einzelnen Zeitpunkten, sondern über den gesamten Messzeitraum hinweg erstreckt.

Als Testumgebungen werden typische Straßenumgebungen gewählt. Diese zeichnen sich aus durch gewöhnliche Straßenbeläge (Asphaltierung, Beton- und Kopfsteinpflaster etc.) und durch variierende Abschattungen mehrstöckiger Bebauungen und Vegetationen. Außerdem wechseln die Fahrtrichtungen in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung, um so zu quantifizieren, welchen Einfluss dies auf die kinematische GNSS-Positionierung nimmt.

In den Untersuchungen wird jeweils zunächst die Prozessierung der Profilschans betrachtet. Weitere Schwerpunkte sind die Ergebnisse der kombinierten Filterung zur Georeferenzierung. Schließlich werden die resultierenden Abweichungen einzelner transformierter Punkte quantifiziert, die damit die Möglichkeiten des Verfahrens verdeutlichen. Die Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der ausgewerteten Testszenen.

Szene:	TU-Darmstadt Fachbereich Maschinenbau	Hannover Neues Rathaus	Hannover Hauptbahnhof Ernst-August-Platz	Hannover Hauptbahnhof Innenraum
Abschnitt:	7.2	7.3	7.4.1	7.4.2
Länge der Fahrt:	0.35 km	0.16 km	0.18 km	0.26 km
Profilanzahl:	12274	7791	8519	10347
Dauer des Scans:	246 s	156 s	170 s	207 s
Punkte:	45.1 Mio.	36.6 Mio.	33.5 Mio.	75.2 Mio.
Mittlerer Punktabstand zum Messsystem:	8.02 m	9.97 m	6.95 m	4.88 m
Straßenbelag:	Asphalt, Betonstein	Kleinpflaster Naturstein	Betonsteinpflaster (geschliffen)	Fliesenbelag (geschliffen)
Aufbau:	Autotransporter (Trailer) Abb. 6.3, links	Zwei-Achs Handwagen Abb. 6.3, rechts	Zwei-Achs Handwagen Abb. 6.3, rechts	Zwei-Achs Handwagen Abb. 6.3, rechts

Tabelle 7.1.: Übersicht zu den ausgewerteten Testszenarien

7.2. Testszene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau

7.2.1. Prozessierung der Scanprofile

Die kombinierte Georeferenzierung unter Einbezug von Profilschans stützt sich auf die Annahme stückweise im Objektraum vorhandener ebener Flächen. Die Mindestfläche wird mit 20×20 cm veranschlagt. Diese Fläche ergibt sich aus folgenden Überlegungen: Angenommen sei eine Fahrgeschwindigkeit von 1 m/s; dann beträgt bei einer Rotationsrate des Umlenkspiegels von 50 rot/s der Profilabstand im Raum 2 cm. Werden jetzt jeweils 10 benachbarte Profile ($\delta = 5$, Gl. 5.27) zur Schätzung der örtlichen Rollwinkeländerung herangezogen, so ergibt dies im Raum eine Fläche von ca. 20 cm. Innerhalb eines Profils (quer zur Fahrtrichtung) wird eine gleiche Mindestlänge für die Suche nach Linien vorausgesetzt. Diese definiert damit das Abbruchkriterium für die rekursive Liniensuche.

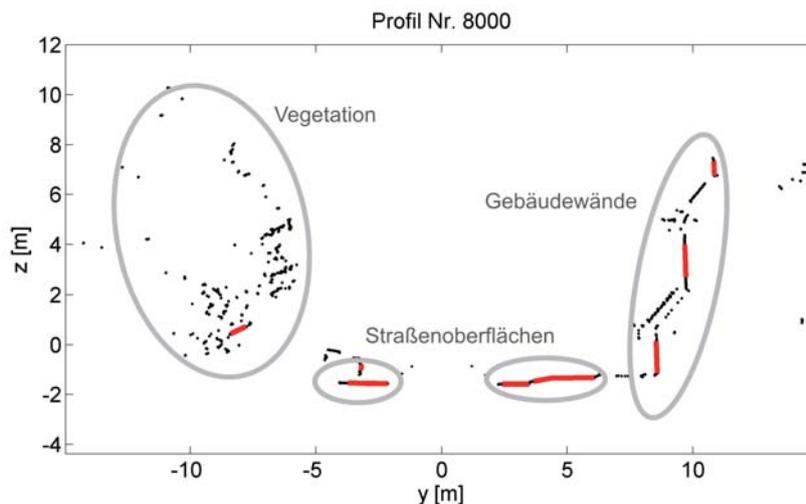


Abbildung 7.1: Szene TU-Darmstadt (Petersenstraße): Typisches Scanprofil der Testfahrt inklusive identifizierter Liniensegmente

Ein exemplarisches Scanprofil der betrachteten Szene inklusive der identifizierten Linien zeigt die Abbildung 7.1. Die benötigte Rechenzeit zur Liniensuche eines Profils beträgt im Durchschnitt ca. 34 ms (Desktop-PC, CPU: Intel Core 2 Quad 2.4 GHz, 3 GB RAM, 32 bit). Aufgrund der in der Szene enthaltenen feingliedrigen Struktur der Vegetation wird durch den Algorithmus verhältnismäßig lange nach zusammenhängenden Linien gesucht. In flächenhaften Szenen (ausschließlich ebene Flächen von Außenwänden, Straßenbelägen, Innenräumen etc.) ist daher eine kürzere Rechenzeit in Nähe der Scandauer eines Profils (20 ms) zu erwarten. Dadurch wird der Ansatz auch für eine Echtzeitauswertung einsetzbar.

Um aus den Liniensegmenten Rollwinkelgeschwindigkeiten ableiten zu können, sind zunächst genügend Linien in den Profilschans zu identifizieren. Darüber hinaus ist es entscheidend, ob für eine Linie im Profil auch korrespondierende Linien in benachbarten Profilen gefunden werden. Die Abbildung 7.2 (oben) verdeutlicht, für wie viele Linien pro Profil dies in der Szene der Fall ist. Demnach können über den gesamten Messzeitraum - mit wenigen Ausnahmen - mindestens 5 Linien gefunden werden, zu denen auch korrespondierende Linien in benachbarten Profilen existieren. In benachbarten Profilen werden aufgrund der lokalen Abhängigkeit von im Objektraum vorhandenen ebenen Flächenelementen nicht zwangsläufig gleich viele Korrespondenzen gefunden.

Da pro Profil mehrere Linienkorrespondenzen ermittelt werden, werden auch entsprechend viele Rollwinkelgeschwindigkeiten geschätzt. Diese Menge der Geschwindigkeitsbeobachtungen pro Profil bietet die Möglichkeit, eine Variabilität (hier MAD-Wert, s. Gl. 5.31) anzugeben. Damit kann quantifiziert werden, wie einheitlich die

Schätzung der Rollgeschwindigkeit innerhalb eines Profils gelingt. Die Abbildung 7.2 (unten) gibt die MAD-Werte der Rollwinkelgeschwindigkeit für alle Profile an.

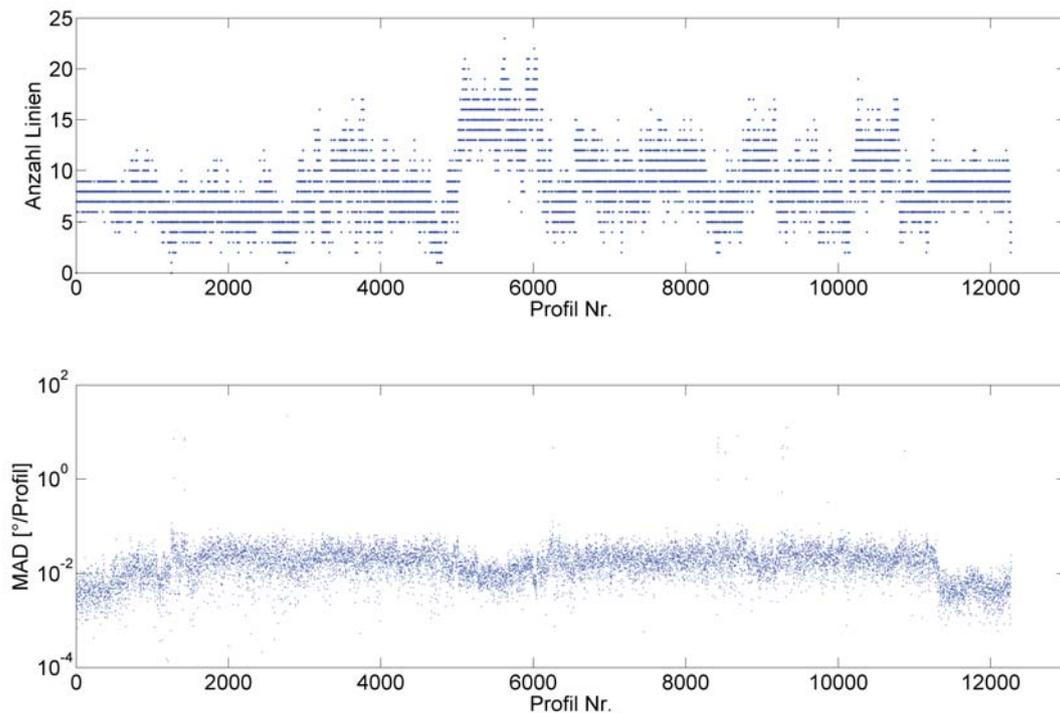


Abbildung 7.2: Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau

Oben: Anzahl der Linien pro Profil, zu denen korrespondierende Linien gefunden wurden

Unten: MAD-Werte der Rollwinkelgeschwindigkeiten über die Anzahl der Profile, pro Profil jeweils geschätzt aus der Menge der korrespondierenden Linien

Abgesehen von wenigen einzelnen Profilen haben die MAD-Werte über die Zeit vergleichbare Größenordnungen. Es fällt auf, dass zu Beginn, im mittleren Teil und am Ende der Fahrt die MAD-Werte kleiner sind; die Rollwinkelgeschwindigkeiten können konsistenter geschätzt werden. In diesen Bereichen fuhr das Fahrzeug langsamer als in den Zwischenbereichen, wodurch sich Linien in benachbarten Profilen ähnlich abbilden.

Insgesamt liegen die MAD-Werte bei ca. 0.01 $^{\circ}$ /Profil, linear fortgepflanzt ergibt dies bei einer Erfassungsfrequenz von 50 Profilen/s ca. 0.5 $^{\circ}$ /s. Diese Abschätzung der Variabilität bildet die Basis, um das stochastische Modell der Rotationsgeschwindigkeiten aufzustellen, das für die Kalman-Filterung zur Kombination mit Inklinometerwerten angesetzt wird.

Ausreißer in den Daten müssen hier nicht auf Basis der Schätzwerte mit deterministischen Annahmen zu einem vorab veranschlagten maximalen Bewegungsverhalten der Plattform gemacht werden. Da pro Profil die Rollwinkelgeschwindigkeiten redundant gesucht werden, kann die Variabilität pro Profil (hier ausgedrückt durch den MAD-Wert) genutzt werden, um auch Ausreißer zu detektieren. Als Obergrenze wird entsprechend der mittlere dreifache MAD-Wert festgelegt. In dieser Szene werden so insgesamt 1.2 % der Geschwindigkeiten als Ausreißer angesehen. Die Existenz der Ausreißer ist abhängig von der Festlegung einer Korrespondenz zwischen den Linien benachbarter Profile. Hier mag eine strengere Definition bzw. die Forderung nach in Fahrtrichtung längeren ebenen Abschnitten (ausgedrückt durch ein größeres δ) eine glättende Wirkung zeigen und zu einer kleineren Anzahl von Ausreißern führen. Jedoch hat dies zur Folge, dass dadurch pro Profil weniger Korrespondenzen definiert werden. Es werden also insgesamt weniger Geschwindigkeiten geschätzt, wodurch der Einfluss von Ausreißern innerhalb eines Profils steigt. Die glättende Wirkung einer größeren Nachbarschaftslänge δ verhindert außerdem, dass auch höherfrequente Änderungen erfasst werden.

Sind für jedes Profil die Rollwinkelgeschwindigkeiten bekannt, kann so über die Zeit aus den kumulierten Geschwindigkeiten der jeweils aktuelle Rollwinkel bestimmt werden. Mit der Scandauer pro Profil Δt gilt:

$$r^{(t)} = \sum_{i=0}^t \dot{r}^{(i)} \Delta t. \quad (7.1)$$

Werden die Rollwinkelgeschwindigkeiten durchgehend in der Einheit [°/Profil] angegeben, vereinfacht sich die Summe zu

$$r^{(t)} = \sum_{i=0}^t \dot{r}^{(i)}. \quad (7.2)$$

Die kumulierten Geschwindigkeiten der Testszene sind in der Abbildung 7.3 enthalten. Angegeben sind drei Varianten mit verschiedenen Nachbarschaftslängen δ und zum Vergleich die Referenzlösung des INS (jeweils zu Beginn der Fahrt zentriert).

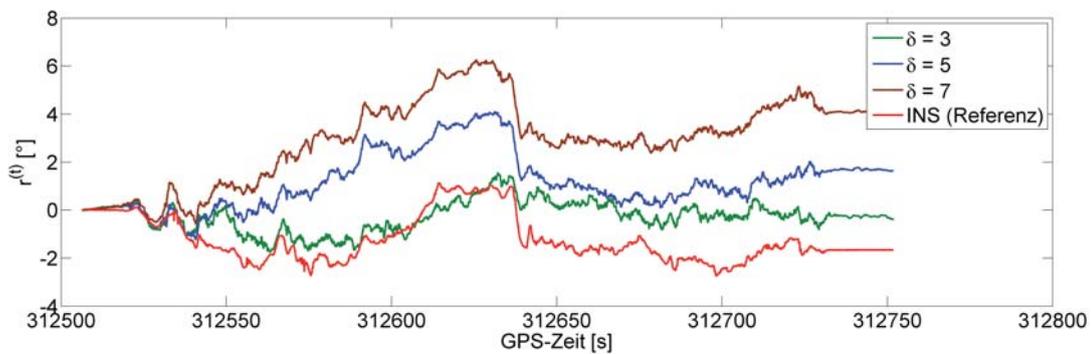


Abbildung 7.3: Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau

Vergleich der Rollwinkel aus den kumulierten Geschwindigkeiten $r^{(t)}$ - geschätzt ausschließlich aus den Profilschans unter Einbezug einer Nachbarschaft der Dauer δ - sowie Referenzlösung des INS (alle Werte zu Beginn der Fahrt einheitlich zentriert)

Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeitsbeträge von der Nachbarschaftslänge δ abhängig sind und dies integriert über die Zeit zu einem deutlich unterschiedlichen Niveau des Rollwinkels führt. Die Lösungen der Nachbarschaftslängen $\delta = 5$ Profile und $\delta = 7$ Profile zeigen einen in weiten Teilen der Referenzlösung ähnlichen Verlauf. In einzelnen Abschnitten (vor allem im vorderen Drittel der Fahrt) treten teilweise größere Abweichungen zur Referenzlösung auf, die dann das unterschiedliche Niveau des Rollwinkels bewirken. Insgesamt ist zu beachten, dass mit der Summation der Geschwindigkeiten auch die Unsicherheiten der Rollwinkel entsprechend fortgepflanzt werden. Die Abbildung verdeutlicht ferner den charakteristischen Verlauf, der sich aus den verschiedenen Nachbarschaftslängen ergibt. Danach resultiert für eine kurze Nachbarschaftslänge (± 3 Profile), die im Raum bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1 m/s einer ebenen Fläche von 14 cm in Fahrtrichtung entspricht, ein höheres Rauschniveau. Dies wird auch deutlich durch die Histogramme der Abbildung 7.4, in denen die Verteilungen der Differenzen der Rollwinkelgeschwindigkeiten zu den Geschwindigkeiten der Referenzlösung des INS visualisiert sind.

Bezogen auf die betrachtete Szene treten die größten Streuungen für die Nachbarschaftslänge $\delta = 3$ Profile auf, bei den beiden größeren Nachbarschaftslängen ($\delta = 5$ und $\delta = 7$ Profile) sind die Verteilungen ähnlich. Für diese beiden Fälle ist in der Abbildung 7.3 auch ein der Referenzlösung genäherter Verlauf erkennbar. Dies gilt vor allem für kurzzeitige Änderungen des Rollwinkels, die vielfach detektiert werden. Diese Eigenschaften entsprechen damit der Erwartung, wonach die höherfrequent aus dem Objektraum geschätzten Geschwindigkeiten in Kombination mit den niederfrequenten Beobachtungen des Inclinometers einen Informationsgewinn darstellen. Mit Blick auf die Histogramme der Abbildung 7.4 und dem der Referenzlösung genähernten Verlauf

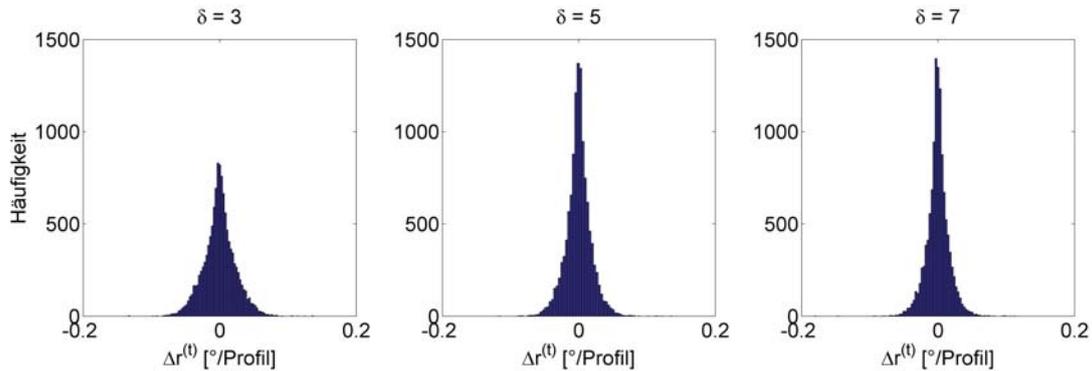


Abbildung 7.4: Histogramme zur den Auswirkungen variabler Nachbarschaftslängen δ auf die Schätzung der Rollwinkelgeschwindigkeiten

Die mittels Scanprofilen bestimmten Rollwinkelgeschwindigkeiten wurden jeweils mit der Referenz (Lösung des INS) verglichen: $\Delta\dot{r}^{(i)} = \dot{r}_{INS}^{(i)} - \dot{r}_{Scan}^{(i)}$.

(Abb. 7.3) wird folgend eine Nachbarschaftslänge von $\delta = 5$ Profile bevorzugt. Das Ergebnis der integrierten Auswertung der heterogenen Daten wird anschließend näher betrachtet.

7.2.2. Kombinierte Filterung

Die Geschwindigkeitsbeobachtungen aus den Profilschans als auch die Inclinometermessung werden in einem gemeinsamen Ansatz kombiniert. Die Beobachtungsanteile werden mit unterschiedlichen Erfassungsfrequenzen registriert. Die mittels Profilschans geschätzten Geschwindigkeiten liegen in der Rate der Profilmessungen (50 rot/s) vor. Die Neigungswerte werden mit einer erheblich niedrigeren Rate erfasst, die sich an der Spezifikation der Frequenzantwort des Sensors orientiert. Danach können bis zu einer Bewegungsfrequenz von 3 Hz noch 90 % des Signals empfangen werden. Als Rate der Neigungsmessungen wurde hier eine Frequenz von 3 Hz gewählt, d. h. Mittelwerte einer Frequenz von 3 Hz repräsentieren die mittels der Erfassungseinheit registrierten höherfrequenten Werte. Je nachdem, ob beide Beobachtungen existent sind oder nicht, werden in der Filterung die Zustände prädiert. Das stochastische Modell der Beobachtungen wird hier für die Geschwindigkeiten - wie in Abschnitt 7.2.1 erwähnt - aus der Verteilung der MAD-Werte mit $\sigma_{\dot{r}} = 0.5 \text{ } ^\circ/\text{s}$ abgeschätzt und für die Beobachtungen der Inclinometermessung wird $\sigma_r = 0.5 \text{ } ^\circ$ angenommen.

Das resultierende Ergebnis der kombinierten Filterung zeigt die Abbildung 7.5 (oben). Dargestellt sind die Einzelwerte der Inclinometermessung, die kombinierte Lösung unter Einbezug der aus den Profilschans geschätzten Geschwindigkeiten sowie als Referenz die gefilterte INS/GNSS-Lösung (prozessiert mit dem Programmsystem Signa, IPGD (Institut für Physikalische Geodäsie Darmstadt), TU).

Insbesondere im vorderen Teil der Fahrt treten Abweichungen auf, deren Beträge bis zu $1 \text{ } ^\circ$ annehmen und teils mehrere Sekunden andauern. Zu diesen Zeitpunkten kommt es zu größeren Abweichungen der Inclinometermessungen, die durch die Beobachtungen der Rollwinkelgeschwindigkeiten nicht vollständig kompensiert werden können. Insgesamt demonstriert der Vergleich mit der Referenz, dass in der kombinierten Lösung das Niveau der Neigung abgebildet werden kann - die absoluten Abweichungen zur Referenz liegen überwiegend im Bereich von einigen $1/10 \text{ } ^\circ$. Auch kurzzeitige, sprunghafte Variationen werden durch die kombinierte Lösung vielfach berücksichtigt.

Die Testgrößen des Verträglichkeitstests (Gl. 3.36) sind in Abbildung 7.5 (unten) illustriert. Gezeigt sind alle Testgrößen, inklusive der Fälle, bei denen aufgrund von Ausreißern keine Updates durchgeführt wurden. Die Verträglichkeit der Messungen mit dem Systemverhalten zeigt sich insbesondere zu Beginn, in der Mitte und am Ende der Fahrt - also bei ruhendem bzw. mäßig bewegtem Fahrzeug. Eine Unverträglichkeit tritt in insgesamt 0.6 % der Epochenanzahl auf und führt dazu, dass zu diesen Zeitpunkten das Varianzniveau des

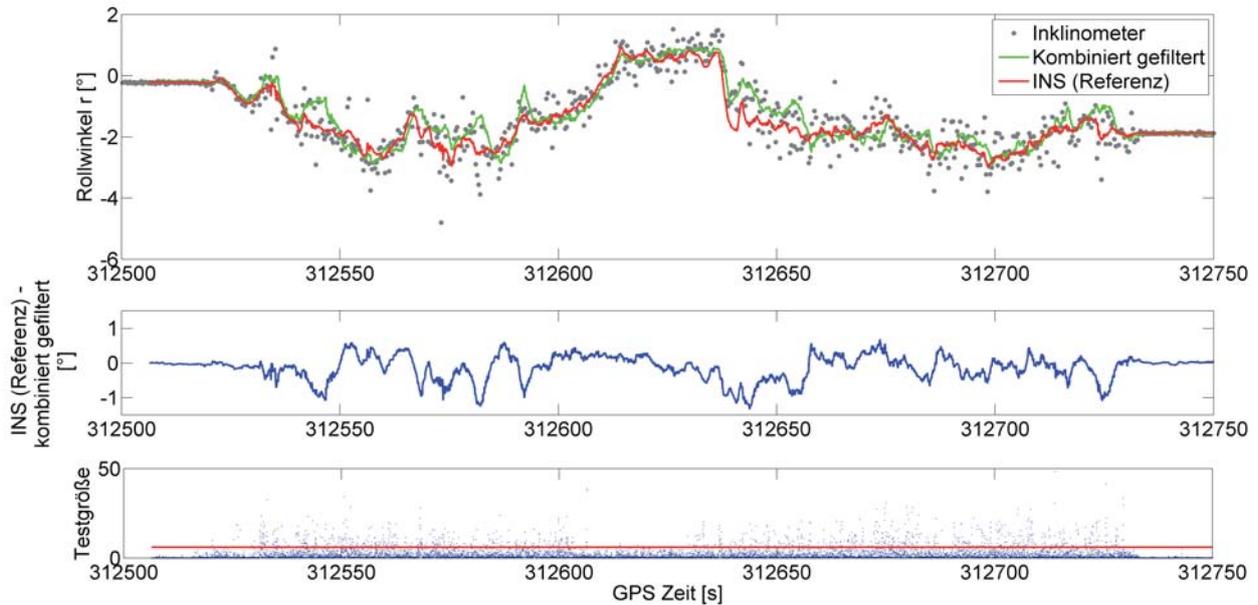


Abbildung 7.5: Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau - Vergleich der Rollwinkel

Oben: Ergebnis der kombinierten Filterung, Inklinometerwerte sowie als Referenz die Rollwinkel der IMU (zum Vergleich alle Größen zu Anfang einheitlich zentriert)

Mittig: Differenzen der Rollwinkel der Referenzlösung und der kombinierten Filterung

Unten: Testgrößen T der Kalman-Filterung (Gl. 3.36, blau) und Quantil $\chi^2_{2,0.95}$ (rot)

Systemzustands heraufgesetzt wird. Welche Auswirkungen dies auf die Varianzen der gefilterten Zustände $\hat{\sigma}_r$ nimmt, verdeutlicht die Abbildung 7.6.

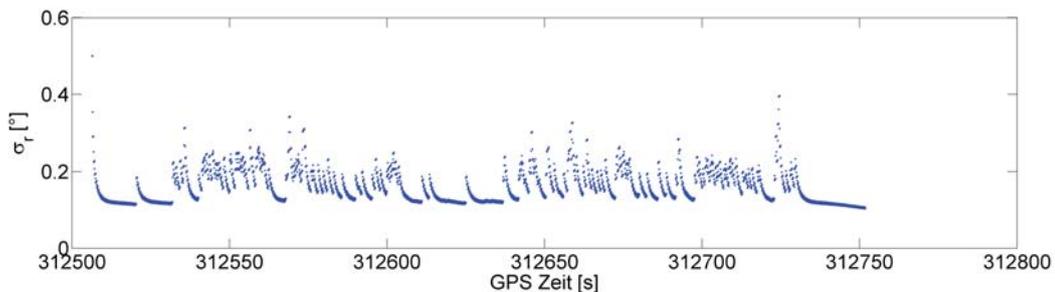


Abbildung 7.6: Varianzen der gefilterten Zustände $\hat{\sigma}_r$

Der Einfluss der Stabilisierung auf das Varianzniveau ist hier offensichtlich. Die Varianzen der gefilterten Zustände liegen hauptsächlich im Bereich zwischen 0.1 und 0.2 °. Eine Unverträglichkeit wird im vorderen, mittleren und hinteren Teil der Fahrt selten festgestellt. In diesen Abschnitten tritt sie dann auf, wenn sich die Varianzen der gefilterten Zustände bis zu einer Größenordnung von ca. 0.1 ° verringert haben. In den Zwischenbereichen - bei höheren Fahrgeschwindigkeiten - kommt es auch bei größeren Varianzen zu Unverträglichkeiten, in diesen Bereichen haben daran die Beobachtungen einen größeren Anteil. Die als signifikant betrachtete Unverträglichkeit des Systemverhaltens kann auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. So wird im Filteransatz ein lineares Systemverhalten vorausgesetzt. Da für die Modellierung sowohl die fahrdynamischen Eigenschaften der Plattform als auch äußere Einflüsse wie der Straßenbelag etc. einen Beitrag zum tatsächlichen Verhalten leisten, ist jedoch eine alternative funktionale Beschreibung nur schwer aufzustellen.

Dazu wäre ein Modell zu formulieren, das die spezielle Dynamik der Plattform unter den gegebenen Belastungszuständen abbildet und physikalisch interpretierbar ist. Darüber hinaus werden hier in der Filterung Annahmen zur Stochastizität der Beobachtungsgrößen getroffen. Es wird davon ausgegangen, dass sie normalverteilt und konstant sind. Zu einer erweiterten Beschreibung des Systemzustands wären hier alternative Filteransätze (wie Partikelfilter) denkbar, um somit ein nicht-lineares Systemverhalten sowie die tatsächliche stochastische Verteilung der Zustände zu berücksichtigen.

7.2.3. Schätzung der Positionen, Azimute und Nickwinkel

Neben den Messungen des Inclinometers, ausgewertet in Kombination mit den Scanprofilen, stützt sich die Positionierung des Systems auf GNSS-Beobachtungen. Die kinematisch prozessierten GNSS-Positionen sollen zudem zur Ableitung der Azimutrichtung der Plattform herangezogen werden (vgl. [HESSE 2007]). Die Azimutrichtung ergibt sich aus dem Quotienten der Geschwindigkeiten in den horizontalen Richtungen (s. Gl. 6.3). Unter der Voraussetzung einer sich bewegenden Plattform wird ein lineares Systemverhalten angenommen, wobei die Geschwindigkeiten im Zustandsraum der Kalman-Filterung geschätzt werden. Anders als bei der Bestimmung der Rollwinkel kann hier von einem glatten Verlauf der Azimutrichtung ausgegangen werden. Diese Annahme ergibt sich daraus, dass durch die Installation auf einer fahrenden Plattform keine plötzlichen Querbeschleunigungen bezüglich der Fahrposition zu erwarten sind, die sich sprunghaft auf die Azimutrichtung auswirken. Zur Beschreibung der Trajektorie werden damit auch Positionslösungen nutzbar, die in einer niedrigeren Frequenz erfasst werden.

Bei einer exzentrisch montierten Antenne beschreibt bei Kurvenfahrt die Antenne nicht den Weg des Zentrums des Laserscanners, sondern den einer Schleppkurve. [HESSE 2007] schätzt anhand von Differentialgleichungen ab, welche Größenordnungen diese Abweichungen annehmen können. Wird nur eine Antenne verwendet, ist der Scanzeitpunkt im Verhältnis zum Zeitpunkt der GNSS-Beobachtung zu korrigieren. Je nachdem, ob die Antenne in Fahrtrichtung vor bzw. hinter dem Scanzentrum installiert ist, kann der Scanzeitpunkt eines Profils mittels Fahrgeschwindigkeit v und Abstand zwischen Antenne und Scanzentrum Δx mit

$$\Delta t = \pm \frac{\Delta x}{v} \quad (7.3)$$

angepasst werden.

Die GNSS-Positionen wurden mit dem Programmsystem Waypoint GrafNav (Firma Novatel Inc.) prozessiert. Nachfolgend werden die resultierenden Azimutrichtungen näher betrachtet, die sich aus den Geschwindigkeiten in beiden Achsrichtungen zusammensetzen. Die Abbildung 7.7 zeigt die per GNSS-Positionen ermittelten Azimutrichtungen, prozessiert für Frequenzen von 1 und 10 Hz. Sie werden verglichen mit der integrierten Lösung des INS/GNSS. Die Abweichungen im mittleren Bereich während der Kurvenfahrt sind vor allem auf eine zu geringe Anzahl sichtbarer Satelliten zurückzuführen. Für die niederfrequente Positionierung kann - auch bei geringer Anzahl prozessierbarer Satelliten - eine bessere Approximation an die Referenzlösung erreicht werden. Sie wird daher zur Festlegung der Elemente der Georeferenzierung bevorzugt.

Mithilfe der Messung des Zwei-Achs-Inclinometers werden auch die Nickwinkel erfasst. Diese werden wie die Rollwinkel mit einer Frequenz von 3 Hz ausgewertet. Die Einzelwerte sowie die gefilterte Reihe sind der Abbildung 7.8 (oben) zu entnehmen.

Im Vergleich zu den Rollwinkeln zeigt die Referenzreihe der Nickwinkel weniger sprunghafte Änderungen. Da Beschleunigungen der Plattform vom Inclinometer nicht von der Neigung getrennt ermittelt werden können, bilden sich diese in den beobachteten Neigungen ab. Dieser Effekt wird beim Blick auf die Geschwindigkeit der Plattform in Fahrtrichtung klar ersichtlich (Abb. 7.8, unten). Eine positive Beschleunigung hat im vorliegenden Aufbau eine negative Neigungsänderung zur Folge (zur quantitativen Abschätzung siehe Abb. 6.2, rechts). Im Vergleich zur Referenz werden die Abweichungen beim Anfahren bzw. beim Bremsen der Plattform deutlich. In der ausgewerteten Szene zeigt sich dies vornehmlich zu Beginn und am Ende der Fahrt.

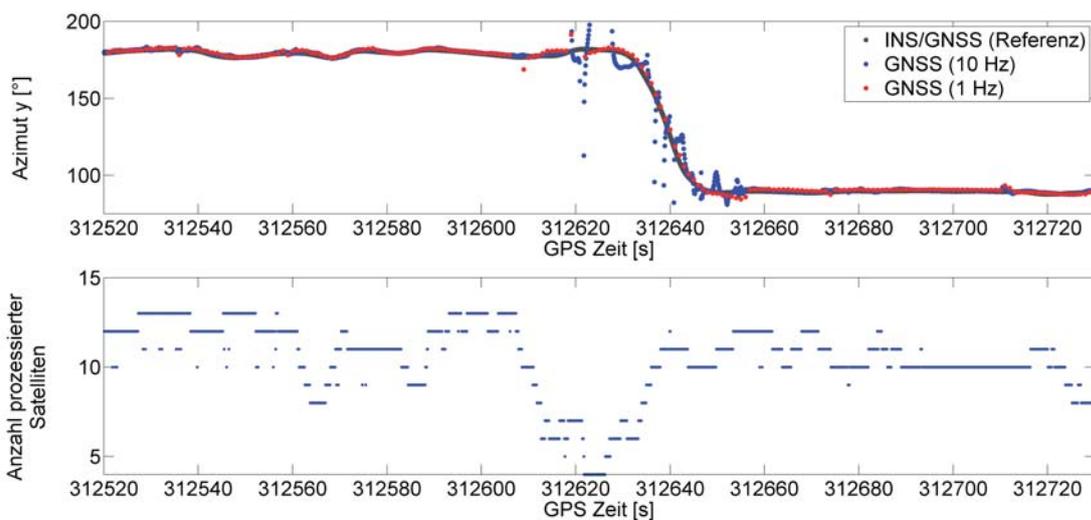


Abbildung 7.7: Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau

Azimute abgeleitet aus gefilterten Positionen (oben) und Anzahl der prozessierten Satelliten pro Epoche (unten)

Werden die Beschleunigungen aus den Positionslösungen geschätzt, können diese grundsätzlich genutzt werden, um die Neigungen zu reduzieren. Zudem bietet dies die Möglichkeit, das stochastische Modell der Neigungsbeobachtungen an die Beschleunigungen zu koppeln. Dies erscheint vor allem bei kurzzeitigen Beschleunigungen während der Fahrt sinnvoll, die sich aufgrund der Trägheit des flüssigkeitsbasierten Inklinometers besonders auf die Neigungsmessung auswirken. Mittels angepasster stochastischer Modellierung - hier Heraufsetzen der Varianzen der Neigungsbeobachtungen zu den Zeitpunkten kurzzeitiger Beschleunigungen - ließe sich der Einfluss folglich mindern.

Die Berechnung der Parameter der Georeferenzierung für jeden einzelnen Scanpunkt ist aufgrund der Menge der trigonometrischen Funktionen aufwendig. Soll alternativ jeweils ein ganzes Scanprofil mittels Matrizenmultiplikation referenziert werden, sind die Geschwindigkeiten der Parameter der Georeferenzierung, d. h. die Änderungen der Parameter innerhalb des Zeitraumes, in der ein Profil gescannt wird, näher zu betrachten. Um die Translation während des Scannens eines Profils zu berücksichtigen, wird deshalb mithilfe der Fahrgeschwindigkeit die Ganghöhe der Helix skaliert. Wie sich die Rotationen innerhalb eines Profilzeitraumes (20 ms) für die ausgewertete Testszene ändern, zeigen die Histogramme in Abbildung 7.9. Die Änderungen ergeben sich aus den Differenzen benachbarter gefilterter INS/GNSS-Lösungen.

In den Nick- und Rollwinkeln betragen die Änderungen maximal $\pm 0.1^\circ$, die Standardabweichungen liegen hier im Bereich von $0.01^\circ - 0.02^\circ$, was im Objektraum bei einer Scanentfernung von 10 m einer Querabweichung von < 5 mm entspricht. Einseitige Häufigkeiten in den Änderungen der Azimutrichtung folgen aus einer entsprechenden Kurvenfahrt der Plattform. Maximale absolute Abweichungen von 0.2° führen bei Scanentfernungen von 10 m zu Querabweichungen von maximal 3 cm. Diese Größenordnungen liegen damit im Bereich der Positionsgenauigkeit der kinematischen GNSS-Lösung.

7.2.4. Vergleich mit Referenzpositionen

Da sich ein Scan aus der Menge der gescannten, referenzierten Einzelpunkte zusammensetzt, ist zu quantifizieren, wie diese Referenzierung für einzelne Punkte gelingt. Dieser Vergleich soll mithilfe von Kontrollpunkten durchgeführt werden. Dazu wurden am Rand der Fahrbahn einzelne Vergleichspunkte (Passpunkte) mittels RTK-Messung über eine Dauer von mehreren Sekunden koordiniert. Die Passpunkte sind im Intensitätsbild der

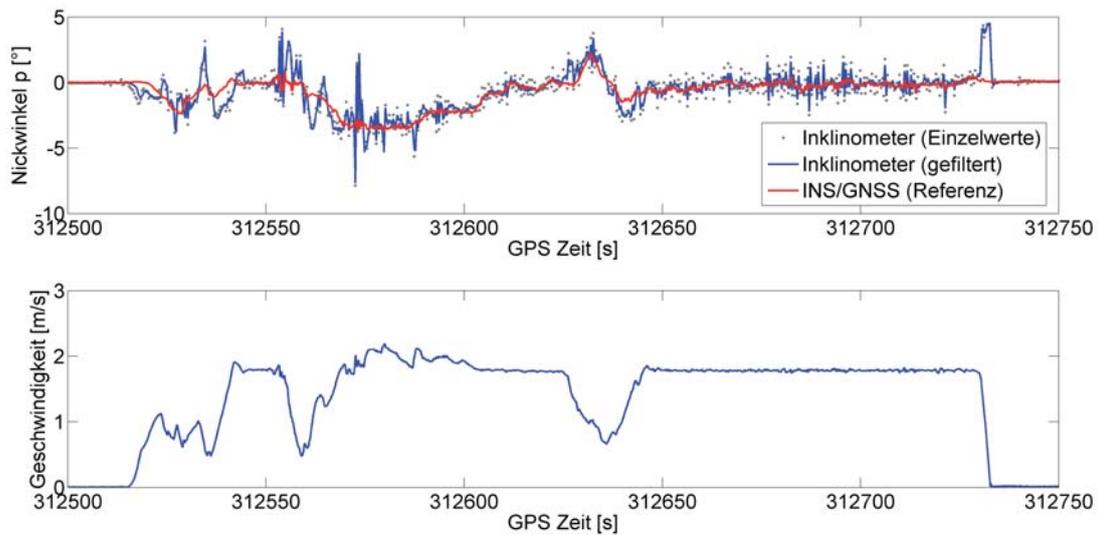


Abbildung 7.8: Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau
 Oben: Nickwinkel (Einzelwerte, gefiltert, Referenz)
 Unten: Geschwindigkeit der Plattform in Fahrtrichtung

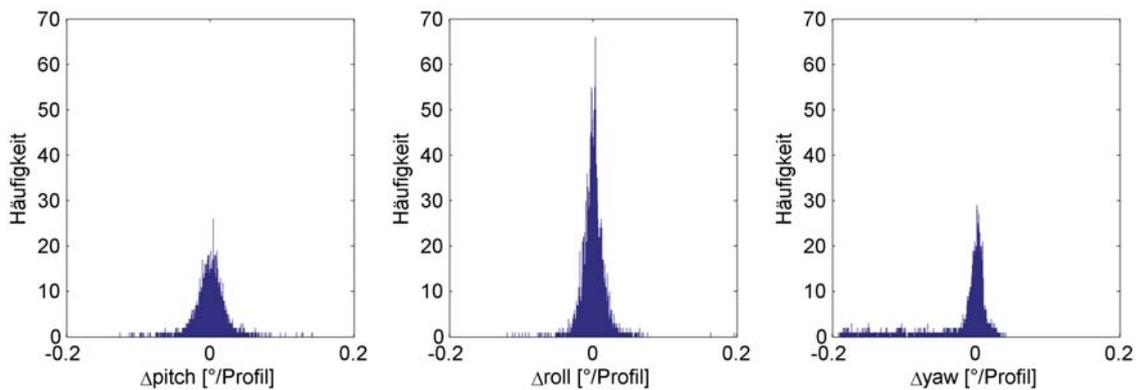


Abbildung 7.9: Häufigkeiten der Änderungen der Rotationen innerhalb eines Profilszeitraumes von 20 ms

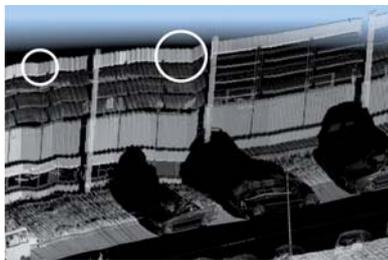
Profilschans erkennbar, so dass damit die Profilvernummer als auch die 2D-Koordinaten im System des jeweiligen Profils gemessen werden können. Die Abweichungen zwischen den einzelnen per Scan (kombinierte Lösung) und per RTK-Messung georeferenzierten Punkten enthält die Tabelle 7.2.

Die Differenzen liegen überwiegend im Bereich von einigen cm. Die entspricht damit der erreichbaren Unsicherheit der kinematischen GNSS-Positionierung. Auch die Abweichungen in der Höhenkomponente sind etwas größer als charakteristisch für die Positionierung mittels GNSS. Größere Differenzen in Ost-West-Richtung treten vor allem bei Punkten auf, die am Ende der Fahrt gescannt wurden. Zu diesem Zeitpunkt fuhr das Fahrzeug langsamer, wodurch die Azimutrichtung aus den GNSS-Positionen nur mit einer größeren Unsicherheit abgeleitet werden kann. Die Passpunkte lagen in Fahrtrichtung beidseitig der Fahrbahn. Das Fahrzeug fuhr beim Scannen der Punkte 8, 9 und 10 in Ost-West-Richtung, fehlerhaft bestimmte Azimutrichtungen wirken sich demnach hauptsächlich auf die Ost-West-Koordinate der transformierten Punkte aus.

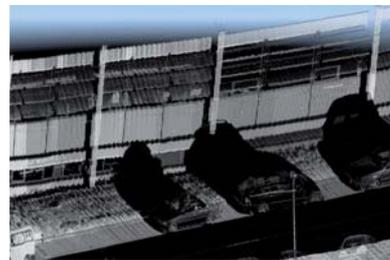
Die Punktwolke wurde zweifach berechnet: Dabei wurden die Neigungen mit und ohne Berücksichtigung der aus den Profilschans geschätzten Rollwinkelgeschwindigkeiten quantifiziert. Welche Unterschiede sich für die betrachtete Testszene in der resultierenden Punktwolke zeigen, veranschaulicht die Abbildung 7.10.

Punktnummer	dN (North) [cm]	dE (East) [cm]	dh (Height) [cm]	Profilnummer
1	0.9	2.6	-9.6	852
2	0.5	-4.9	-11.1	1264
3	-1.6	13.5	-10.7	1839
4	2.6	17.3	-7.4	2553
5	1.4	1.0	-4.2	3137
6	-0.2	8.2	-18.7	6720
7	4.7	9.8	-12.2	7967
8	12.5	22.9	12.0	10986
9	-2.9	25.0	-6.6	11020
10	4.0	18.1	-11.2	11146

Tabelle 7.2.: Differenzen in den Kontrollpunkten (UTM-Abbildung mit ellipsoidischen Höhen)



Punktwolke referenziert mit Neigungen, die ausschließlich aus Inklinometerwerten bestimmt wurden



Punktwolke als Ergebnis der kombinierten Georeferenzierung

Abbildung 7.10: Auswirkungen eines nicht vollständig erfassten Rollverhaltens der Plattform

Werden höherfrequente Änderungen der Neigungen nicht erkannt bzw. treten fehlerhafte Beobachtungen auf, ist dies in den georeferenzierten Punktwolken bei langgestreckten Objekten direkt ersichtlich. Bei der kombinierten kinematischen Georeferenzierung setzen sich die resultierenden Rollwinkel sowohl aus den Beobachtungen der Geschwindigkeiten als auch aus denen der Neigungsmessung zusammen. Dies bietet in Kombination mit der Beschreibung des Systemverhaltens in der Kalman-Filterung die Möglichkeit, fehlerhafte Beobachtungen zu detektieren. Der Mehrwert der zusätzlichen Geschwindigkeitsbeobachtungen wird noch deutlicher, wenn das System auf einer kleineren Plattform montiert wird, für deren Fahrdynamik erheblich höhere Neigungsänderungen typisch sind. Dies verdeutlicht die folgende Testszene.

7.3. Testszene: Hannover Neues Rathaus

Die Notwendigkeit, höherfrequente Rollbewegungen zu erfassen, wird durch die Abbildung 7.11 sofort nachvollziehbar. Bei der Aufnahme der Fassade des Neuen Rathauses Hannover war das System aus Scanner und referenzierenden Sensoren auf einem Handwagen installiert. Die Fahrt auf der Fahrbahnoberfläche aus kleinteiligem Naturstein regte die Eigenschwingung des Handwagens an, deren Auswirkungen auf den Profilschann im Intensitätsbild unmittelbar erkennbar werden. Diese höherfrequenten Anteile des Rollverhaltens des Wagens sind mit dem verwendeten Inklinometer nicht erfassbar. Dies äußert sich auch in einem höheren Rauschniveau der Inklinometermessung. Genutzt wurden daher Neigungswerte, die durch Mittelwerte gebildet wurden und eine Frequenz von 1 Hz aufweisen.

Bei der Identifikation der Liniensegmente wurden die gleichen Erwartungen an die im Objektraum vorhandenen ebenen Teilflächen formuliert wie in Abschnitt 7.2: Die Mindestgröße ebener Flächen wird demnach mit

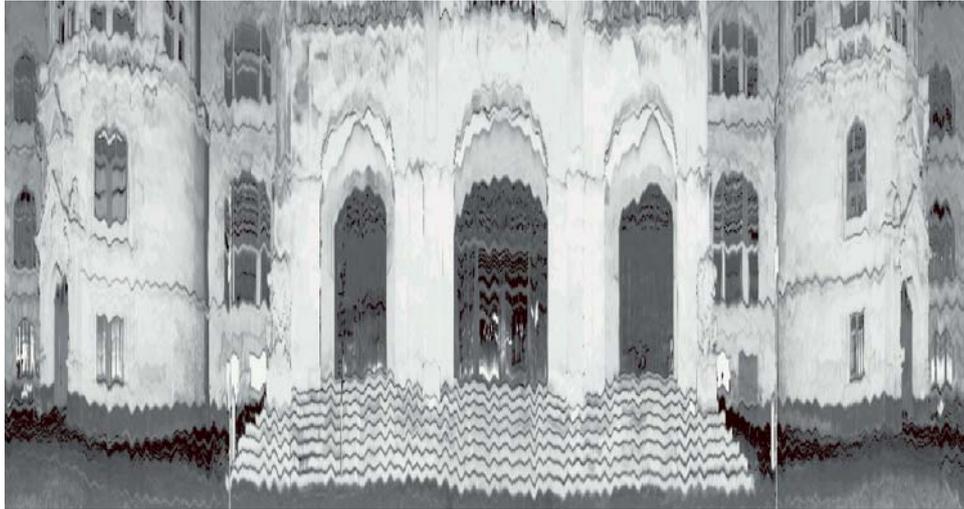


Abbildung 7.11: Intensitätsbild des Profilschans vom Eingangsbereich Neues Rathaus Hannover
Spalten des Bildes entsprechen einzelnen Scanprofilen

20×20 cm veranschlagt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit der Plattform von 1 m/s entspricht dies damit einem Suchzeitraum von jeweils 100 ms vor und nach dem Messzeitpunkt eines Profils.

Einen exemplarischen Vergleich zwischen den integrierten Geschwindigkeiten, die ausschließlich durch Profilschans berechnet wurden, und der Referenzlösung der Rollwinkel aus dem INS/GNSS (Lösungen ausgewertet mit dem Programmsystem Waypoint Inertial Explorer, Firma Novatel Inc.), zeigt die Abbildung 7.12.

Die Ähnlichkeit der Zeitreihen ist auch hier erkennbar. Wenngleich mittels linienbasierter Schätzung aus Scanprofilen die Beträge der Geschwindigkeiten nicht immer vollständig herausgebildet werden, kann insgesamt die Charakteristik des höherfrequenten Rollverhaltens rekonstruiert werden. Angemerkt sei zudem, dass in dieser Szene keinerlei Ausreißer deklariert wurden. Ein schwankendes fahrdynamisches Verhalten, ausgelöst durch die Fahrt über das Kopfsteinpflaster, wirkt sich in diesem Fall vorteilhaft aus. Die höheren Signalanteile können eindeutig aufgelöst werden. Dies setzt voraus, dass trotz der stärker ausgeprägten Rollbewegung ausreichend Korrespondenzen gefunden werden. Dies ist prinzipiell abhängig von der geometrischen Objektstruktur und von der Fahrgeschwindigkeit der Plattform.

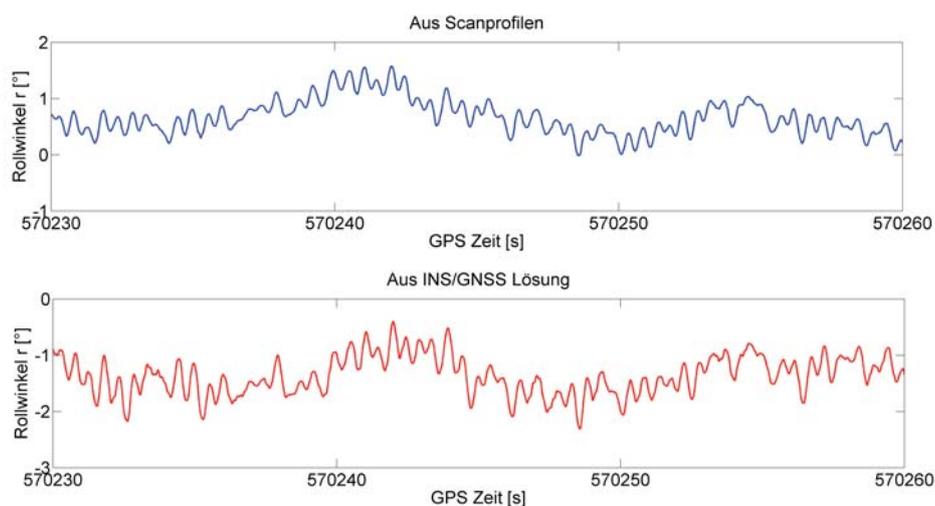


Abbildung 7.12: Szene Hannover Neues Rathaus
Exemplarischer Vergleich (30 Sekunden) der Rollwinkel geschätzt aus integrierten Geschwindigkeiten mittels Scanprofilen (oben) und aus der INS/GNSS-Lösung (unten)

Zur kombinierten Filterung werden die Varianzen der Beobachtungen höher veranschlagt. Dieser Ansatz folgt sowohl aus einem höheren Niveau der MAD-Werte, die aus der Menge der Rollwinkeländerungen pro Profil geschätzt werden (Gl. 5.31) als auch aus einem höheren Rauschniveau der Neigungsmessung, bei der aufgrund der flüssigkeitsbasierten Inklinometermessung höherfrequente Einflüsse nicht aufgelöst werden können. Im stochastischen Modell werden die Standardabweichungen der Beobachtungen der Neigungen daher mit 1.25° bzw. mit $1.25^\circ/\text{s}$ für die Geschwindigkeiten angesetzt.

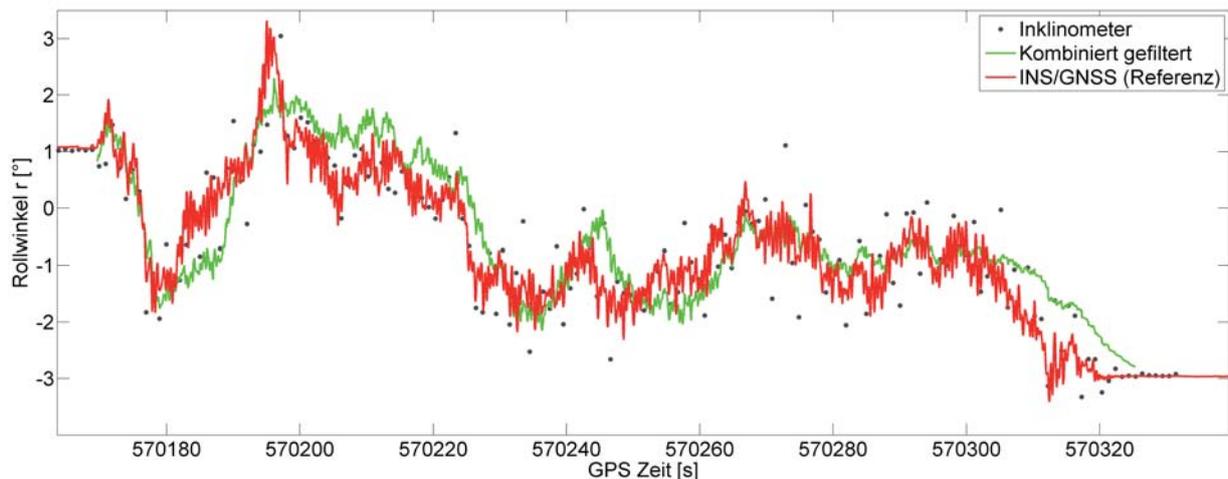


Abbildung 7.13: Szene: Hannover Neues Rathaus - Kombinierte Lösung des Rollwinkels sowie Referenz aus INS/GNSS

Das Ergebnis der kombinierten Filterung zeigt die Abbildung 7.13. Im Vergleich zur Referenzlösung folgt die kombinierte Lösung in weiten Teilen dem tatsächlichen Verlauf des Rollwinkels. Dabei wird der absolute Neigungswert der integrierten Geschwindigkeiten über die Neigungsmessungen gestützt. Insgesamt kann die Amplitude der höherfrequenten Schwingung nicht immer erreicht werden. Im tieffrequenten Verlauf zeigt die gefilterte Lösung teilweise einen zeitlichen Versatz zur Referenz. Die durch das höhere Rauschniveau begründeten größeren Varianzen der Inklinometermessung bewirken, dass sich zeitweilig der gefilterte Systemzustand erst verspätet dem tatsächlichen Zustand anpasst. Zudem führt dies dazu, dass auch höherfrequente Anteile in der gefilterten Lösung nicht vollständig abgebildet werden. Dieser geglättete Verlauf verstärkt sich zunehmend mit der Zeit, der Beitrag der Beobachtungen zur Filterung des Systemzustands wird demnach geringer.

Prinzipiell erscheint daher eine modifizierte Konfiguration bei der Aufnahme sinnvoll: Anstatt die Plattform durchgängig fortzubewegen, bieten kurze, zwischenzeitliche Stopps die Möglichkeit, die Neigung bezogen auf die Gravitation wieder festzulegen. Werden diese Ruhezeiten vorab in den Beobachtungen detektiert (z. B. aus dem Vergleich zeitlich benachbarter Messungen), kann dies durch eine veränderte Transitionsmatrix unter Einbezug einer Null-Geschwindigkeit berücksichtigt werden. Diese Anpassung entspricht dem Vorgehen beim ZUPT (*zero velocity update*) der Kalman-Filterung des INS/GNSS. Obendrein berechtigen die Ruhephasen zu einer weiteren Modifikation, nämlich: zu einer Verminderung der Varianzen im stochastischen Modell der Neigungsbeobachtungen. Somit kann erreicht werden, dass in kurzer Zeit die Abweichung der gefilterten Lösung von der tatsächlichen Neigung verringert wird.

Als Ergebnis der kombinierten kinematischen Georeferenzierung zeigt die Abbildung 7.14 die zugehörige Punktwolke und daraus Detailansichten der Fassade, die die Auswirkungen der gefilterten Zustände der Referenzierung auf das Objektmodell veranschaulichen.



Abbildung 7.14: Szene Hannover Neues Rathaus - Gesamtansicht (links) und Detailansichten der Fassade (rechts) - Punktwolke berechnet mittels kombinierter kinematischer Georeferenzierung

7.4. Testszene: Hannover Hauptbahnhof

Als letzte Szene zur Validierung sollen Scans des Hauptbahnhofs Hannover näher betrachtet werden. Der Hauptbahnhof wurde dazu sowohl im Außenbereich (Ernst-August-Platz) als auch im Innenbereich (Bahnhofsvorhalle, Verteilerebene etc.) erfasst. Im Innenbereich stützte sich die Navigationslösung ausschließlich auf die inertielle Messung. Da die Verteilerebene zweimal durchfahren wurde, sind auch hier Vergleiche zwischen beiden Referenzierungen möglich.

7.4.1. Ernst-August-Platz

Der Vorplatz des Hauptbahnhofs Hannover (Ernst-August-Platz) ist mit geschliffenem Betonstein gepflastert. Dadurch wird im Vergleich zur Fahrt vor dem Neuen Rathaus durch den Handwagen nur eine geringe Schwingung erzeugt. Die größeren ebenen Teilflächen des Bodens berechtigen zur Annahme, dass die Suche nach Korrespondenzen zwischen Linien auf eine größere Nachbarschaft ausgedehnt werden kann. Die mittels kombinierter Georeferenzierung ermittelten Rollwinkel werden deshalb mehrfach, d. h. für verschiedene Nachbarschaftslängen δ geschätzt. Die Ergebnisse der Varianten zeigt die Abbildung 7.15. In Analogie zur Szene aus Abschnitt 7.2 wurde hier für die Neigungsmessung wiederum eine Frequenz von 3 Hz gewählt. Ansonsten werden die Standardabweichungen der Neigungen bzw. der Neigungsgeschwindigkeiten ebenfalls - wie für diese Plattform üblich - mit 1.25° bzw. $1.25^\circ/s$ quantifiziert.

Insgesamt ist bei der Gegenüberstellung der resultierenden Rollwinkel folgendes auffällig:

- Zu Beginn der Fahrt werden durch das Inklinometer Neigungen registriert, die räumlich nicht vorhanden sind und durch den erwähnten Einfluss der Beschleunigungen (hier Wenden der Plattform im kleinen Kurvenradius) verursacht werden. Die Nutzung der Objektrauminformation wirkt diesem Einfluss entgegen, die kombinierte Filterlösung zeigt einen der Referenzlösung genäherten Verlauf.
- Werden nur in der Nachbarschaft $\delta = 1$ Profile korrespondierende Linien gesucht, folgt daraus ein flacherer Verlauf der gefilterten kombinierten Lösung. Zudem werden insbesondere im ersten Drittel der Fahrt niederfrequente Änderungen der Neigung nicht immer durchgängig erfasst. Bei einer kurzen Nachbarschaftslänge, die im Objektraum auf in Fahrtrichtung kleineren Flächenelementen basiert, entsteht ein höheres Rauschniveau, der Anteil der Beobachtungen an der Filterung nimmt somit ab.

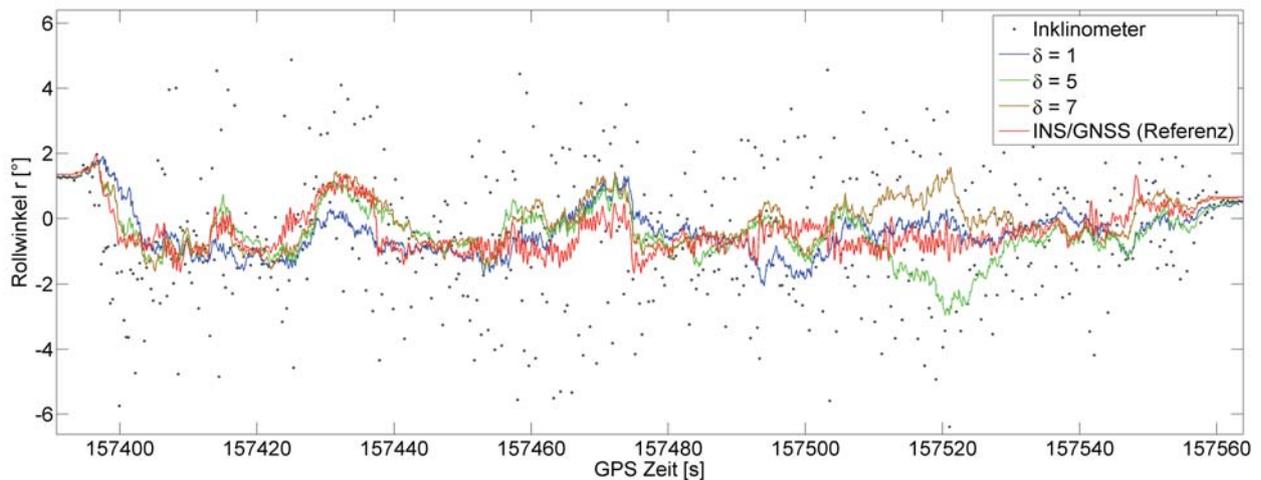


Abbildung 7.15: Szene: Hannover Vorplatz Hauptbahnhof - Kombinierte Lösung des Rollwinkels im Vergleich zur Referenz aus INS/GNSS

- Auswirkungen einer größeren Nachbarschaftslänge ($\delta \geq 5$) werden vorwiegend im letzten Drittel der Fahrt deutlich. Hier zeigt sich, dass die gefilterte Lösung teilweise zu nicht existenten Ausschwingungen tendiert, die zeitweilig zu Abweichungen bis ca. 1° gegenüber der Referenzlösung führen können. Aufgrund einer größeren Nachbarschaftslänge und einer damit verbundenen höheren Anforderung an die in der Szene enthaltenen ebenen Teilflächen, ist die Anzahl der Korrespondenzen pro Profil folglich geringer, wodurch Einflüsse einzelner fehlerhafter Geschwindigkeitsbeobachtungen zunehmen.

Ein charakteristisches Rollverhalten der Plattform wird durch die Abbildung 7.16 deutlich. Anhand eines hochpassgefilterten Abschnitts von 15 Sekunden wurden die Frequenzspektren aus der Inklinometermessung, aus den Scanprofilen (aus kumulierten Geschwindigkeiten) und aus der Lösung des INS/GNSS berechnet.

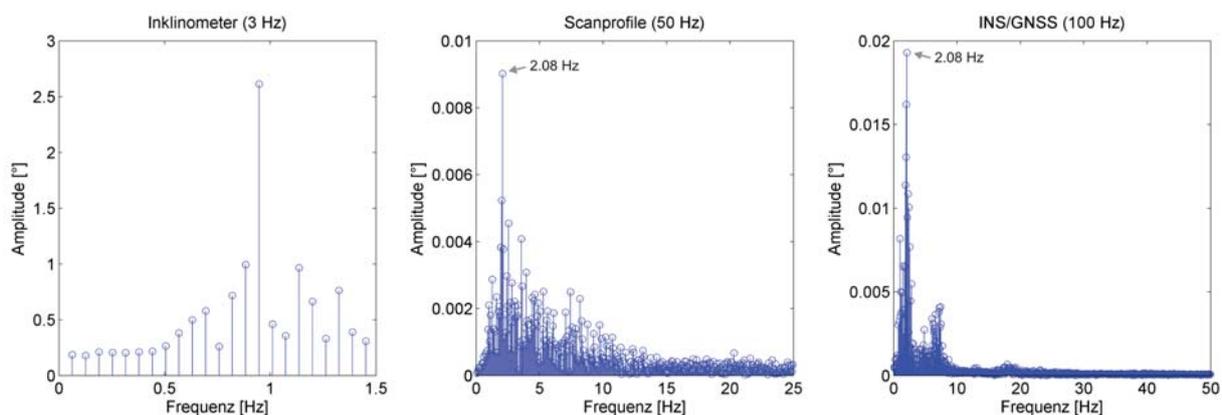


Abbildung 7.16: Spektren des Rollwinkelverhaltens eines Abschnitts von 15 Sekunden - berechnet aus Inklinometermessung (links), aus Scanprofilen (mittig) und aus der Lösung des INS/GNSS (rechts)

Demnach ist sowohl aus der Lösung des INS/GNSS als auch aus den Scanprofilen eine dominante Frequenz von ca. 2 Hz deutlich ersichtlich, auch wenn im Fall der Scanprofile die Amplitude geringer ausgeprägt ist. Diese Eigenfrequenz des Handwagens zeigt sich auch bei anderen Testfahrten (vgl. Abb. 7.12). Mithilfe der Inklinometermessung, für die zur Reduktion des Rauschniveaus eine Abtastrate von 3 Hz verwendet wurde, ist diese Frequenz aufgrund des Nyquist-Theorems (z. B. [WELSCH et al. 2000]) nicht erfassbar. Stattdessen zeigt sich eine dominante Frequenz um ca. 1 Hz als Folge des Alias-Effektes (z. B. [WELSCH et al. 2000]).

Zudem tritt hier aufgrund der Trägheit der flüssigkeitsbasierten Inklinometermessung eine erheblich größere Amplitude auf. Es wird hier deutlich, dass einerseits ein Rollverhalten mithilfe einer Inklinometermessung nicht vollständig erfasst werden kann und dass andererseits durch die Verwendung von Scanprofilen charakteristische dominante Frequenzen eindeutig erkennbar sind.

Für den Vergleich auf Basis transformierter Punkte wurden auf dem Bahnhofsvorplatz ebenfalls eine Reihe von Kontrollpunkten mittels RTK-Messung koordiniert. Die Differenzen zwischen so bestimmten Koordinaten gibt die Tabelle 7.3 wieder. Außerdem zeigt diese Tabelle die Differenzen zu den Punkten, die mittels INS/GNSS georeferenziert wurden.

Punkt- nummer	Kombinierte Georeferenzierung				Georeferenzierung mittels INS/GNSS		
	dN (North)	dE (East)	dh (Height)	Profil- nummer	dN (North)	dE (East)	dD (Down)
	[cm]	[cm]	[cm]		[cm]	[cm]	[cm]
1	4.2	-7.1	-3.6	841	-5.0	-0.8	-7.7
2	8.5	-8.5	3.4	965	-1.9	3.4	-3.6
3	32.6	-37.4	11.3	1088	-5.3	1.2	-6.1
4	4.8	-5.2	0.8	1187	-7.4	2.6	-2.9
5	-2.7	2.6	-5.6	1280	-4.6	0.4	-2.3
6	9.8	-6.8	-3.1	1386	-5.9	2.0	-3.1
7	-14.9	10.8	-5.0	1608	-3.9	1.9	2.0
8	-11.5	4.1	1.1	1722	-3.9	1.2	0.4
9	5.8	0.4	9.7	1921	-3.2	7.6	1.0
10	-9.7	11.6	6.7	2447	0.1	0.0	8.0
11	-20.2	35.6	3.3	2933	-4.3	8.0	-1.5
12	6.3	-4.7	-2.8	3570	-5.1	3.1	1.0
13	6.1	5.1	-3.2	4030	-5.4	6.7	-0.9
14	12.5	-7.0	-0.6	6596	-0.8	4.8	5.6
15	-1.2	11.8	-5.6	7044	6.0	4.5	3.8
16	0.9	-1.5	-1.8	7130	-4.2	2.7	-0.8
17	-1.7	0.7	-3.7	7205	-5.2	3.2	0.6
18	-4.0	-0.4	-1.5	7274	-7.5	2.6	-3.1
19	3.9	-3.4	-2.6	7362	-3.8	2.3	-0.3
20	8.1	-5.1	2.0	7431	-6.8	4.0	-3.5
21	2.8	-4.7	0.8	7497	-8.2	5.6	-1.6
22	1.6	-0.2	-1.6	7562	-6.7	1.9	-2.1
23	4.2	3.2	-6.7	7630	-7.4	3.4	-0.7
24	3.9	-1.5	-8.0	7709	-5.7	2.3	0.9
25	-0.3	-1.1	-9.0	7785	-7.5	3.8	2.8
26	-4.0	4.8	-10.5	7867	-6.3	4.0	1.5
27	-0.5	7.9	-10.9	7984	-5.9	4.3	2.5

Tabelle 7.3.: Differenzen in den Kontrollpunkten aus kombinierter kinematischer Georeferenzierung (UTM-Abbildung mit ellipsoidischen Höhen) und Georeferenzierung mittels INS/GNSS (Navigations-System, North-East-Down NED)

In den durch die kombinierte Georeferenzierung koordinierten Punkten liegen die Abweichungen vorwiegend im Bereich von einigen cm. In der Lage (East, North) treten vornehmlich bei Punkten, die zu Beginn bzw. in der Mitte der Fahrt gescannt wurden, größere Differenzen auf. Diese Unterschiede können insbesondere auf die Ableitung der Azimutrichtung aus den GNSS-Positionen zurückgeführt werden. Gerade zu Beginn der Fahrt (bei geringerer Fahrgeschwindigkeit) kann somit konfigurationsbedingt die Azimutrichtung nur unsicher geschätzt werden. Dies gilt auch für den mittleren Teil der Fahrt, bei dem aufgrund von Abschattungen kurz-

zeitig nicht ausreichend Satelliten beobachtbar waren und daher größere Abweichungen in der Positionierung resultieren.

Bei den Höhendifferenzen, die neben der Höhenkomponente der GNSS-Positionierung vor allem durch die Schätzung der Rollwinkel geprägt werden, variieren die Abweichungen - abgesehen von den genannten Zeitpunkten - im cm-Bereich. Darüber hinaus entsprechen die Abweichungen von einigen cm dem Unsicherheitsniveau, das für die kinematische Prozessierung von GNSS-Positionen typisch ist.

Bei der Georeferenzierung mittels INS/GNSS zeigt sich eine einseitige Häufung von Differenzen in Süd- bzw. in Ostrichtung. Obwohl für beide Georeferenzierungen die gleichen GNSS-Positionen zugrunde liegen, ist bei der kombinierten Georeferenzierung diese Systematik nicht erkennbar. Da zudem die Kontrollpunkte beidseitig der Trajektorie verteilt wurden, können diese nicht durch systematische Richtungsabweichungen verursacht werden. Die translatorischen Abweichungen lassen sich demnach auf Restabweichungen in der Systemkalibrierung oder auf die Auswertung der kinematischen GNSS-Positionen zurückführen.

Der Vergleich der Koordinaten mehrfach georeferenzierter Punkte ermöglicht eine durchgreifende Kontrolle der Beobachtungen der Georeferenzierung. Dies gilt für die kombinierte kinematische Georeferenzierung als auch für die integrierte Lösung des INS/GNSS. Wie durch den hier durchgeführten Vergleich deutlich wird, können dadurch Systematiken erkannt werden. Da aufgrund der kinematischen Aufnahme der Abstand der referenzierten Punkte durch die Fahrgeschwindigkeit respektive Rotationsgeschwindigkeit des Umlenkspiegels vorgegeben ist, limitiert dies die Auflösung der per Scan referenzierten Kontrollpunkte. Sollen die Abweichungen darüber hinaus auch oberhalb dieser Auflösung erkennbar werden, sind zukünftig speziell für den kinematischen Einsatz konzipierte Zielzeichen zu entwickeln. Für beide Vorgehensweisen der Georeferenzierung entsteht dadurch die Möglichkeit, in Anlehnung an die Erläuterungen in Abschnitt 6.3 die Größen der Systemkalibrierung und die charakteristischen Systemeigenschaften auch oberhalb der räumlichen Auflösung des referenzierten Punktmodells zu detektieren.

7.4.2. Innenraum: Bahnhofshalle und Verteilerebene

In Ergänzung zu den vorherigen Außenraumaufnahmen soll als Abschluss der Validierungsmessungen auf die Aufnahme des Innenraumes des Hauptbahnhofs Hannover eingegangen werden. Die Georeferenzierung erfolgte im Innenraum ausschließlich über das INS, da dort keine präzise kinematische GNSS-Positionierung möglich ist. Betrachtet wird ein extremer Fall, bei dem das Scanmodell bei kontinuierlicher Fahrt von ca. 180 Sekunden Dauer georeferenziert wurde. Die Abbildungen 7.17 vermitteln einen Eindruck vom hohen Detailgrad der Punktwolken.

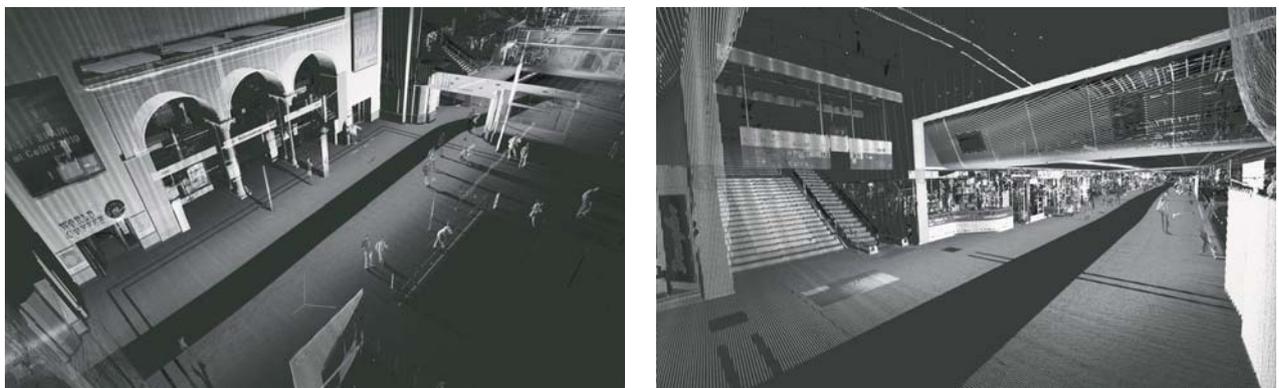


Abbildung 7.17: Hauptbahnhof Hannover: Bahnhofshalle (links) und Verteilerebene (rechts)

Zu Beginn und am Ende der Fahrt wurde jeweils ein Alignment von ca. 8 Minuten durchgeführt. Mit dem Alignment ist der Bezug des Body-Systems des INS zum Referenzsystem hergestellt. Die Zustände wurden in

der Kalman-Filterung vorwärts und rückwärts gefiltert und geglättet (RTS-Smoother [RAUCH et al. 1965]). Bei der Glättung werden sämtliche zur Verfügung stehenden Messwerte für die Schätzung der Zustände eingesetzt. Für die Positionen des Messsystems resultieren danach folgende Unsicherheiten (Abb. 7.18).

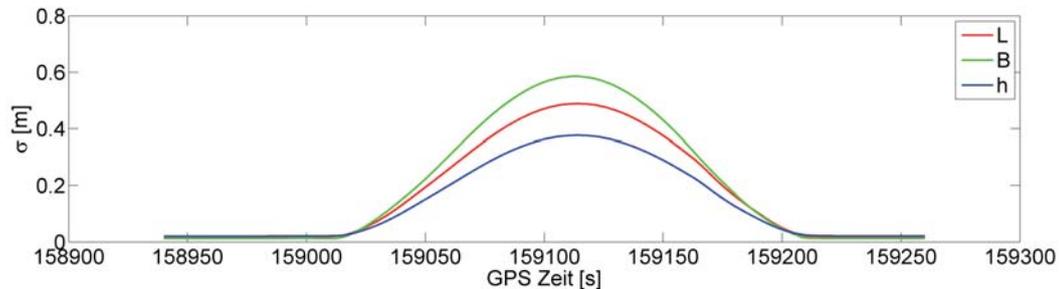


Abbildung 7.18: Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum - Standardabweichungen der Positionen nach Filterung und Glättung bei kontinuierlicher Fahrt des Messsystems (Länge (L), Breite (B), Höhe (h))

Die Änderungen der Standardabweichungen sind typisch für eine kontinuierliche Fahrt. In den einzelnen Richtungen erreichen die Standardabweichungen vergleichbare Beträge von maximal ca. 0.5 m. Insgesamt betragen im vorderen bzw. letzten Viertel der Fahrt die Standardabweichungen ca. 1-2 cm, was die hohe Güte der Inertiallösung unterstreicht. Begünstigt durch die glatte Fahrbahnoberfläche liegen die Standardabweichungen der Roll- und Nickwinkel für die gesamte Fahrt in einem Bereich von $\hat{\sigma}_{r,p} \approx 0.001^\circ$ bzw. $\hat{\sigma}_y \approx 0.07^\circ$. Resultierende Unsicherheiten in den georeferenzierten Scanpunkten sind daher vorrangig auf Unsicherheiten der Positionierung des Systems zurückzuführen.

Zum Vergleich wurde der Innenraum des Hauptbahnhofs wiederholt gescannt, wobei während der zweiten Fahrt der gegenüberliegende Teil der Verteilerebene befahren wurde, um so das gescannte Modell zu vervollständigen. Da die zweite Fahrt von ähnlicher Dauer ist und aufgrund des gleichen Fahrbelags vergleichbare fahrdynamische Eigenschaften vorliegen, ist das Varianzniveau der gefilterten Positionslösungen dem der Abbildung 7.18 ähnlich. Bei den so zweifach gescannten Objekten ist damit ein relativer Vergleich der georeferenzierten Positionen möglich. Typische Abweichungen zwischen georeferenzierten Objektpunkten zwischen beiden Fahrten zeigt exemplarisch die Abbildung 7.19. Die Abstände zwischen Punkten, die einander aus beiden Scans zugeordnet werden können, liegen im zu erwartenden Bereich von einigen dm.



Abbildung 7.19: Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum: Typische Distanzen zwischen zweifach erfassten Punkten
Links: Anzeigetafel Richtung Bahnsteig
Rechts: Werbetafel beidseitig von beiden Fahrtrichtungen aus aufgenommen

Die Ergebnisse verdeutlichen die konzeptionellen Möglichkeiten, mit inertialen Messeinheiten konsistente Modelle von Innenräumen zu erfassen. Offensichtlich kann danach die Erfassungskonfiguration angepasst werden, so dass anstatt einer mehrminütigen kontinuierlichen Fahrt zwischenzeitliche Stopps (zur Durchführung von ZUPTs) eingelegt werden. Darüber hinaus kann die Konsistenz einer mehrfach gescannten Szene auch mittels Koordinatenupdates erreicht werden, die nicht unmittelbar über die Positionierung der Plattform, sondern über Positionen mehrfach gescannter Objekte erfolgen. Zur Suche korrespondierender Objektpunkte bieten - wie hier deutlich wird - auch mehrminütige Fahrten bei ausschließlicher Nutzung des INS gute Näherungswerte. Ferner lässt der Verlauf des Varianzniveaus (Abb. 7.18) erwarten, dass die Koordinatenupdates nur selten (z. B. minütlich) notwendig sind.

Der Beitrag, den die kombinierte Auswertung von Inclinometermessungen und Scanprofile zur Referenzierung leisten kann, soll hier auch für Innenräume näher betrachtet werden. Dazu wird zunächst die Prozessierung der Profilschans näher untersucht. Innenräume weisen vielfach flächenhafte ebene Strukturen auf. Dies gilt sowohl für Boden-, Wand- als auch für Deckenbereiche. Diese typischen Eigenschaft der im ganzen Umkreis eines Profils liegenden ebenen Flächenteilstücke begünstigen die Suche nach Linienelementen. Für die Scanprofile des Innenraums des Hauptbahnhofes zeigt die Abbildung 7.20 (oben) sowohl die Anzahl insgesamt identifizierter Linien als auch die Anzahl der korrespondierenden Linien pro Profil. Die Nachbarschaftslänge beträgt hier $\delta = 5$, d. h. in fünf benachbarten Profilen werden Korrespondenzen gesucht. An den Anzahlen sind die Übergänge zwischen den Objektbereichen Außenraum, Bahnhofshalle und Verteilerebene deutlich erkennbar. Im Außenbereich vor Einfahrt in die Bahnhofshalle werden rund 5 Korrespondenzen definiert, deren Menge bei Einfahrt in die Bahnhofshalle deutlich steigt (hier bis ca. 15). Insgesamt werden durchschnittlich ca. 8-9 korrespondierende Linien ermittelt. Pro Profil werden ca. 2-3 Profile mehr identifiziert als korrespondierende Linien gefunden, d. h. ca. 70-80 % der Linien können zur Geschwindigkeitsschätzung herangezogen werden.

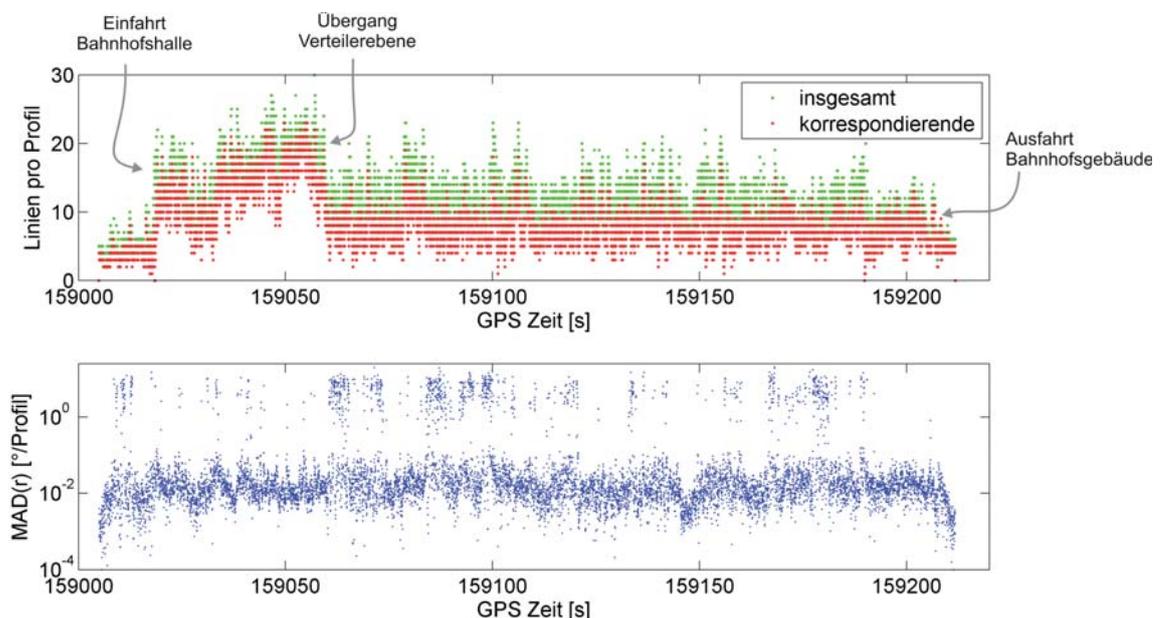


Abbildung 7.20: Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum

Oben: Anzahl insgesamt gefundener und Anzahl korrespondierender Linien pro Profil

Unten: MAD-Werte der Rollwinkelgeschwindigkeiten geschätzt aus der Menge der Linien pro Profil

Dieser Verhältnis der nutzbaren Linien ist nicht nur abhängig von der Ausdehnung stückweise ebener Flächen im Raum. Bedeutsam ist auch die Strategie zur Korrespondenzdefinition. Im vorliegenden Beispiel wurde die Suche über einem konstanten Zeitraum ausgedehnt. Hier erscheint ein alternatives Vorgehen förderlich, um den Anteil nutzbarer Linien zu erhöhen: Eine Auswertung, die enger zwischen Geschwindigkeitsschätzung mittels

Scanprofilen und der Filterung des Zustands der Plattform gekoppelt ist. Dazu ist also das dynamische Verhalten der Plattform zu integrieren, um darauf basierend zu entscheiden, wo bzw. über welchen Zeitraum Korrespondenzen gesucht werden. So ist bei einer höherfrequenten Dynamik bzw. Fahrgeschwindigkeit der Plattform der Suchzeitraum zu verkürzen oder es sind auch höhere Momente (Beschleunigung, Ruck) zu schätzen. Ein ruhiges Bewegungsverhalten hingegen erlaubt es, die Suche auch über längere Zeiträume auszudehnen.

Neben der Linienanzahl zeigt die Abbildung 7.20 (unten) die zugehörigen MAD-Werte, ermittelt aus der Menge der geschätzten Rollwinkelgeschwindigkeiten pro Profil. Sie betragen überwiegend ca. $0.01^\circ/\text{Profil}$. In einzelnen Bereichen treten Abweichungen in den Größenordnungen oberhalb von $1^\circ/\text{Profil}$ auf (5 % aller Profile). Zu diesen Größenordnungen kommt es vornehmlich in verengten Abschnitten der Verteilerebene, in denen zudem laufende Passanten nahe am Scanzentrum erfasst wurden.

Zur Kennzeichnung nutzbarer Linien ist eine Analyse in lokaler Nachbarschaft hilfreich, um zu erkennen, wo sprunghafte Änderungen auftreten. Diese Nachbarschaft ist prinzipiell nicht nur über die Profile, sondern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, der Entfernung und der Änderung der Ausrichtung der Plattform, ergo im dreidimensionalen Raum zu definieren. Neben einer verbesserten Referenzierung bieten die Linien und deren veränderliche Lage und Ausrichtung im Raum die Möglichkeit, Objekte zu klassifizieren. Dies kann verwendet werden, um beispielsweise Personen für ein Scanmodell zu extrahieren bzw. zu deklarieren.

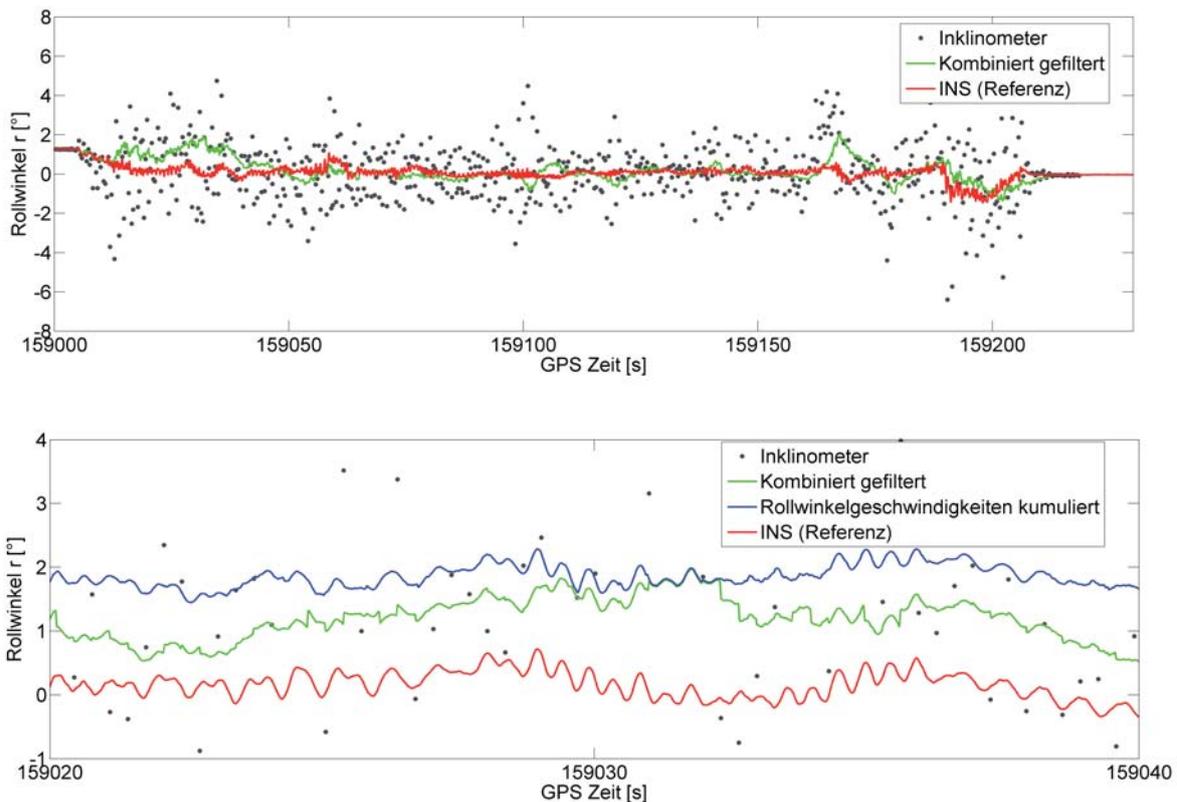


Abbildung 7.21: Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum - Vergleich der Lösungen der Rollwinkel (oben: gesamte Fahrt, unten: vergrößerter Ausschnitt von 20 s)

Die gefilterten Rollwinkel der kombinierten kinematischen Georeferenzierung und zum Vergleich die Referenzlösung des INS zeigt die Abbildung 7.21 (oben).

Die exemplarische Vergrößerung (Abb. 7.21, unten) verdeutlicht erneut, dass ein höherfrequentes Verhalten durch Schätzung der Geschwindigkeiten aus den Scanprofilen abgeleitet werden kann. In der gefilterten Lösung dagegen wird gerade der höherfrequente Anteil nicht immer abgebildet. Zudem treten - im vorderen Teil der

Fahrt sowie zwischenzeitlich für einige Sekunden - zeitweilig Abweichungen von der Referenzlösung auf, die bis zu 1° betragen können. Die kumulierten Geschwindigkeiten zeigen, dass diese vornehmlich durch die Geschwindigkeitsschätzung verursacht werden. Dies unterstreicht, dass zukünftig die Korrespondenzsuche unter Einbezug der Fahrdynamik und einer detaillierteren Analyse ebener Flächenstücke im Raum gestaltet werden sollte.

Insgesamt legen die Abbildungen anschaulich dar, wie sich mithilfe der Geschwindigkeitsschätzung aus Scanprofilen auch höherfrequente Auslenkungen ($> 1 \text{ Hz}$) kleinerer Ausprägung ($< 1^\circ$) bestimmen lassen und belegen damit den Mehrwert zur Lösung der Georeferenzierung.

8. Schlussbemerkungen

8.1. Resümee

Terrestrische Laserscanner liefern durch steigende Datenraten die Voraussetzungen, um räumliche Modelle zunehmender Auflösung zu erfassen. Zudem erhöhen sich mit der Fortentwicklung der Laserscanner die Messgenauigkeiten einzelner Beobachtungen. An die direkte Georeferenzierung werden dadurch höhere Anforderungen gestellt. Dies gilt besonders, wenn Laserscanner zur effizienten Erfassung einer großräumigen Umgebung auf einer bewegten Plattform eingesetzt werden. Daher werden für diese Aufgabe neben GNSS-Sensoren vielfach hochwertige inertielle Messeinheiten integriert. Der Einsatz dieser Sensoren ist indes kostenintensiv. Dies betrifft neben den hohen Anschaffungskosten auch hohe Aufwendungen zum Erwerb der notwendigen Fachkenntnisse zur Bedienung und zur integrierten Auswertung.

Die in dieser Arbeit verwendete Systemimplementierung beinhaltet als georeferenzierende Sensoren einen GNSS-Empfänger, Inklinometer sowie ein inertiales Messsystem. Werden bei kontinuierlicher Messung von einer bewegten Plattform ausschließlich die Beobachtungen des GNSS-Empfängers und der Inklinometer verwendet, ist der Informationsgehalt nicht ausreichend, um das Bewegungsverhalten der Plattform hinreichend abzubilden. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit ein Ansatz vorgestellt, der auch die Aufnahmen des scannenden Sensors nutzt, um die Aufgabe der Georeferenzierung zu lösen. Als Messmodus wurde der vertikal ausgerichtete 2D-Modus eines Laserscanners gewählt, so dass in der Fortbewegung der Plattform die gescannten Einzelpunkte im Raum die Form einer Helix beschreiben. Obwohl die Messungen des Laserscanners lokalen Charakter haben und obwohl im fahrenden Einsatz aufgrund der kinematischen Aufnahme Objekte nicht redundant, d. h. an gleichem Ort mehrfach gescannt werden, können Scanprofile (hier erfasst mit einer Rate von 50 Profilen/s) als Beobachtungen zur Georeferenzierung genutzt werden. In dem vorgestellten Ansatz wurden nicht die einzelnen Profilszenen betrachtet, sondern die Änderungen zwischen Profilszenen, aus denen sich Rotationsgeschwindigkeiten der Plattform ableiten lassen. Die Geschwindigkeiten wurden aus Objektmerkmalen wie stückweise ebenen Flächen geschätzt, die sich in den Profilschans als Linienelemente abbilden. Dies setzt eine Prozessierung der Profilschans voraus, die auch für hochaufgelöste Profile (hier ca. 8.600 Punkte/Profil) eine effiziente Identifikation von Linienelementen ermöglicht. Um die integrierten Rotationsgeschwindigkeiten während der Fahrt zu stützen und um Neigungen bezüglich der Gravitationsrichtung angeben zu können, wurde zusätzlich ein Zwei-Achs-Inklinometer einbezogen, mit dem die Neigungen niederfrequent aufdatiert wurden. Die heterogenen Beobachtungsgrößen wurden in einer kombinierten Kalman-Filterung fusioniert. Diese vorgestellte Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung wurde in verschiedenen Testszenarien mithilfe einer prototypischen Systemimplementierung mehrfach erprobt. Die Schätzungen der Parameter der Georeferenzierung wurden mit unabhängig bestimmten Lösungen einer INS/GNSS-Auswertung validiert.

Als zentrale Aussagen kann danach zusammenfassend folgendes festgehalten werden:

- Auch im Fall hochaufgelöster Profile können Linienelemente echtzeitnah - inklusive der stochastischer Größen der Linienparameter - identifiziert werden. Unter Einbezug der stochastischen Eigenschaften der Parameter und auf Basis statistischer Tests kann die Liniensuche in einer gestuften Prozessierung konzipiert und umgesetzt werden, so dass letztlich für die Identifikation der Merkmale vorab keine deterministischen Annahmen getroffen werden müssen. In den untersuchten Szenen konnten - in den Außenbereichen als auch in Innenräumen - genügend ebene Teilflächen gefunden werden (pro Profil ≥ 5), die annehmen lassen, dass für eine überwiegende Anzahl von bebauten Umgebungsstrukturen die Voraussetzungen für das Verfahren gegeben sind.
- Zur Ableitung der Rollwinkelgeschwindigkeiten sind Annahmen zur Ausdehnung der stückweise im Objektraum vorhandenen ebenen Flächen zu treffen. Bezogen auf die Profilschans bedeutet dies, dass die

Suche nach korrespondierenden Linien auf eine definierte Nachbarschaftslänge auszudehnen ist. Im verwendeten Systemaufbau liefern in den Testfahrten Nachbarschaftslängen, die im Raum ebene Teilflächen einer Ausdehnung in Fahrtrichtung von ca. 20-30 cm voraussetzen, eine ausreichende Anzahl von Korrespondenzen, um daraus Rollwinkelgeschwindigkeiten schätzen zu können.

Allerdings ist in der kombinierten Kalman-Filterung das stochastische Modell der Beobachtungen den fahrdynamischen Eigenschaften der Plattform und der Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit anzupassen. In der gefilterten kombinierten Lösung zeigen sich Abhängigkeiten von der Länge der Korrespondenzsuche, die teilweise zu längerfristigen (mehrsekündigen) Abweichungen von 1° von der Referenzlösung führen können.

- Fahrten auf unebenen Fahrbahnen, die ein Rollverhalten höherer Amplituden anregen, begünstigen die Schätzung der Rollwinkelgeschwindigkeiten aus den Scanprofilen. Dies ist vornehmlich vorteilhaft für den Einsatz auf nicht gedämpften Plattformen. Jedoch wird in der kombinierten Filterlösung mit einem linearen dynamischen Ansatz das höherfrequente Verhalten nicht vollständig abgebildet. Dies zeigt sich besonders für längere (mehrminütige) kontinuierliche Fahrten, in deren Verlauf die gefilterte Lösung nicht durchgängig die höherfrequenten Anteile enthält.

Insgesamt können durch Nutzung von Scanprofilen charakteristische Frequenzen der Rollbewegung einer Plattform deutlich erkannt werden. Mit der kombinierten kinematischen Georeferenzierung wird somit die Möglichkeit geschaffen, auch ein höherfrequentes Bewegungsverhalten (> 1 Hz) aufzulösen und zur Lösung der Georeferenzierung einzubeziehen.

Wesentlicher Bestandteil einer Auswertung ist in der Ingenieurgeodäsie die Quantifizierung von Unsicherheiten der Zielgrößen. Dies gilt im Besonderen für Multi-Sensor-Systeme, bei denen Beobachtungen einer Menge von Sensoren zu einer gemeinsamen Lösung fusioniert werden. Resultierende Unsicherheiten sind dabei nicht pauschal, sondern situativ anzugeben. Enthalten Multi-Sensor-Systeme außerdem hochfrequent erfassende Sensoren, steigt mit der Menge der erzeugten Daten ebenfalls der Aufwand zur Berechnung der Unsicherheiten.

Diese genannten Voraussetzungen sind typisch für Mobile-Mapping-Systeme. Im Hinblick darauf wurden in dieser Arbeit inklusive zweier Varianten der unverzerrten Transformation mehrere Möglichkeiten gezeigt, mit denen Varianzen massenhaft effizient fortgepflanzt werden können. Außerdem wurde eine inkrementelle Variante der linearen Varianzfortpflanzung eingeführt, bei der die Linearisierung der Jacobi-Matrix lokal approximiert wird. Die empirische Anwendung auf ein Mobile-Mapping-System zeigt, dass damit im Vergleich zum klassischen Ansatz weniger als $1/6$ der Rechenzeit benötigt wird. Des Weiteren können für die betrachtete Anwendung die Beträge der Abweichungen zwischen den klassisch und den inkrementell fortgepflanzten Varianzen vernachlässigt werden.

Zur Präsentation der Ergebnisse wurde mit der stochastischen Punktwolke eine Variante vorgestellt, mit der die Beträge der Varianzen in einem räumlichen Modell unmittelbar sichtbar werden. Durch die Darstellungsform wird es möglich, massenhafte stochastische Ergebnisse übersichtlich und direkt zu veranschaulichen.

8.2. Ausblick

Als Ausblick lassen sich folgende Empfehlungen zur Weiterentwicklung der hier behandelten Themenbereiche aufzeigen.

Die kombinierte kinematische Georeferenzierung wurde eingesetzt, um aus der Menge der Linienkorrespondenzen Winkelgeschwindigkeiten zu schätzen. Darüber hinaus sollte zukünftig untersucht werden, inwieweit sich aus den Korrespondenzen zusätzlich translatorische Geschwindigkeiten ableiten lassen. Diese können genutzt werden, um auch die Positionierung einer Plattform zu stützen. Dies erscheint vor allem zweckmäßig, wenn die Scanebene horizontal ausgerichtet ist. Damit wird das Element der vorgestellten Geschwindigkeitsschätzung auch für alternative Plattformen nutzbar, die sich ohne GNSS positionieren. Mögliche Einsatz-

gebiete sind Adaptionen auf fahrenden Robotersystemen als auch auf unbemannten Luftfahrzeugen (*unmanned aerial vehicle, UAV*) inklusive derjenigen kleiner Bauart (*mini/micro aerial vehicle, MAV*).

Bei den MAVs werden zur Berechnung der Azimutrichtung vielfach Erdmagnetfeldsensoren eingesetzt. Da jedoch das Erdmagnetfeld in der Nähe metallischer Objekte und damit vor allem in Innenräumen gestört ist, bieten hier Profilschans eine zusätzliche Stützung. Bezüglich der Festlegung der korrespondierenden Linien wäre es vorteilhaft, wenn die Suche dynamisch gestaltet wird und dabei das Bewegungsverhalten der Plattform als auch die Objektstruktur einbezogen wird.

Werden größere Nachbarschaftslängen definiert, berechtigt dies zu der Annahme, dass auch höhere Ableitungen wie Beschleunigungen geschätzt werden können. Analog den GNSS/INS-Integrationsstrategien führt dies zu einer engeren Kopplung der Filterung mit der Prozessierung der Scanprofile. Es ist zu erwarten, dass eine dynamische Korrespondenzsuche vor allem für Schwebepattformen einen Mehrwert darstellt, da das Bewegungsverhalten von horizontalen und insbesondere auch von vertikalen Translationen geprägt ist.

Zur Filterung der heterogenen Beobachtungselemente aus Winkelgeschwindigkeiten und Neigungen wurde das stochastische Modell für alle Beobachtungen einheitlich festgelegt. Der vorgestellte Ansatz zur Linienidentifikation liefert die Voraussetzungen, um die Beobachtungen der Winkelgeschwindigkeiten stochastisch individuell zu modellieren. Dabei ist zu untersuchen, wie sich für die jeweiligen Objektraumstrukturen die stochastischen Eigenschaften der Linienparameter und die räumliche Ausdehnung einzelner Liniensegmente auf die Unsicherheiten der geschätzten Winkelgeschwindigkeiten auswirken.

In Konsequenz zur Entwicklung hin zur Methode der kombinierten kinematischen Georeferenzierung (vgl. Abb. 1.1), können schließlich auch objekterfassende Sensoren Beiträge zur Referenzierung liefern, die von globalem Charakter sind. Möglich wird dies durch eine semantische Analyse, durch die beispielsweise aus Annahmen zum waagerechten bzw. lotrechten Verlauf von Boden- respektive Wandflächen direkt auf die Ausrichtung der Plattform im erdfesten System geschlossen wird. Schließlich bieten Änderungen der Linienparameter korrespondierender Linien die Möglichkeit, Formen im Objektraum zu erkennen und damit Objekte semantisch zu kennzeichnen.

Bei der Unsicherheitsbetrachtung für hochaufgelöste Massendaten wurde für die inkrementelle Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung eine Linearisierungsstrategie gewählt, die sich am polaren Aufnahmeverfahren orientiert und Scanprofile in gleiche Kreissegmente unterteilt. Für einen allgemeinen Ansatz - unabhängig von Aufnahmeprozess und Sensor - ist dazu die Änderung der Jacobi-Matrix im Ortsraum näher zu analysieren, um darauf basierend eine optimierte Verteilung der Entwicklungsstellen zu wählen. Numerisch betrachtet wird dies über einen Ansatz möglich, bei dem die Entwicklungsstellen rekursiv im Ortsraum verdichtet und die Suchrichtungen über die höheren Ableitungen vorgegeben werden.

Die empirischen Untersuchungen verdeutlichen, welche Beiträge die hier entwickelten Ansätze auch für den Einsatz hochauflösender Sensoren zur Georeferenzierung leisten können. Dies bezieht sich sowohl auf die entwickelte kombinierte Auswertestrategie als auch auf die Quantifizierung resultierender Varianzen georeferenzierter Punkte. Insgesamt werden sich mit der Fortentwicklung der Sensortechnologie die Anforderungen, die Relevanz und die Möglichkeiten der Verfahren hier behandelte Themenbereiche weiter erhöhen.

A. Anhang

A.1. Rotationsmatrizen

Die implementierten Rotationsmatrizen für die Transformation ins erdfeste System gem. Gl. 2.20 lauten (s. dazu auch die systembezogenen Eigenschaften in [HEINZE 1996]):

Rotation um Z-Achse der Scanners

$$\mathbf{R}_{s2d}^s((r_z)_{s2d}^s) = \begin{bmatrix} \cos r_Z & -\sin r_Z & 0 \\ \sin r_Z & \cos r_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Rotation Scanner- zu Body-System

$$\mathbf{R}_s^b((r_{xyz})_s^b) = \begin{bmatrix} \cos r_Z \cos r_Y & \sin r_Z \cos r_X + \cos r_Z \sin r_Y \sin r_X & \sin r_Z \sin r_X - \cos r_Z \sin r_Y \cos r_X \\ -\sin r_Z \cos r_Y & \cos r_Z \cos r_X - \sin r_Z \sin r_Y \sin r_X & \cos r_Z \sin r_X + \sin r_Z \sin r_Y \cos r_X \\ \sin r_Y & -\cos r_Y \sin r_X & \cos r_Y \cos r_X \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Rotation Body- zu Navigations-System

$$\mathbf{R}_b^n(r p y) = \begin{bmatrix} \cos p \cos y & \cos y \sin r \sin p - \cos r \sin y & \sin r \sin y + \cos r \cos y \sin p \\ \cos p \sin y & \cos r \cos y + \sin r \sin p \sin y & \cos r \sin p \sin y - \cos y \sin r \\ -\sin p & \cos p \sin r & \cos r \cos p \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Rotation Navigations-System ins erdfeste System (ECEF)

$$\mathbf{R}_n^e((\phi\lambda)_b) = \begin{bmatrix} -\cos \lambda \sin \phi & -\sin \lambda & -\cos \phi \cos \lambda \\ -\sin \phi \sin \lambda & \cos \lambda & -\cos \phi \sin \lambda \\ \cos \phi & 0 & -\sin \phi \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

A.2. Spezifikationen der eingesetzten Sensoren

A.2.1. Terrestrischer Laserscanner: Zoller und Fröhlich Imager 5006

Eindeutigkeitsbereich	79 m			
Distanzmessrate	max. 500.000 Punkte/s			
Sichtfeld	310 ° (vertikal) 360 ° (horizontal)			
Auflösung Winkelmessung	0.0018 ° (vertikal und horizontal)			
Auflösung Distanzmessung	0.1 mm			
	Reflektivität /			
	Entfernung	10 %	20 %	100 %
Entfernungsrauschen (RMS bei Messrate von 125.000 Punkten/s)	10 m	1.2 mm	0.7 mm	0.4 mm
	25 m	3.0 mm	2.0 mm	1.0 mm
	50 m	7.5 mm	4.0 mm	2.5 mm
Winkelgenauigkeit (RMS, vertikal und horizontal)	0.007 °			
Umgebungstemperatur für Betrieb	0° C - 40° C			

Tabelle A.1.: Technische Angaben des Herstellers zum Laserscanner Z+F Imager 5006

A.2.2. Inklinometer: NS15 DMG 15-U

Messbereich	±15°	
Ausgang	0.5 - 4.5 V	
Auflösung	0.001 °	
Genauigkeit (-25°C bis 40°C)	0.12 ° ($ \phi \leq 10^\circ$)	0.22 ° ($ \phi > 10^\circ$)
Kreuzsensitivität (Verhältnis der Sensitivitäten bei Neigungen quer zur sensitiven Achse)	1.4 %	
Reaktionszeit (bei plötzlicher Neigung von 5° bei 25°C)	1.5 s (bis Näherung < 10 %)	2.5 s (bis Näherung < 1 %)
Initialer Offset (Nullpunktwiederholbarkeit)	±0.17 °	

Tabelle A.2.: Charakteristische Eigenschaften des Inklinometers NS15-DMG2-U (Herstellerangaben)

A.2.3. Inertiale Messeinheiten: Honeywell Lavernav II und iMAR iNAV-RQH-1003

	Typ	Honeywell Lasernav II GG 1342AE	iMAR iNAV-RQH-1003
Drehratensensor	Datenrate	50 Hz	300 Hz
	Auflösung	0.001 °	0.0003 °
	Bias (Stabilität)	0.008 °/h (1 σ) (mit Temperaturkomp.)	0.002 °/h (konstante Temperatur)
	Random walk	0.002 °/ \sqrt{h} (1 σ)	< 0.002 °/ \sqrt{h}
	Skalenfaktor	5 ppm (1 σ)	< 5 ppm
Beschleunigungssensor	Bias (Stabilität)	< 0.06 mg	< 0.01 mg
	Skalenfaktor	< 150 ppm	< 100 ppm

Tabelle A.3.: Spezifikationen (nach Datenblättern) der eingesetzten inertialen Einheiten

Abbildungsverzeichnis

1.1. Typische Funktionszusammenhänge erfassender und referenzierender Sensoren für die kinematische Umgebungserfassung auf Basis von Laserscannern	10
2.1. Symbolisierte Zusammenhänge der Themen des Kapitels 2	13
2.2. Ablenkungsvariationen für bewegte Plattformen	19
2.3. Strategien zur örtlichen und zeitlichen Zuordnung terrestrischer Laserscans	20
2.4. Exemplarische Mobile-Mapping-Systeme mit Georeferenzierung	26
2.5. Transformation zwischen Zeitsystemen	28
2.6. Erreichbare räumliche und zeitliche Auflösungen typischer in der Ingenieurgeodäsie eingesetzten Sensoren	32
2.7. Relation zwischen Koordinatensystemen in Multi-Sensor-Systemen (in Anlehnung an [FOPPE et al. 2004])	34
2.8. Unsicherheitsmodellierung für terrestrische Laserscans	35
3.1. Ablauf des algorithmischen Differenzierens am Beispiel der Koordinatentransformation (Verkettung elementarer Funktionen)	41
4.1. Relationen eines Multi-Sensor-Systems	47
4.2. Ablauf: Unverzerrte Transformation	49
4.3. Linearisierung der Jacobi-Matrix für polar scannende Aufnahmesysteme. Die rot gezeichneten Punkte werden als Entwicklungsstellen verwendet, für die übrigen Punkte (blau) wird eine Jacobi-Matrix gemäß Gl. 4.14 genähert.	53
4.4. Vergleich der Rechenzeiten zur Berechnung der fortgepflanzten Varianz-Kovarianz-Matrizen [Punkte/min]	53
4.5. Differenz der mittleren Koordinatenunsicherheit berechnet in den Varianten des UT (links), Differenz der mittleren Koordinatenunsicherheit berechnet mittels klassischer VKF und i-VKF (mittig) und Verteilung der mittleren Koordinatenunsicherheit der ausgewerteten Szene (rechts)	54
4.6. Farbcodierte mittlere Koordinatenunsicherheit $\bar{\sigma}$ von gescannten Punkten (s. Gl. 4.17) - dargestellt an einer Kurvenfahrt eines Mobile-Mapping-Systems [Campus TU-Darmstadt (Lichtwiese), Petersenstraße] Links: Auswirkungen einer simulierten Unterbrechung (30 s) von GNSS-Positionen (über die Zeit in eine Richtung gefiltert) Rechts: Unsicherheiten ohne längerfristige Unterbrechung (tatsächliche Situation)	55
5.1. Varianten zur Berechnung der Parameter der Georeferenzierung für terrestrische Plattformen .	57
5.2. Übersicht zur kombinierten kinematischen Georeferenzierung	62
5.3. Algorithmen zur Liniensextraktion [BORGES und ALDON 2004]	63
5.4. Übersicht zur Liniidentifikation aus Profilschans	64
5.5. Identifizierter Geradenabschnitt (rot) in verdeckt gescannten Bereichen wie Stufen	66
5.6. Numerische Festlegung der Verteilungsfunktion in Abhängigkeit von Start- und Endpunkt eines Geradensegmentes	67
5.7. Hypothetische und empirische Verteilungsfunktionen (zum Scanbeispiel aus Abb. 5.5) für den Anpassungstest nach Kolmogorow-Smirnow	68
5.8. Vergleich vor (links) und nach (rechts) der Zusammenführung benachbarter Liniensegmente (in vertikaler Achsrichtung stark überhöht gezeichnet)	69

5.9. Rollwinkel objektraumbasiert und mittels Neigungssensor beobachtet (oben: zugehörige Scanprofile)	72
5.10. Standardabweichungen (links) und MAD-Werte (rechts) für $\dot{r}^{(t)}$ - geschätzt jeweils für ein Scanprofil	73
6.1. Abschätzung des Einflusses von Störbeschleunigungen auf die Neigungsmessung	76
6.2. Auswirkungen auf die Neigungswinkel (Abschätzungen für horizontal wirkende Beschleunigungen) Links: Korrekturwerte für Rollwinkel r bei Durchfahrt einer 90° -Kurve in Abhängigkeit von Kurvenradius und Durchfahrtszeit Rechts: Korrekturwerte für Nickwinkel p bei Anfahren und Bremsen der Plattform	77
6.3. Varianten der Plattformen für die Validierungsmessungen	79
6.4. Scanner und Zieltafel mit Reflektor zur Referenzierung	81
6.5. Aufbau von Scanner und Zieltafel zum Vergleich der Referenz- und Scandistanzen	82
6.6. Differenzen aus Referenz und gescannter Entfernung in Bahnrichtung [oben] sowie Standardabweichungen unter der Annahme einer stückweise konstanten Geschwindigkeit geschätzt aus den gescannten Entfernungen [unten] Messmodus: 12 rot/s, 500 kHz, Fahrgeschwindigkeit der Zieltafel: 1 m/s	83
6.7. Differenzen aus Referenz und gescannter Entfernung - alle Punkte auf der Zieltafel Messmodus: 50 rot/s, 500 kHz, Fahrgeschwindigkeit der Zieltafel: 1 m/s	84
7.1. Szene TU-Darmstadt (Petersenstraße): Typisches Scanprofil der Testfahrt inklusive identifizierter Liniensegmente	88
7.2. Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau Oben: Anzahl der Linien pro Profil, zu denen korrespondierende Linien gefunden wurden Unten: MAD-Werte der Rollwinkelgeschwindigkeiten über die Anzahl der Profile, pro Profil jeweils geschätzt aus der Menge der korrespondierenden Linien	89
7.3. Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau Vergleich der Rollwinkel aus den kumulierten Geschwindigkeiten $r^{(t)}$ - geschätzt ausschließlich aus den Profilschans unter Einbezug einer Nachbarschaft der Dauer δ - sowie Referenzlösung des INS (alle Werte zu Beginn der Fahrt einheitlich zentriert)	90
7.4. Histogramme zur den Auswirkungen variabler Nachbarschaftslängen δ auf die Schätzung der Rollwinkelgeschwindigkeiten Die mittels Scanprofilen bestimmten Rollwinkelgeschwindigkeiten wurden jeweils mit der Referenz (Lösung des INS) verglichen: $\Delta \dot{r}^{(i)} = \dot{r}_{INS}^{(i)} - \dot{r}_{Scan}^{(i)}$	91
7.5. Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau - Vergleich der Rollwinkel Oben: Ergebnis der kombinierten Filterung, Inklinometerwerte sowie als Referenz die Rollwinkel der IMU (zum Vergleich alle Größen zu Anfang einheitlich zentriert) Mittig: Differenzen der Rollwinkel der Referenzlösung und der kombinierten Filterung Unten: Testgrößen T der Kalman-Filterung (Gl. 3.36, blau) und Quantil $\chi_{2,0.95}^2$ (rot)	92
7.6. Varianzen der gefilterten Zustände $\hat{\sigma}_r$	92
7.7. Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau Azimute abgeleitet aus gefilterten Positionen (oben) und Anzahl der prozessierten Satelliten pro Epoche (unten)	94
7.8. Szene: TU-Darmstadt - Fachbereich Maschinenbau Oben: Nickwinkel (Einzelwerte, gefiltert, Referenz) Unten: Geschwindigkeit der Plattform in Fahrtrichtung	95
7.9. Häufigkeiten der Änderungen der Rotationen innerhalb eines Profilszeitraumes von 20 ms	95
7.10. Auswirkungen eines nicht vollständig erfassten Rollverhaltens der Plattform	96

7.11. Intensitätsbild des Profilschans vom Eingangsbereich Neues Rathaus Hannover Spalten des Bildes entsprechen einzelnen Scanprofilen	97
7.12. Szene Hannover Neues Rathaus Exemplarischer Vergleich (30 Sekunden) der Rollwinkel geschätzt aus integrierten Geschwindigkeiten mittels Scanprofilen (oben) und aus der INS/GNSS-Lösung (unten)	97
7.13. Szene: Hannover Neues Rathaus - Kombinierte Lösung des Rollwinkels sowie Referenz aus INS/GNSS	98
7.14. Szene Hannover Neues Rathaus - Gesamtansicht (links) und Detailansichten der Fassade (rechts) - Punktwolke berechnet mittels kombinierter kinematischer Georeferenzierung	99
7.15. Szene: Hannover Vorplatz Hauptbahnhof - Kombinierte Lösung des Rollwinkels im Vergleich zur Referenz aus INS/GNSS	100
7.16. Spektren des Rollwinkelverhaltens eines Abschnitts von 15 Sekunden - berechnet aus Inklinometermessung (links), aus Scanprofilen (mittig) und aus der Lösung des INS/GNSS (rechts)	100
7.17. Hauptbahnhof Hannover: Bahnhofshalle (links) und Verteilerebene (rechts)	102
7.18. Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum - Standardabweichungen der Positionen nach Filterung und Glättung bei kontinuierlicher Fahrt des Messsystems (Länge (L), Breite (B), Höhe (h))	103
7.19. Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum: Typische Distanzen zwischen zweifach erfassten Punkten Links: Anzeigetafel Richtung Bahnsteig Rechts: Werbetafel beidseitig von beiden Fahrtrichtungen aus aufgenommen	103
7.20. Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum Oben: Anzahl insgesamt gefundener und Anzahl korrespondierender Linien pro Profil Unten: MAD-Werte der Rollwinkelgeschwindigkeiten geschätzt aus der Menge der Linien pro Profil	104
7.21. Szene: Hannover Hauptbahnhof Innenraum - Vergleich der Lösungen der Rollwinkel (oben: gesamte Fahrt, unten: vergrößerter Ausschnitt von 20 s)	105

Literaturverzeichnis

- [ABMAYR et al. 2008] ABMAYR, T., F. HÄRTL, G. HIRZINGER, D. BURSCHKA und C. FRÖHLICH (2008). *A correlation based target finder for terrestrial laser scanning*. Journal of Applied Geodesy, 2:131–137.
- [AKYILMAZ 2007] AKYILMAZ, O. (2007). *Total least squares solution of coordinate transformation*. Survey Review, 39:68–80.
- [AL-MANASIR und FRASER 2006] AL-MANASIR, K. und C. S. FRASER (2006). *Registration of terrestrial laser scanner data using imagery*. The Photogrammetric Record, 21(115):255–268.
- [ALKHATIB et al. 2009] ALKHATIB, H., I. NEUMANN und H. KUTTERER (2009). *Uncertainty modeling of random and systematic errors by means of Monte Carlo and fuzzy techniques*. Journal of Applied Geodesy, 2:67–79.
- [ARRAS und SIEGWART 1997] ARRAS, K. O. und R. Y. SIEGWART (1997). *Feature extraction and scene interpretation for map-based navigation and map building*. In: *Proceedings of SPIE, Mobile Robotics XII*, S. 42–53.
- [BARBER et al. 2008] BARBER, D., J. MILLS und S. SMITH VOYSEY (2008). *Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(1):128–141.
- [BARSHAN und DURRANT-WHYTE 1995] BARSHAN, B. und H. F. DURRANT-WHYTE (1995). *Inertial navigation systems for mobile robots*. IEEE Transactions on Robotics and Autonomous Systems, 11/3:328–342.
- [BAYOUND und SKALOUD 2008] BAYOUND, F. und J. SKALOUD (2008). *Vision-aided inertial navigation system for robotic mobile mapping*. Journal of Applied Geodesy, 2:39–52.
- [BESL und MCKAY 1992] BESL, P. J. und N. D. MCKAY (1992). *A method for registration of 3-D shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2):239–256.
- [BLUG et al. 2007] BLUG, A., C. BAULIG, M. DAMBACHER, H. WÖLFELSCHNEIDER und H. HÖFLER (2007). *Novel platform for terrestrial 3D mapping from fast vehicles*. In: *PIA - Photogrammetric Image Analysis, München, 2007*.
- [BÖHLER et al. 2003] BÖHLER, W., B. VICENT, M. und A. MARBS (2003). *Investigating laser scanner accuracy*. In: *IAPRS Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Bd. XXXIV, Part 5/C15, S. 696–701.
- [BOREMAN 2001] BOREMAN, G. D. (2001). *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*. SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation.
- [BORGES und ALDON 2004] BORGES, G. A. und M.-J. ALDON (2004). *Line extraction in 2D range images for mobile robotics*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 40:267–297.
- [BORRMANN et al. 2008] BORRMANN, D., J. ELSEBERG, K. LINGEMANN, A. NÜCHTER und J. HERTZBERG (2008). *Globally consistent 3D mapping with scan matching*. Robotics and Autonomous Systems, 56:130–142.
- [BOSCH 1998] BOSCH, K. (1998). *Statistik-Taschenbuch*. R. Oldenbourg Verlag, 3. Aufl.
- [BRENNER et al. 2008] BRENNER, C., C. DOLD und N. RIPPERDA (2008). *Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue “Terrestrial Laser Scanning“, 63(1):4–18.
- [BRUNNER 2007] BRUNNER, F. K. (2007). *On the methodology of engineering geodesy*. Journal of Applied Geodesy, 1:57–62.
- [CASTRO et al. 2004] CASTRO, D., U. NUNES und A. RUANO (2004). *Feature extraction for moving objects tracking system in indoor environments*. In: *Proceedings of the 5th IFAC/euron Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, S. 5–7.
- [CRAMER 2001] CRAMER, M. (2001). *Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 537.

- [DEUMLICH und STAIGER 2001] DEUMLICH, F. und R. STAIGER (2001). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Herbert Wichmann Verlag.
- [DOLD 2010] DOLD, CH. (2010). *Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 646.
- [DOROBANTU und GERLACH 2004] DOROBANTU, R. und C. GERLACH (2004). *Investigations of a navigation-grade RLG SIMU type iNAV-RQH*. Schriftenreihe des IAPG/FESG, Technische Universität München, 16.
- [DOUGLAS und PEUCKER 1973] DOUGLAS, D. und T. PEUCKER (1973). *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*. The Canadian Cartographer, 10 (2):112–122.
- [DRIXLER 1993] DRIXLER, E. (1993). *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 409.
- [DUDA und HART 1973] DUDA, R. O. und P. E. HART (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley and Sons, New York.
- [EICHHORN 2005] EICHHORN, A. (2005). *Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 585.
- [ELING 2009] ELING, D. (2009). *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 641.
- [FOPPE et al. 2004] FOPPE, K., V. SCHWIEGER und R. STAIGER (2004). *Grundlagen kinematischer Mess- und Auswertetechnik*. In: *Beiträge zum 58. DVW-Seminar: Kinematische Messmethoden - Vermessung in Bewegung, Schriftenreihe des DVW*, Bd. 54, S. 3–18. Wißner Verlag.
- [FÖRSTNER und GÜLCH 1987] FÖRSTNER, W. und E. GÜLCH (1987). *A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Point, Corners and Centres of Circular Features*. In: *Proceedings of the ISPRS Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, S. 281–305.
- [GELB et al. 2001] GELB, A., J. KASPER, R. A. NASH, C. F. PRICE und A. A. SUTHERLAND (2001). *Applied optimal estimation*. The Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) Press.
- [GHILANI und WOLF 2006] GHILANI, C. D. und P. R. WOLF (2006). *Adjustment Computations - Spatial Data Analysis*. John Wiley and Sons, 4. Aufl.
- [GLENNIE 2007] GLENNIE, C. (2007). *Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems*. Journal of Applied Geodesy, 3:147–157.
- [GLÄSER und SCHOLLMAYER 2004] GLÄSER, A. und R. SCHOLLMAYER (2004). *Messwerteerfassung und -synchronisation in Multisensorsystemen*. In: *Beiträge zum 58. DVW-Seminar: Kinematische Messmethoden - Vermessung in Bewegung, Schriftenreihe des DVW*, Bd. 54, S. 35–58. Wißner Verlag.
- [GOTTWALD et al. 2009] GOTTWALD, R., H. HEISTER, und R. STAIGER (2009). *Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern - eine Standortbestimmung*. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV, 2:88–96.
- [GOULETTE et al. 2006] GOULETTE, F., F. NASHASHIBI, I. ABUHADROUS, S. AMMOUN und C. LAURGEAU (2006). *An integrated on-board laser range sensing system for on-the-way city and road modelling*. In: *Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium: From Sensors to Imagery*, S. 431–436.
- [GRAFAREND und SCHAFFRIN 1993] GRAFAREND, E. W. und B. SCHAFFRIN (1993). *Ausgleichsrechnung in linearen Modellen*. BI, Wissenschaftsverlag, Mannheim.
- [GRÄFE 2007] GRÄFE, G. (2007). *High precision kinematic surveying with laser scanners*. Journal of Applied Geodesy, 4:185–200.
- [GRIEWANK und WALTHER 2008] GRIEWANK, A. und A. WALTHER (2008). *Evaluating Derivatives: Principles and Techniques of Algorithmic Differentiation*. Nr. 105 in *Other Titles in Applied Mathematics*. SIAM, 2. Aufl.
- [GRUEN und AKCA 2005] GRUEN, A. und D. AKCA (2005). *Least squares 3D surface and curve matching*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(3):151–174.

- [HAKE et al. 2002] HAKE, G., D. GRÜNREICH und L. MENG (2002). *Kartographie*. Verlag Walter de Gruyter, 8. Aufl.
- [HARING 2007] HARING, A. (2007). *Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten bei fahrzeuggestützter Objekterfassung*. Dissertation, TU Wien.
- [HARRIS und STEPHENS 1988] HARRIS, C. und M. STEPHENS (1988). *A combined corner and edge detector*. In: *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, S. 147–151.
- [HARTUNG 2005] HARTUNG, J. (2005). *Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. Oldenbourg Verlag, 14. Aufl.
- [HAUNERT 2008] HAUNERT, J.-H. (2008). *Aggregation in Map Generalization by Combinatorial Optimization*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 626.
- [HEINZE 1996] HEINZE, O. (1996). *Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystems zur Online-Verarbeitung in der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 459.
- [HEIPKE 2008] HEIPKE, C. (2008). *Encyclopedia of GIS*, Kap. Data acquisition, Automation, S. 197–200. Springer-Verlag.
- [HEISTER 2006] HEISTER, H. (2006). *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. In: *Beiträge zum 72. DVW-Seminar: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2006)*, Schriftenreihe des DVW, Bd. 51, S. 35–44. Wißner Verlag.
- [HENNES 2006] HENNES, M. (2006). *Präzises und kinematisches Prüfen - Möglichkeiten der Präzisions-High-Speed-Linearmessbahn des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe*. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV, 6:352–358.
- [HENNES 2007] HENNES, M. (2007). *Konkurrierende Genauigkeitsmaße-Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN, 4:136–146.
- [HESSE 2007] HESSE, CH. (2007). *Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 608.
- [HEUNECKE 1995] HEUNECKE, O. (1995). *Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter)*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut.
- [HÄNSLER 2001] HÄNSLER, E. (2001). *Statistische Signale - Grundlagen und Anwendungen*. Springer Verlag, 3. Aufl.
- [IOCCHI und PELLEGRINI 2007] IOCCHI, L. und S. PELLEGRINI (2007). *Building 3D maps with semantic elements integrating 2D laser, stereo vision and IMU on a mobile robot*. In: *Proceedings of the 2nd ISPRS Workshop 3D ARCH: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*.
- [ISO 2007] ISO (2007). *ISO 17123: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 1-8*. International Organization for Standardization.
- [JELALIAN 1992] JELALIAN, ALBERT V. (1992). *Laser Radar Systems*. Artech House, Boston, London.
- [JOECKEL et al. 2007] JOECKEL, R., M. STÖBER und W. HUEP (2007). *Elektronische Entfernungsmessung und Richtungsbestimmung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Herbert Wichman Verlag, 5. Aufl.
- [JULIER 2003] JULIER, S. J. (2003). *The spherical simplex unscented transformation*. In: *Proceedings of the American Control Conference*, Bd. 3, S. 2430–2434.
- [JULIER und UHLMANN 1997] JULIER, S. J. und J. K. UHLMANN (1997). *A new extension of the kalman filter to nonlinear systems*. In: *SPIE AeroSense Symposium Orlando*.
- [JUTZI 2007] JUTZI, B. (2007). *Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulsen*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 611.
- [KAHMEN 2006] KAHMEN, H. (2006). *Vermessungskunde*. Verlag Walter de Gruyter, 20. Aufl.
- [KALMAN 1960] KALMAN, R. E. (1960). *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, 82(Series D):35–45.

- [KERN 2003] KERN, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Heft 19, Braunschweig.
- [KERN und HUXHAGEN 2008] KERN, F. und U. HUXHAGEN (2008). *Ansätze zur systematischen Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern*. In: *Beiträge zum 79. DVW-Seminar: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008)*, Schriftenreihe des DVW, Bd. 54, S. 111–124. Wißner Verlag.
- [KOCH 1997] KOCH, K.-R. (1997). *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. Bildungsverlag Eins.
- [KOCH 2008] KOCH, K.-R. (2008). *Evaluation of uncertainties in measurement by Monte Carlo simulations with an application for laserscanning*. *Journal of Applied Geodesy*, 2:67–77.
- [KOWARZ 2008] KOWARZ, A. (2008). *Advanced Concepts for Automatic Differentiation based on Operator Overloading*. Dissertation, TH Dresden.
- [KREMER und HUNTER 2007] KREMER, J. und G. HUNTER (2007). *Performance of the street-mapper mobile LiDAR mapping system in real world projects*. In: FRITSCH, D., Hrsg.: *Photogrammetric Week 07*, S. 215–225.
- [KUHN 2005] KUHN, W. (2005). *Geospatial semantics: Why, of what, and how?*. *Journal on Data Semantics III*, 3534:1–24.
- [KUTTERER 2010] KUTTERER, H. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Kap. Mobile Mapping, S. 293–311. Whittles Publishing.
- [KUTTERER und SCHÖN 1999] KUTTERER, H. und S. SCHÖN (1999). *Statistische Analyse quadratischer Formen - der Determinatenansatz*. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN*, 10:322–330.
- [KUTTERER und SCHÖN 2004] KUTTERER, H. und S. SCHÖN (2004). *Alternativen bei der Modellierung von Unsicherheiten beim Messen*. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV*, 6:389–398.
- [LI et al. 2007] LI, W.-CH., P. WEI und X.-C. XIAO (2007). *A novel simplex unscented transform and filter*. In: *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2007)*, S. 926–931.
- [LICHTI 2009] LICHTI, D. D. (2009). *The impact of angle parametrisation on terrestrial laser scanner self calibration*. In: *ISPRS Workshop Laserscanning 2009*, Bd. XXXVIII, Part 3/W8, S. 171–176.
- [LICHTI et al. 2005] LICHTI, D. D., S. J. GORDON und T. TIPDECHO (2005). *Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks*. *Journal of Surveying Engineering*, 4:135–142.
- [LICHTI und JAMTSO 2006] LICHTI, DEREK D. und S. JAMTSO (2006). *Angular resolution of terrestrial laser scanners*. *The Photogrammetric Record*, 21 (114):141–160.
- [MALLET und BRETAR 2009] MALLET, C. und F. BRETAR (2009). *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64:1–16.
- [MALLET et al. 2009] MALLET, C., F. LAFARGE, F. BRETAR, M. ROUX, U. SÖRGEL und C. HEIPKE (2009). *A stochastic approach for modelling airborne lidar waveforms*. In: *ISPRS Workshop Laserscanning 2009*, Bd. XXXVIII, Part 3/W8, S. 201–206.
- [MARTINEZ-CANTIN et al. 2006] MARTINEZ-CANTIN, R., J. CASTELLANOS, J. TARDOS und J. MONTIEL (2006). *Adaptive scale robust segmentation for 2D laser scanner*. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, S. 796–801.
- [MCGLONE 2004] MCGLONE, J. C., Hrsg. (2004). *Manual of Photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [MENDES und NUNES 2004] MENDES, A. und U. NUNES (2004). *Situation-based multi-target detection and tracking with laserscanner in outdoor semi-structured environment*. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Bd. 1, S. 88–93.
- [MONTEMERLO und THRUN 2005] MONTEMERLO, M. und S. THRUN (2005). *FastSLAM*. Springer Verlag.
- [MONTEMERLO et al. 2002] MONTEMERLO, M., S. THRUN, D. KOLLER und B. WEGBREIT (2002). *FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem*. In: *Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, Edmonton, Canada.

- [MOUTARLIER und CHATILA 1990] MOUTARLIER, P. und R. CHATILA (1990). *Experimental Robotics I*, Bd. 139/1990, Kap. An Experimental System for Incremental Environment Modelling by an Autonomous Mobile Robot, S. 327–346. Springer-Verlag.
- [NÜCHTER 2009] NÜCHTER, A. (2009). *3D Robotic Mapping - The Simultaneous Localization and Mapping Problem with Six Degrees of Freedom*. Springer Verlag.
- [NÜCHTER und HERTZBERG 2008] NÜCHTER, A. und J. HERTZBERG (2008). *Towards semantic maps for mobile robots*. Robotics and Autonomous Systems, 56:915–926.
- [NEITZEL 2006] NEITZEL, F. (2006). *Bestimmung von Ziel- und Kippachsenfehler polarer Messsysteme aus Minimalkonfigurationen und überbestimmten Konfigurationen*. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV, 131(3):132–140.
- [NEUMANN 2009] NEUMANN, I. (2009). *Zur Modellierung eines erweiterten Unsicherheitshaltes in Parameterschätzung und Hypothesentests*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 634.
- [NIEMEIER 2001] NIEMEIER, W. (2001). *Ausgleichsrechnung*. Verlag Walter de Gruyter.
- [PAFFENHOLZ et al. 2010] PAFFENHOLZ, J.-A., H. ALKHATIB und H. KUTTERER (2010). *Direct geo-referencing of a static terrestrial laser scanner*. Journal of Applied Geodesy, 3:115–126.
- [PAFFENHOLZ und KUTTERER 2008] PAFFENHOLZ, J.-A. und H. KUTTERER (2008). *Direct geo-referencing of static terrestrial laser scans*. In: *FIG Working Week 2008, Stockholm, Schweden (CD-ROM)*.
- [PETRIE und TOTH 2009] PETRIE, G. und C. K. TOTH (2009). *Topographic Laser Ranging and Scanning*. CRC Press, Boca Raton.
- [PFEIFER und BRIESE 2007] PFEIFER, N. und C. BRIESE (2007). *Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning*. In: *ISPRS Workshop Laserscanning 2007*, Bd. XXXVI, Part 3, S. 311–319.
- [RABBANI et al. 2007] RABBANI, T., S. DIJKMAN, F. VAN DEN HEUVEL und G. VOSSelman (2007). *An integrated approach for modelling and global registration of point clouds*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 61(6):355–426.
- [RAMER 1972] RAMER, U. (1972). *An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves*. Computer Graphics and Image Processing, 1:244–256.
- [RAMM 2008] RAMM, K. (2008). *Evaluation von Filter-Ansätzen für die Positionsschätzung von Fahrzeugen mit den Werkzeugen der Sensitivitätsanalyse*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 619.
- [RAUCH et al. 1965] RAUCH, H., F. TUNG und C. STRIEBEL (1965). *Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems*. AIAA Journal, 3(8):1445–1450.
- [REITBERGER et al. 2008] REITBERGER, J., P. KRZYTEK und U. STILLA (2008). *Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees*. International Journal of Remote Sensing, 29 (5):1407–1431.
- [RESHETYUK 2009] RESHETYUK, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Dissertation, KTH - Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden.
- [RIEMENSCHNEIDER 2006] RIEMENSCHNEIDER, A. (2006). *Erfassung der Gleisgeometrie aus Laserscandaten*. In: *Beiträge zum 72. DVW-Seminar: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2006), Schriftenreihe des DVW*, Bd. 51, S. 101–112. Wißner Verlag.
- [RIETDORF 2005] RIETDORF, A. (2005). *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 582.
- [ROTH und THOMPSON 2008] ROTH, R. B. und J. THOMPSON (2008). *Practical applications of multiple-pulse in the air (MPiA) lidar in large area surveys*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (1):183–188.
- [RUMP 2010] RUMP, S. M. (2010). *INTLAB - INTerval LABoratory*. <http://www.ti3.tu-harburg.de/rump/intlab/> (Stand 06/2010).
- [RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001] RUSINKIEWICZ, S. und M. LEVOY (2001).

- Efficient variants of the ICP algorithm.* In: *Proceedings of the 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, S. 142–152.
- [RUSU et al. 2009] RUSU, R. B., N. BLODOW, Z. C. MARTON und M. BEETZ (2009). *Close-range scene segmentation and reconstruction of 3D point cloud maps for mobile manipulation in human environments.* In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
- [SCHAER et al. 2007] SCHAER, P., J. SKALLOUD, S. LANDTWING und K. LEGAT (2007). *Accuracy estimation for laser point cloud including scanning geometry.* In: *5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*.
- [SCHLEMMER 1996] SCHLEMMER, HARALD (1996). *Grundlagen der Sensorik - Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure.* Wichmann Verlag.
- [SCHNABEL et al. 2007] SCHNABEL, RUWEN, R. WAHL und R. KLEIN (2007). *Efficient RANSAC for point-cloud shape detection.* *Computer Graphics Forum*, 26(2):214–226.
- [SCHNEIDER 2009] SCHNEIDER, D. (2009). *Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on multi-station adjustment and a geometrical model with additional parameters.* In: *ISPRS Workshop Laser-scanning 2009*, Bd. XXXVIII, Part 3/W4, S. 177–182.
- [SCHULZ 2007] SCHULZ, T. (2007). *Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy.* Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 17036.
- [SCHWARZ und EL-SHEIMY 2007] SCHWARZ, K.P. und N. EL-SHEIMY (2007). *Advances in Mobile Mapping Technology*, Kap. Digital mobile mapping systems - state of the art and future trends, S. 3–18. Taylor & Francis.
- [SIADAT et al. 1997] SIADAT, A., A. KASKE, S. KLAUSMANN, M. DUFAUT und R. HUSSON (1997). *An optimized segmentation method for a 2D laser-scanner applied to mobile robot navigation.* In: *3rd IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications*, S. 153–158.
- [STAIGER 2003] STAIGER, R. (2003). *Terrestrial Laser Scanning - Technology, Systems and Applications.* In: *Proceedings of the 2nd FIG Regional Conference*, Marrakech, Marokko.
- [THIEL und WEHR 2004] THIEL, K-H. und A. WEHR (2004). *Performance capabilities of laser-scanners - an overview and measurement principle analysis.* In: *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Bd. XXXVI, Part 8/W2, S. 14–18.
- [TITTERTON und WESTON 2005] TITTERTON, D. und J. WESTON (2005). *Strapdown Inertial Navigation Technology.* Institution of Engineering and Technology, 2. Aufl.
- [VDI 2002] VDI (2002). *Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung, Nr. 2634 Blatt 2.* VDI VDE.
- [VENNEGEERTS et al. 2010] VENNEGEERTS, H., J. P. LIEBIG, M. HANSEN, H. NEUNER, J.-A. PAFFENHOLZ, J. GRÜNBERG und H. KUTTERER (2010). *Monitoring eines Brückentragwerks - Vergleichende Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner und Sensoren der Baumesstechnik.* In: *Ingenieurvermessung 2010, Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München*, S. 297–307. Wichmann Verlag.
- [VENNEGEERTS et al. 2008] VENNEGEERTS, H., J. MARTIN, M. BECKER und H. KUTTERER (2008). *Validation of a kinematic laserscanning system.* *Journal of Applied Geodesy*, 2:79–84.
- [VENNEGEERTS et al. 2009] VENNEGEERTS, H., J. MARTIN, J.-A. PAFFENHOLZ und H. KUTTERER (2009). *Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans.* *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation (PFG)*, 1:31–40.
- [WAGNER et al. 2006] WAGNER, W., A. ULLRICH, V. DUCIC, T. MELZER und N. STUDNICKA (2006). *Gaussian decomposition and calibration of novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner.* *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (2):100–112.
- [WEHR und LOHR 1999] WEHR, A. und U. LOHR (1999). *Airborne laser scanning - an introduction and overview.* *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54:68–82.
- [WEINGARTEN und SIEGWART 2005] WEINGARTEN, J. und R. SIEGWART (2005).

- EKF-based 3D SLAM for structured environment reconstruction*. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, S. 2089–2094.
- [WELSCH et al. 2000] WELSCH, W., O. HEUNECKE und H. KUHLMANN (2000). *Handbuch Ingenieur-geodäsie*. Wichmann Verlag.
- [WENDEL 2007] WENDEL, J. (2007). *Integrierte Navigationssysteme*. Oldenbourg Verlag.
- [WIRTH 2008] WIRTH, H. (2008). *Der neue Licht-raummessung LIMEZ III der Deutschen Bahn AG*. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV, 3:180–186.
- [WÖLFELSCHNEIDER et al. 2005] WÖLFELSCHNEIDER, H., A. BLUG, C. BAULIG und H. HÖFLER (2005). *Schnelle Entfernungsmessung für Laserscanner*. tm - Technisches Messen, 72:455–467.
- [XAVIER et al. 2005] XAVIER, J., M. PACHECO, D. CASTRO, A. RUANO und U. NUNES (2005). *Fast line, arc/circle and leg detection from laser scan data in a player driver*. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, S. 3930–3935.
- [ZAMPA und CONFORTI 2009] ZAMPA, F. und D. CONFORTI (2009). *Mapping with Mobile Lidar*. GIM International, 23 / 4.
- [ZHAO und SHIBASAKI 2005] ZHAO, H. und R. SHIBASAKI (2005). *Updating a digital geographic database using vehicle-borne laser scanners and line cameras*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71/4:415–424.

Curriculum vitae

Persönliches

geboren: 29. Juli 1975 in Emden/Ostfriesland
 Familienstand: ledig

Berufliche Tätigkeit

seit 04/2006 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Institut
 Hannover (GIH), Leibniz Universität Hannover
 02/2006 - 03/2006 Öffentlich bestellter Vermessungsingenieur (ÖbVI) Oldeweme,
 Hildesheim
 10/2005 - 01/2006 Öffentlich bestellter Vermessungsingenieur (ÖbVI) Beening,
 Leer
 02/2005 - 04/2005 Bröker + Haferland, Immobilien-Datenmanagement, Hannover
 07/2005 - 09/2005
 02/2004 - 07/2004 Vermessungs- und Katasterbehörde Rothenburg/Stade,
 Katasteramt Stade
 01/2004 Albers Planungs- und Dienstleistungsgesellschaft, Papenburg

Ausbildung

Referendariat 11/2001 - 12/2003 Referendariat Bezirksregierung Weser-Ems, Oldenburg
 Hochschule 10/1996 - 09/2001 Studium Vermessungswesen und Geodäsie,
 Universität Hannover
 05/1996 - 07/1996 Vorbereitendes Praktikum, Katasteramt Leer
 Wehrdienst 07/1995 - 04/1996 Wehrdienst Sanitätsbataillon, Leer
 Schule 1991 - 1995 Teletta-Groß-Gymnasium Leer
 1988 - 1991 KGS Gymnasium Neuenhaus
 1986 - 1988 Orientierungsstufe Uelsen
 1982 - 1986 Grundschule Wilsum

Dank

An dieser Stelle danke ich allen, die mich bei der Fertigstellung der Arbeit unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Hansjörg Kutterer. Er eröffnete mir die Möglichkeit, mich intensiv mit der Thematik zu beschäftigen. Für die vorbildliche Unterstützung, für alle Diskussion, für die vielen hilfreichen Anregungen und für die Motivation sei ihm ganz herzlich gedankt.

Herrn Prof. Dr. Christian Heipke danke ich für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen Anmerkungen zur Veröffentlichung. Herrn Prof. Dr. Matthias Becker danke ich ebenfalls für die Übernahme des Korreferats und für die Gelegenheit zur Kooperation mit dem Institut für Physikalische Geodäsie Darmstadt.

Für die sehr gute Zusammenarbeit während und nach den wiederholt stattgefundenen Messkampagnen danke ich Herrn Jens Martin recht herzlich.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Geodätischen Instituts Hannover danke ich für die angenehme und kollegiale Arbeitsatmosphäre. Namentlich erwähnt seien Herr Dr. Hans Neuner, der sich immer wieder die Zeit für die fachliche Diskussion nahm sowie Herr Jens-André Paffenholz für die unkomplizierte Zusammenarbeit auch im Hinblick auf die vielen praktischen und technischen Aufgaben.

Bei der Gelegenheit bedanke ich mich ebenfalls bei den Vertretern der strukturierten Doktorandenausbildung GuG (Geodäsie und Geoinformatik), die die hilfreichen Doktorandenseminare organisiert haben.

Meinem Bruder Hendrik Vennegeerts danke ich, da er trotz der inhaltlich für ihn fremden Materie den ganzen Text bis hierhin korrigiert hat.

Bei meinen Eltern bedanke ich mich für alle Förderung und den andauernden Rückhalt.