

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation: **Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum**

Verfasser: Dipl.-Ing. Gunnar Gräfe

Promotionsausschuss:

- Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Klaus Wichmann i.R.
1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary i.R.
2. Berichterstatter: apl. Prof. Dr.-Ing. Hansbert Heister
3. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wirth

Tag der Prüfung: 12. Oktober 2007

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 12. Oktober 2007

Zusammenfassung

Kapitel 1 Die kinematische Erfassung des Straßenraumes mit Laserscannern stellt eine neuartige Methode zur mobilen Vermessung von Verkehrswegen dar. Das Mobile Straßen-Erfassungssystem (MoSES) ermöglicht vielfältige Datenauswertungen durch den kombinierten Einsatz von Kameras und Laserscannern. Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden neuartige Entwicklungen zur Nutzung von Laserscanner-Messdaten.

Kapitel 2 Kinematische Methoden eignen sich vor allem für die Erfassung von Bestandsdaten für Straßendatenbanken der öffentlichen Verwaltung (SIB), für die Straßenzustandserfassung oder zur Gewinnung von Grundlagen für Fahrerassistenzsysteme. Die jeweiligen Anwendungen und deren Anforderungen werden in Kapitel 2 vorgestellt. Der Bedarf für den Einsatz kinematischer Messtechnik nimmt in allen Anwendungsbereichen zu. Bisher vorhandene Messsysteme beschränken sich entweder auf spezielle Einsatzgebiete oder sind in ihren Möglichkeiten und Messgenauigkeiten limitiert. Die Technologie im MoSES dagegen erschließt eine Reihe von neuen Anwendungen für die kinematische Vermessung, insbesondere für Auswertungen auf der Basis von Laserscanner-Messdaten. Der Einsatz von Laserscannern in der Bewegung stellt dabei besondere Anforderungen an die Datenerfassung und die Auswertung. Das Ziel der Entwicklungen ist die Nutzung der kinematischen Vermessung für Aufgaben, die bisher der statischen Vermessung vorbehalten gewesen sind.

Kapitel 3 Die Grundlagen für den Einsatz des Systems werden in Kapitel 3 beschrieben. Zentrale Voraussetzung für präzise Messergebnisse ist die exakte Bestimmung der Trajektorie, also der Bewegungskurve des Fahrzeuges im Raum. Diese wird mit Hilfe eines Multisensor-Systems ermittelt, das im Kern aus einer dreidimensionalen, inertialen Messeinheit besteht und durch differentielles GPS und einen Wegsensor gestützt wird. Die Algorithmen zur Filterung und Glättung der Trajektorie sind weit entwickelt, müssen aber auch hohen Anforderungen genügen. Vorgestellt werden Methoden zur Qualitätsprüfung der Resultate. Damit die Trajektorie als äußere Orientierung für Scannerauswertungen genutzt werden kann, müssen sowohl die Stetigkeit der Zeitreihe als auch der störungsfreie Verlauf der geometrischen Raumkurve gewährleistet sein. Grundlegende Voraussetzungen für die Digitalisierung des Straßenkorridors sind außerdem die exakte zeitliche Synchronisation der Messungen zur Trajektorie des Trägerfahrzeuges sowie die präzise Transformation der Scannerdaten vom Sensorkoordinatensystem in das lokale Zielkoordinatensystem.

Kapitel 4 In Kapitel 4 dieser Arbeit wird auf die Laserscannertechnologie und den Messaufbau der Scanner im MoSES eingegangen. Beim Einsatz von Scanner-Messverfahren sind die Eigenschaften der berührungslosen Entfernungsmessung zu beachten, insbesondere das Auftreten systematischer Messfehler unter bestimmten Messbedingungen.

Kapitel 5 Die Kalibrierung von Laserscannern für die mobile Vermessung mit dem System MoSES ist der Schwerpunkt des Kapitels 5. Bei der Transformation der Sensordaten in das

übergeordnete Zielkoordinatensystem dürfen keine signifikanten Genauigkeitsverluste auftreten. Dazu ist eine Kalibrierung hoher Güte erforderlich. Der erste Schritt zur Auswertung der Scannerdaten besteht in der Entwicklung einer Sensorkalibrierung, die systematische Fehler im Messbereich eliminiert. Der nächste Schritt ist die Entwicklung eines Kalibrierverfahrens zur Ermittlung der Parameter für die Überführung der Scannermessungen vom Sensorkoordinatensystem in das Bezugssystem des Messfahrzeuges. Die Messwerte im Fahrzeugkoordinatensystem werden mit Hilfe der Trajektorie epochenweise in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert und stehen damit für weitergehende Auswertungen zur Verfügung. Als Abschluss der Entwicklung wird die Qualität der Ergebnisse geprüft. Die resultierende Messunsicherheit der Streckenmessungen liegt unter 4 mm. Dies entspricht der Wiederholgenauigkeit für die verwendeten Scanner. Die Kalibrierung der Sensoren und die Bestimmung der Zentrierparameter erfüllen damit die Anforderungen. Auf dieser Grundlage ergeben sich verschiedene neuartige Möglichkeiten für die Nutzung der Laserscanner-Messdaten.

Kapitel 6 Das Kapitel 6 dient der Vorbereitung der weiterführenden Auswertung. Vorgestellt werden Methoden zur automatischen Interpretation der Laserscanner-Messpunkte. Praktische Messprojekte erfordern ein umfassendes Qualitätsmanagement. Im aufgenommenen Straßenkorridor kommen zum Beispiel auch Messungen zu Hindernissen vor, wie z.B. Bordsteinkanten, Fahrzeugen oder Fußgängern. Diese werden mit Hilfe eines spezialisierten Kalman-Filters zur Scanprofilanalyse automatisch extrahiert. Anhand der Rückstrahlintensität des Laserscanner-Messsignals besteht außerdem die Möglichkeit, die Fahrbahnmarkierungen aus den Messdaten herauszufiltern. Ein speziell angepasstes, robustes Kalman-Filter dient zur automatischen Verfolgung der gefundenen Messpunkte und bildet daraus linienhafte Objekte. Fahrbahnränder und Markierungen lassen sich auf diese Weise anhand der Scannerdaten als Objekte bestimmen.

Kapitel 7 Aus den Anforderungen der verschiedenen Anwendungsgebiete für kinematisch erfasste Daten folgt, dass der Straßenraum homogen abgebildet werden muss. In Kapitel 7 wird eine Lösung für diese Problematik vorgestellt. Bei der kinematischen Aufnahme von Verkehrskorridoren sind in der Regel mehrere Befahrungen notwendig. Aufgrund der Messunsicherheit der Trajektorienbestimmung können die Messergebnisse der einzelnen Fahrten untereinander nicht einfach verknüpft werden. Mit Hilfe der erzeugten Fahrbahnmarkierungen aus Scannerdaten und ergänzend photogrammetrisch gemessenen Verknüpfungspunkten lassen sich Befahrungen entlang eines Straßenabschnittes homogenisieren. Das Ergebnis garantiert hohe relative Genauigkeit im Aufnahmekorridor. Die Homogenisierung unabhängiger Befahrungen ermöglicht nicht nur die Erfüllung der qualitativen Anforderungen von Straßendatenbanken oder Fahrerassistenzsystemen sondern ist auch Voraussetzung für den Einsatz kinematischer Aufnahmeverfahren in unmittelbarer Konkurrenz zur statischen Vermessung.

Kapitel 8 Ein vollständig neues Anwendungsfeld für kinematisch erfasste Laserscannerdaten ist die Berechnung digitaler Oberflächenmodelle, die in Kapitel 8 erläutert wird. Als Leitlinie für die Modellbildung dient die Bestandsachse der Fahrbahn. Diese kann mit hoher Präzision aus den Ergebnissen der vorangegangenen Auswertungen gewonnen werden. Profile senkrecht zur Fahrbahnachse bilden ein achsbegleitendes Raster, das in dieser Weise für die Straßenplanung verwendet werden kann. Oberflächenmodelle dienen als Grundlage für die Sanierung von Fahrbahndecken oder als Basis für detaillierte Analysen des Straßenzustandes. Mit Hilfe von Qualitätsprüfungen wird der Nachweis geführt, dass die Oberflächenmodelle aus kinematisch erfassten Scannerdaten sich mit einer Messunsicherheit unter 4 mm erzeugen

lassen. Dies gilt auch dann, wenn Daten aus mehreren Befahrungen in die Berechnungen eingehen. Damit erfüllen das System MoSES und das zugehörige Auswertungsverfahren auch die höchsten Anforderungen an die Datenqualität. Als Einsatzgebiet für die Ergebnisse bietet sich zum Beispiel die punktgenaue Analyse des Straßenzustandes an. Zustandsgrößen der Ebenheit, wie z.B. die Spurrinntiefe oder die fiktive Wassertiefe, können mit einer Genauigkeit von 1 mm oder besser abgeleitet werden.

Kapitel 9 Die kinematische Erfassung von Fahrbahnoberflächen mit Laserscannern erfüllt die Genauigkeitsforderungen aller Anwendungsgebiete und kann auch für Aufgaben eingesetzt werden, die bisher der statischen Vermessung vorbehalten waren. In der Zukunft wird sich daraus für Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum ein breites Betätigungsfeld ergeben.

Die Grundlagen für diese Arbeit wurden während der Forschungstätigkeit in der Arbeitsgruppe integrierte kinematische Vermessung (ikV) gelegt. Unter der Leitung von Prof. Wilhelm Caspary und Prof. Hans Heister erfolgte am Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München zunächst der Aufbau des Vermessungssystems KiSS. Die gewonnenen Erfahrungen fanden Eingang in Konzeption, Aufbau und Zielsetzung für das System MoSES. Diese Arbeit hat von vielen fruchtbaren Diskussionen und Anregungen profitieren dürfen, für die beiden beteiligten Professoren mein besonderer Dank gilt. Die Themen dieser Arbeit umfassen ein breites Feld von Fachgebieten des Vermessungs- und Bauingenieurwesens. Mein spezieller Dank für manchen wertvollen Hinweis und für die jahrelange Motivation und Begleitung der Arbeit gilt Prof. Klaus Wichmann und Dr. Cornelia Pester.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Kinematische Vermessung: Anwendungen und Systeme	7
2.1. Anwendungsgebiete	7
2.2. Straßeninformationsbank(SIB)	8
2.2.1. Die Anweisung Straßeninformationsbank (ASB)	8
2.2.2. Das Netzknoten-Stationierungssystem der ASB	9
2.2.3. Forderungen an die Datenqualität der SIB	10
2.2.4. Bestehende Systeme zur kinematischen Erfassung des Straßenraumes	10
2.3. Straßenzustandserfassung	13
2.3.1. Zustandserfassung und -bewertung auf Bundesfernstraßen (ZEB)	14
2.3.2. Merkmale der Oberflächengestalt - Querebenheit	14
2.3.3. Systeme zur Erfassung der Querebenheit	15
2.3.4. Multisensor-Messsysteme für die Zustandserfassung	16
2.4. Fahrerassistenzsysteme	16
2.4.1. Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)	17
2.4.2. Forderungen an die geometrische Genauigkeit digitaler Navigationskarten	17
2.4.3. Methoden zur Datenerhebung	17
2.5. Dreidimensionale Vermessung des Straßenraumes mit Laserscannern	18
2.6. Analyse der bestehenden Systeme	19
2.7. Zielsetzung der Arbeit	20
3. Das Mobile Straßen – Erfassungs – System (MoSES)	21
3.1. Zielsetzung	21
3.2. Systemkonzept	21
3.3. Trajektorienbestimmung	24
3.3.1. Bestimmung von Position und Orientierung	24
3.3.2. Inertiale Messeinheit (IMU)	25
3.3.3. Differentielles GPS (DGPS)	26
3.3.4. Berechnung der Trajektorie	27
3.4. Das Kalman-Filter	27
3.4.1. Das Kalman-Filter zur Trajektorienbestimmung	27
3.4.2. Adaption der Kalman-Filtertechnik für wegabhängige Probleme	29
3.5. Trajektorienbestimmung im System MoSES	29
3.5.1. Position and Orientation System for Land Vehicles (POS/LV)	30
3.5.2. Trajektorienberechnung mit dem Applanix PosPac	30
3.6. Qualitätsmanagement bei der Trajektorienbestimmung	31
3.6.1. Analyse der DGPS Auswertung	31
3.6.2. Analyse der Messunsicherheit der Trajektorienbestimmung	32
3.6.3. Analyse der Stetigkeit der Trajektorie	33

3.6.4.	Analyse der Abweichungen gegenüber Passpunkten	35
3.7.	Zeitsynchronisation	36
3.8.	Georeferenzierung	38
3.8.1.	Messdaten	38
3.8.2.	Berücksichtigung der Sensorkalibrierung	39
3.8.3.	Transformation in das Sensor-Koordinatensystem	40
3.8.4.	Transformation in das Fahrzeug-Koordinatensystem	40
3.8.5.	Transformation in das geozentrische Koordinatensystem der Trajektorie	41
3.8.6.	Transformation in das Nutzer-Koordinatensystem	41
3.9.	Bilddokumentation	42
3.10.	Stereophotogrammetrische Objektmessung	44
4.	Kinematischer Einsatz von Laserscannern	47
4.1.	Grundlagen und Funktionsprinzipien	47
4.1.1.	Messprinzip	47
4.1.2.	Systematische Messabweichungen	48
4.1.3.	Probleme der reflektorlosen Entfernungsmessung	48
4.1.4.	Anforderungen an Laserscanner für die kinematische Vermessung	49
4.1.5.	Laserscanner für kinematische Anwendungen	50
4.2.	Eigenschaften und Messaufbau der Laserscanner im MoSES	52
4.2.1.	Der Laserscanner LMS 200	52
4.2.2.	Messaufbau	53
4.2.3.	Datenerfassung	53
4.2.4.	Zeitsynchronisation	54
4.3.	Georeferenzierung der Laserscanner-Messungen	55
5.	Kalibrierung von Laserscannern	57
5.1.	Sensorkalibrierung des Laserscanners Sick LMS 200	57
5.1.1.	Ziele der Sensorkalibrierung	58
5.1.2.	Messverfahren zur Sensorkalibrierung	59
5.1.3.	Auswertung der Laborkalibrierung	60
5.1.4.	Beispiel für eine Laborkalibrierung	63
5.1.5.	Messunsicherheit der Winkelbestimmung	65
5.1.6.	Korrektur der Streckenmessungen	65
5.1.7.	Korrektur der Remissionsmessungen	66
5.2.	Bestimmung der Zentrierparameter	69
5.2.1.	Messverfahren	70
5.2.2.	Auswertung der geometrischen Kalibrierung	71
5.2.3.	Transformation der Messungen	71
5.2.4.	Geradenbestimmung	73
5.2.5.	Bestimmung der Zentrierelemente	80
5.3.	Verifikation der Laserscanner-Kalibrierung	85
6.	Merkmalsextraktion aus Laserscannermessungen	89
6.1.	Geometrische Analyse der Scanprofile	90
6.1.1.	Filtermodell	90
6.1.2.	Beispiel für die geometrische Analyse eines Querprofils	94
6.2.	Analyse der Remissionsprofile	95
6.3.	Bildung linienhafter Objekte	96

6.3.1.	Filtermodell	98
6.3.2.	Prädiktion	99
6.3.3.	Beobachtungen	99
6.3.4.	Berücksichtigung des Schwimmwinkels	101
6.3.5.	Filterung und Ergebnisse	101
6.3.6.	Qualitätsmanagement	105
7.	Homogenisierung unabhängiger Befahrungen und Netzbildung	107
7.1.	Differenzen zwischen Trajektorien unabhängiger Befahrungen	107
7.2.	Grundprinzip und Ablauf	109
7.2.1.	Verfahren zur Homogenisierung	109
7.2.2.	Ablauf der Homogenisierung	109
7.3.	Bestimmung der Rechenachse	110
7.3.1.	Das Kalman-Filter zur Bestimmung der Rechenachse	110
7.3.2.	Beispiel	112
7.4.	Zuordnung der Beobachtungen zur Rechenachse	113
7.4.1.	Abbildung auf die Rechenachse	114
7.4.2.	Bildung der Beobachtungen	115
7.5.	Bestimmung der Näherungslösung	115
7.6.	Homogenisierung der Befahrungsergebnisse	116
7.6.1.	Das Kalman-Filter zur Bestimmung der Trajektorien-differenzen	116
7.6.2.	Beobachtungsgleichungen	119
7.6.3.	Feststellung der Identität der Beobachtungen	122
7.6.4.	Filterung	122
7.6.5.	Ergebnisse	122
7.7.	Korrektur der Trajektorien	126
7.8.	Netzbildung	128
8.	Digitale Modelle von Fahrbahnoberflächen	131
8.1.	Transformation auf ein lokales Koordinatensystem	131
8.2.	Verknüpfung von Straßenachse und Laserscannerdaten	132
8.2.1.	Die Bestandsachse	132
8.2.2.	Bestimmung der Trassierungsparameter aus kinematischen Messdaten	134
8.2.3.	Nutzung von Bestandsachsen für Fahrbahn-Oberflächenmodelle	135
8.3.	Bildung eines digitalen Oberflächenmodells der Fahrbahn	136
8.3.1.	Mathematisches Modell	136
8.3.2.	Organisation der Beobachtungen	138
8.3.3.	Ermittlung der ausgleichenden Flächen	139
8.3.4.	Genauigkeit der Ergebnisse	140
8.4.	Anwendungen	141
8.5.	Straßenzustandserfassung	142
8.5.1.	Ebenheit	143
8.5.2.	Analyse der Querebenheit	143
8.5.3.	Spurrinntiefe	145
8.5.4.	fiktive Wassertiefe	146
8.5.5.	Bewertung der Ebenheitsanalyse	146
9.	Fazit und Ausblick	149
	Literaturverzeichnis	152

A. Formeln zur Kalman-Filterung	161
A.1. Vorwärts-Kalman-Filter	161
A.2. Suche nach groben Beobachtungsfehlern	163
A.3. Rückwärts-Kalman-Filter	165
A.4. Glättung	165
B. Formeln zur Ausgleichsrechnung	166
B.1. Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen	166
B.2. Ausgleichung nach bedingten Beobachtungen mit Unbekannten	167
B.3. Detektion von groben Fehlern	168

1. Einleitung

Ein effizient funktionierendes Verkehrssystem gilt als eine der wichtigsten Stützen der modernen, auf Mobilität basierenden Wirtschaft. Die Lenkung der Verkehrsströme und die Verwaltung der Verkehrswege sind komplexe Aufgaben und erfordern leistungsfähige Informationssysteme. Einige Zahlen machen den Umfang der Problemstellung deutlich. Das gesamte überörtliche Straßennetz der Bundesrepublik Deutschland umfasst ca. 231.000 km Straßen (Stand 1.1.2001). Davon entfallen rund 53.000 km auf Bundesfernstraßen und rund 178.000 km auf sonstige Straßen des überörtlichen Verkehrs. Kennzeichnend für die Entwicklung des Straßenverkehrs ist die ständig wachsende Belastung von ca. 52,5 Mio. zugelassenen Kraftfahrzeugen bei einer Fahrleistung von 623,3 Mio. Kraftfahrzeugkilometern pro Jahr [ASB (2005)]. Verkehrslenkung und Instandhaltung des Verkehrsnetzes werden in immer größerem Ausmaß von neuen Informationstechnologien unterstützt. Für die Gewinnung der Grundlagendaten bieten sich kinematische Multisensorsysteme an, die aus der Bewegung ohne Beeinträchtigung des fließenden Verkehrs alle gewünschten Informationen erfassen. Bewegte Messsysteme werden derzeit im Wesentlichen für zwei Hauptanwendungsgebiete eingesetzt:

- Erfassung der Verkehrswege inklusive der Objekte im Straßenraum für Straßendatenbanken
- Bereitstellung von Datengrundlagen für die Straßenerhaltung

Straßendatenbanken mit Geometrie-, Bestands- oder Ausstattungsdaten finden sich sowohl bei privaten Anbietern als auch in der öffentlichen Verwaltung. Das Hauptproblem der Datenerhaltung besteht in der fortlaufenden Aktualisierung der Informationen. Auch nach der Ersterfassung des Gesamtnetzes gehen z.B. die Hersteller der Datenbanken für Navigationssysteme von jährlichen Änderungen in einer Größenordnung zwischen 15 % und 20 % des Datenbestandes aus [Bendafi et al. (2000)]. Die Angabe bezieht sich dabei auf die Gesamtheit aller Objekte und Attribute in der Datenbank. Mängel in der Aktualisierung führen innerhalb kurzer Zeit zu einem inkonsistenten Informationsbestand. Streckenlängen von mindestens 30.000 km Straße sind pro Jahr aufzunehmen, um die Bestandsdaten für Straßenbauverwaltungen, Verkehrssysteme oder auch für die Fahrzeugnavigation aktuell zu halten. Dies ist in wirtschaftlich vertretbarer Weise nur mit kinematischen Vermessungssystemen zu leisten, die auf der Basis eines digitalisierenden Messvorganges mit hohem Automatisierungsgrad die rechnergestützte Verarbeitung der Daten gewährleisten. Der zweite Hauptanwendungsbereich der messfahrzeugbasierten Informationsgewinnung im Straßenwesen ist die Erhaltung der Verkehrsnetze. Das Verkehrssystem Straße ist in seiner Substanz verlässlich zu bewahren, so dass den Straßennutzern Verkehrswege bereitgestellt werden, die jederzeit sicher sowie kosten- und energiesparend benutzt werden können [Schmuck (1987)]. Ein großer Teil der bestehenden Straßen wurde zwischen 1960 und 1980 erbaut bzw. ausgebaut. Angesichts dieser Altersstruktur ist der Haushaltsanteil der Aufwendungen für eine verkehrssichere und gebrauchstüchtige Erhaltung in den vergangenen Jahren bereits deutlich gestiegen. Neubauten kommen vergleichsweise selten vor. Der Schwerpunkt liegt auf Maßnahmen zur Erneuerung, Modernisierung, Erhöhung der Sicherheit oder Verbesserung des Verkehrsflusses. Aufgaben des Infrastrukturmanagements erfordern die schnelle und effiziente Bereitstellung von Datengrundlagen,

z.B. für die Zustandsbewertung. Für beide Anwendungsgebiete – Straßendatenbanken und Straßenerhaltung – werden derzeit kinematische Messsysteme eingesetzt, die in Bezug auf Sensorausstattung und Einsatzgrundsätze für das jeweilige Aufgabengebiet spezialisiert sind und sich deutlich voneinander unterscheiden. Obwohl die Messfahrzeuge die gleichen Straßen befahren, findet eine gegenseitige Nutzung der komplementären Daten bisher nicht statt. In der vorliegenden Arbeit werden Entwicklungen vorgestellt, die einem Messfahrzeug durch die Fusion verschiedener Aufnahmesensoren ein breites Anwendungsspektrum ermöglichen. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Integration von Laserradar-Sensoren in ein kinematisches Multisensor-Messsystem. Sensorkalibrierung, Zentrierung im Fahrzeugsystem und Datenauswertung lassen sich auch auf andere Sensorarten übertragen, z.B. Georadarsysteme. Als Resultat der Entwicklungen wird die photogrammetrische Erfassung von Einzelobjekten mit der scannerbasierten Digitalisierung des Straßenraumes zusammengeführt. Die Möglichkeiten der kinematischen Vermessung mit Laserscannern eröffnen neue Einsatzgebiete. Praktische Anwendungen werden am Beispiel des Mobilien Straßen-Erfassungs-Systems (MoSES) demonstriert. Ein neuartiges Tätigkeitsfeld für die kinematische Vermessung ist die Bestimmung digitaler Oberflächenmodelle für Fahrbahnen, die exemplarisch die Verknüpfung der Vermessung mit der Zustandserfassung zeigt. Ein spezielles Anwendungsgebiet für digitale Oberflächenmodelle ist die Deckenerneuerung von Autobahnen. Mit Hilfe der Straßenvermessung mit Photogrammetrie und Laserscannern lässt sich eine kosteneffiziente Bereitstellung der Datengrundlagen für Planung, Sanierung oder Neubau eines Streckenabschnitts gewährleisten.

2. Kinematische Vermessung: Anwendungen und Systeme

Kinematische Messverfahren eröffnen neue geodätische Aufgabengebiete oder treten in Teilbereichen an die Stelle konventioneller, statischer Methoden. [Mönicke (1996)] definiert grundlegende Begriffe zu diesem Themengebiet. [Caspary (2002)] gibt einen Überblick über den aktuellen Stand. Bei der kinematischen Vermessung werden statische Objekte von einer bewegten Plattform aus bestimmt. Der wesentliche Unterschied zur statischen Vermessung liegt darin, dass die geometrischen Messgrößen zusätzlich an die Zeit gekoppelt sind und aus diesem Grund bei der Auswertung ergänzend zu den geodätischen Grundlagen auch zeitbasierte Filtertechniken zum Einsatz kommen. Die Messungen finden in einem zusammenhängenden Zeitintervall statt. Bei der kinematischen Erfassung von Verkehrswegen wird grundsätzlich ein bewegtes System zur Erfassung der unbeweglichen Straßenobjekte eingesetzt. Die verschiedenen Anwendungsgebiete der kinematischen Messtechnik (Kapitel 2.1) haben die Erhebung unterschiedlicher Informationen zum Ziel, so dass für jeden Bereich speziell ausgelegte Systeme im Einsatz sind. Aus der Analyse der Anforderungen und der bestehenden Systeme (Kapitel 2.6) ergibt sich das Konzept für das neuartige Messfahrzeug (Kapitel 3.2).

2.1. Anwendungsgebiete

Das Haupteinsatzgebiet kinematischer Multisensormesssysteme liegt im Bereich der detaillierten, großräumigen Aufnahme von Verkehrskorridoren. Luftgestützte Verfahren erscheinen für die Aufgabe nicht geeignet, da die geforderten Objekte aus der Luft messtechnisch gar nicht oder nicht mit ausreichender Genauigkeit und Vollständigkeit erfasst werden können. Konventionelle, statische Messmethoden sind aus Zeit- und Kostengründen nicht wirtschaftlich. Im Detail unterscheiden sich die einzelnen Anwendungsgebiete kinematischer Methoden deutlich voneinander. Bei der Erfassung der Grundlagen für Straßendatenbanken steht die möglichst vielseitige Aufnahme von Objekten und Merkmalen im Vordergrund (Kapitel 2.2). Im Bereich der Straßenzustandserfassung dagegen werden im Rahmen regelmäßig ausgeschriebener Messkampagnen wenige Zustandsgrößen mit hohem messtechnischem Aufwand bestimmt (Kapitel 2.3). Anwendungen im Bereich der Navigation benötigen einen geometrischen Grunddatenbestand über den Straßenverlauf zum Zweck der Zielführung zu Objekten, die nicht unmittelbar im Fahrbahnbereich liegen. Fahrerassistenzsysteme stellen deutlich höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Straßengeometrie und sollen den Fahrzeugführer in seinen Entscheidungen unterstützen (Kapitel 2.4). Im Bereich der Vermessung des Straßenraumes mit Laserscannern gibt es bereits heute Spezialanwendungen, von denen einige Beispiele in Kapitel 2.5 kurz vorgestellt werden. Eine Sonderstellung nimmt die bildhafte Dokumentation des Straßenraumes ein. Die Bilddaten liefern wichtige Informationen für die Beurteilung eines Verkehrsweges und dienen der Einschätzung der Situation vor Ort. Fast alle kinematischen Messsysteme führen Einrichtungen zur digitalen Bilddokumentation mit. Ein Beispiel für eine Anwendung, die rein auf Bildmaterial basiert, ist das Autobahn-Informationssystem (AIS) des BMVBW. Allgemeines Kennzeichen kinematischer Messsysteme ist die Ausstattung mit

mindestens zwei unterschiedlichen Sensorgruppen:

- Sensoren zur Bereitstellung von Ortungsinformationen
- Sensoren zur Erfassung von Objekten oder Attributen entlang des Verkehrsweges

In der Regel werden die aufgenommenen Daten weitgehend automatisiert gespeichert. Je nach Aufgabe und Auslegung der Komponenten kann die Verarbeitung der Sensorinformationen bereits während des Messvorganges erfolgen. Die Erzeugung der endgültigen Resultate findet häufig erst in einer nachgeordneten Auswertungsphase statt.

2.2. Straßeninformationsbank(SIB)

Der politische Auftrag der Straßenbauverwaltungen ist die Sicherung der Mobilität von Menschen, Gütern und Dienstleistungen [ASB (2005)]. Die Erfüllung dieser Aufgabe erfordert umfassende, präzise und aktuelle Informationen über das Straßennetz. Im Detail werden die Daten zum Beispiel benötigt

- für ein zeitgemäßes Mobilitätsmanagement,
- als Grundlage für politische Entscheidungen oder
- für Planungsvorhaben, Straßenbau oder Straßenerhaltung.

Vor diesem Hintergrund werden seit einigen Jahren Geodateninfrastrukturen für die Straßen des überörtlichen Verkehrs aufgebaut. Diese umfassen Bundesautobahnen, Bundes- und Landesstraßen. Kreisstraßen werden berücksichtigt, soweit sich diese in Verwaltung der Straßenbaubehörden befinden. Bei Bedarf können auch Gemeindestraßen enthalten sein. Geodaten ermöglichen die Verknüpfung von Informationen aus unterschiedlichen Fachgebieten des Verkehrswesens und dienen damit einer ganzheitlichen Betrachtung des Verkehrsweges. Die Straßeninformationsbank, kurz SIB, dient als zentrales Werkzeug zur Verwaltung der Straßeninfrastruktur und soll vorhandene lokale oder anwendungsspezifische sowie neu erfasste Datenbestände für fachübergreifende Aufgaben nutzbar machen. Die SIB wurde flächendeckend in der Bundesrepublik eingeführt, z.B. die NWSIB in Nordrhein-Westfalen. [Caspary und Heister (2002)] geben einen Überblick zum Aufbau von Datenbanken der Verkehrsinfrastruktur.

2.2.1. Die Anweisung Straßeninformationsbank (ASB)

Die Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) definiert die Grundlagen für die Straßeninformationsbank. In der ASB werden die Objekte der Straße mit ihren Attributen fachlich beschrieben. Als Basis der Informationen definiert die ASB das Teilsystem Netzdaten als Ordnungssystem und das Teilsystem Straßenbestandsdaten zur Beschreibung der Straßen in ihren Abmessungen und stofflichen Bestandteilen. Die Komponente Netz enthält Informationen über das Netzknoten-Stationierungssystem der ASB, die verwaltungsmäßige Zuordnung zu Dienststellen, die straßenrechtlichen Baulastträger und die verkehrliche Perspektive, wie z.B. Fahrstreifen und Straßenelemente. In der Komponente Bestand wird die Straße beschrieben:

- in der Anzahl der Fahrstreifen und ihren Querschnittsabmessungen,

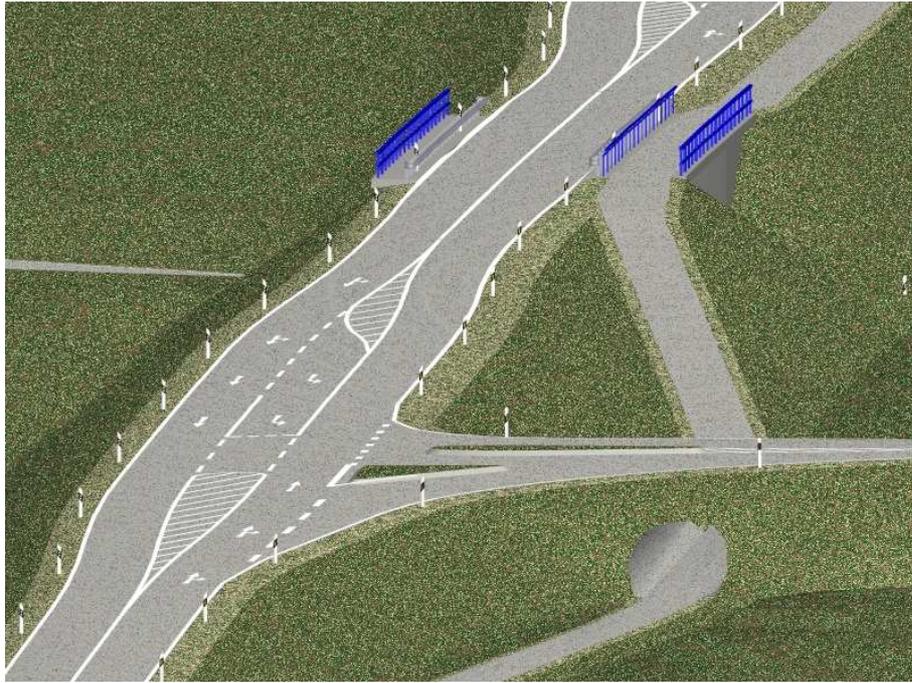


Abbildung 2.1.: Digitales Modell einer geplanten Straße mit Objektbeispielen für die SIB, z.B. einem Netzknoten, Überführungsbauwerken, Abbiegespur, Markierungen und einem Radweg mit Unterführung.

- mit Lage und Art der Ausstattung und den Einrichtungen im Straßenumfeld, z.B. Bauwerken und Parkplätzen und
- mit ihren Verknüpfungspunkten zu den nichtklassifizierten Straßen und anderen Verkehrswegen, z.B. Gemeindestraßen und Bahnübergängen,

Abbildung 2.1 zeigt ein digitales Straßenmodell mit relevanten Objekten für die SIB. Die Datenbank-Struktur der SIB wird im Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA) definiert [BASt (2002)]. Der OKSTRA beschreibt umfassend die Definitionen aller Objektklassen und Objekte im Straßen- und Verkehrswesen sowie deren Attribute und Beziehungen [Portele und König (2000)]. Ziel des OKSTRA ist die Bereitstellung eines einheitlichen Standards für den fachübergreifenden digitalen Austausch von Objektdaten.

2.2.2. Das Netzknoten-Stationierungssystem der ASB

Jedes entlang der Straße aufgenommene Objekt oder Attribut benötigt einen reproduzierbaren, örtlichen Bezug. Die Lokalisierung von Objekten im Straßenraum erfolgt mit Hilfe eines eindimensionalen Längenbezugssystems, dem sogenannten Netzknoten-Stationierungssystem. Die ASB definiert als Netzknoten sämtliche plangleichen, d.h. höhengleichen, und planfreien, d.h. höhenungleichen, Kreuzungspunkte, die sich aus der verkehrlichen Verknüpfung zweier oder mehrerer Straßen des überörtlichen Straßennetzes untereinander ergeben [ASB (2005)]. Die Straße wird in Abschnitte unterteilt, die jeweils durch zwei Netzknoten begrenzt werden und deren positive Stationierungsrichtung fest definiert wird. Jeder Streckenabschnitt wird mit einer metrischen Stationierung versehen. Die Station eines Objektes ergibt sich mathematisch als abgerollte Länge entlang der Bestandsachse, beginnend beim Nullpunkt am Anfang des Abschnittes. Ein Beispiel für die Bildung einer Bestandsachse aus den Befahungsdaten eines kinematischen Messsystems wird in Kapitel 8.2.1 näher beschrieben. Durch Angabe

des Abschnittes, der Station und gegebenenfalls des seitlichen Abstandes zur Achse ist eine eindeutige Georeferenz für jedes Objekt im Straßenverlauf gegeben. Die Stationierung wird mit Hilfe von Stationszeichen örtlich angezeigt, z.B. durch Kilometersteine oder -tafeln. Für alle praktischen, technischen und administrativen Aufgaben im Verkehrsbereich hat sich dieses anschauliche Bezugssystem bewährt. Der Nachteil des Netzknoten-Stationierungssystems besteht darin, dass die Längsinformation als eindimensionale Größe mit einem übergeordneten, dreidimensionalen Koordinatensystem nur vereinbar ist, wenn die Bestandsachse mit ausreichender Präzision in dreidimensionalen Koordinaten vorliegt (vgl. Kapitel 8.2.3). Bisher gibt die ASB lediglich den Längenbezug als zentrales Ordnungsmerkmal vor.

2.2.3. Forderungen an die Datenqualität der SIB

Tabelle 2.1 enthält einen Auszug aus dem Anforderungskatalog für die Erfassung von SIB-Grundlagendaten für den Straßenbauamtsbezirk Hameln [SBVNS (2000)]. Gefordert wird die Erfassung aller Objekte in Bezug auf das Netzknoten-Stationierungssystem, d.h. mit Angabe des Straßenabschnittes mit Start- und Endnetzknoten, der Station und gegebenenfalls auch des Abstandes. Die Bezugsgrößen Station und Abstand sind durch Transformation auf die Raumkurve der Bestandsachse zu ermitteln. Die Lage der Achse selbst soll mit einer Standardabweichung von 0,5 m bestimmt werden. Deutlich höher sind die Forderungen an die Messgenauigkeit bei relativen Maßen, insbesondere den Fahrbahnbreiten und Achsabständen von punktuellen Objekten, die mit einer Präzision von 0,05 m zu ermitteln sind. Der vorliegende Anforderungskatalog wurde für ein Pilotprojekt zusammengestellt und lässt sich nur mit Hilfe fortgeschrittener Mess- und Auswertetechniken einhalten. Ein Teil des aufgenommenen Straßennetzes ist in Abbildung 7.11 dargestellt.

2.2.4. Bestehende Systeme zur kinematischen Erfassung des Straßenraumes

Kinematische Messsysteme bieten sich zur Inventur der Objekte für die Straßeninformationsbank in besonderem Maße an. Der fließende Verkehr wird nicht behindert, die Sicherheit des Messpersonals nicht gefährdet und die Produktivität ist statischen Verfahren um ein Vielfaches überlegen. Aus diesen Gründen nimmt seit einigen Jahren die Zahl kinematischer Messsysteme weltweit sprunghaft zu. Die entwickelten Lösungen unterscheiden sich vor allem in den Methoden zur Erfassung der geometrischen Größen des Straßenraumes. Die Vielfalt reicht von Systemen zur einfachen, georeferenzierten Bilddokumentation mit eingeschränkten Möglichkeiten zur Positionsbestimmung oder zur Erfassung von Objekten bis hin zu komplexen Multisensorsystemen, die einen Großteil der benötigten Attribute mit hoher Genauigkeit erfassen können. Derzeit überwiegt der Einsatz relativ einfacher Systeme zur Erfassung der Objekte im Straßenraum. Dies liegt zum einen an den niedrigeren Kosten und zum anderen an der Entstehungsgeschichte der Datenbanken, die z.B. von [Gruß (2005)] anschaulich geschildert wird. Die Entwicklung von fahrzeuggestützten Systemen zur Straßenvermessung mit hoher Genauigkeit begann ab ca. 1990 mit den Systemen KiSS ([Heister et al. (1995)]; [Casparly et al. (1997)]), VISAT [Schwarz et al. (1994)] und dem GPS-Van [Novak (1991)]. Das wesentliche Merkmal dieser Multisensorsysteme besteht darin, dass zur Erfassung der Objekte georeferenzierte, digitale Messkameras eingesetzt werden, mit deren Hilfe sich der aktuelle Bestand im Verkehrskorridor lückenlos abbilden lässt. Die Bestimmung der Objektkoordinaten erfolgt mit Hilfe photogrammetrischer Methoden. Je umfangreicher und aufwendiger die Sensorik ausgelegt ist, desto vielseitiger sind die Systeme einsetzbar. Die teilweise hohen Kosten für Hardwarekomponenten, Entwicklung und Software werden durch die

Objekt	Beschreibung	Standard- abweichung	Messgröße
Bestandsachse	3D-Raumkurve (Punktabstand 5 m)	0,5 m	Position
Netzknoten		0,5 m	Position
Abschnittslänge	Abwicklung der Raumkurve der Bestandsachse	0,2 %	Länge
Fahrbahn­ränder	3D-Raumkurve (Punktabstand 5 m) relativ zur Fahrbahnachse	0,5 m 0,05 m	Position Abstand
Fahrstreifen	relativ zur Fahrbahnachse Anfangs- /Endpunkt	0,05 m 1 m	Abstand Station
Grundrisselemente	Klothoidenparameter, Radien		
Objekte des Auf­risses	Gradiente	1 m	Höhe
	Fahrbahn­längs­neigung	0,1 %	Längs- neigung
	Fahrbahn­quer­neigung	0,1 %	Quer- neigung
Kilometertafeln		1 m	Station
Amtliche Beschilderung		1 m	Position
Straßenausstattung punktuell	Lichtsignalanlage,	1 m	Station
	Verkehrsbeeinflussungsanlage etc.	0,05 m	Abstand
Querprofile	mindestens im Stationsabstand 100 m		
	Punktabstand 0,1 m über die gesamte Fahrbahn­breite	0,02 m	Höhe

Tabelle 2.1.: Beispiele für Anforderungen an die Genauigkeit von Objekten für die SIB [SBVNS (2000)].

Produktivität aufgewogen. Voraussetzung für die Gewinnung exakter Koordinaten von einer bewegten Plattform aus, ist die Bereitstellung der räumlichen Orientierung für die Messungen mit Hilfe eines inertialen Messsystems (vergleiche Kap. 3.3.1). Systeme zur kinematischen Erfassung des Straßenraumes mit hoher Genauigkeit verfügen aus diesem Grund über eine Multisensorausstattung zur Bestimmung der dreidimensionalen Trajektorie der Messplattform. Die Trajektorie basiert in der Regel auf Daten eines Inertialsystems mit differentiellm GPS und einem Wegsensor als Stützsensoren. Die folgenden Systembeispiele beziehen sich auf Messfahrzeuge, deren Systemdesign ein breites Anwendungsspektrum ermöglicht und die Einhaltung der Genauigkeitsforderungen in Tabelle 2.1 verspricht.

KiSS Seit Anfang der 90er Jahre beschäftigt sich die Arbeitsgruppe integrierte kinematische Vermessung (ikV) am Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München mit der Entwicklung von kinematischen Multisensorsystemen für die Vermessung von Einrichtungen der Verkehrsinfrastruktur (vgl. [Heister et al. (1995)], [Sternberg et al. (1996)] und [Caspary

et al. (2000)]. Das **Kinematic Survey System (KiSS)** ermöglicht mit zwei CCD Kameras die Erfassung des gesamten Verkehrskorridors (siehe Abb. 2.2). Das System wurde auf eine Messgeschwindigkeit von 70 km/h ausgelegt. Mit Hilfe der stereophotogrammetrischen Objektbestimmung wird eine relative Genauigkeit von 0,05 m erreicht [Klemm et al. (1997)]. Die Standardabweichung der absoluten Positionsbestimmung konnte mit $< 0,5$ m auch unter schwierigen GPS-Empfangsbedingungen nachgewiesen werden [Sternberg et al. (2001)]. In einer Reihe von Pilotprojekten wurde die Einsatzbereitschaft des Systems unter Beweis gestellt [Heister und Gräfe (2004)].



Abbildung 2.2.: Linkes Bild: Das kinematische Vermessungssystem (KiSS).
Rechtes Bild: Das System VISAT der University of Calgary.

VISAT Das VISAT-System wurde an der University of Calgary entwickelt. Acht Kameras werden zur Erfassung des Straßenraumes eingesetzt und gewährleisten ein fast vollständiges Straßenpanorama (siehe Abb. 2.2). Das System verfügt über ein präzises, inertiales Messsystem, das sich auf DGPS-Messdaten stützt. Die Straßendatenerfassung erfolgt mit einer Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h [MMT (2004)]. Das VISAT gehört neben den Systemen KiSS (siehe oben) und MoSES (siehe Kap. 3.2) zu den weltweit ersten Systemen mit einer durchgehend operablen digitalen Datenprozessungskette bestehend aus einem Datenerfassungsmodul, einem Modul für die Trajektorienbestimmung und einem Messungs- und GIS-Datenverarbeitungsmodul. Für die erfassten Objekte wird eine absolute Positionsgenauigkeit von 0,3 m bis zu einer Entfernung von 35 m zum Fahrzeug angegeben [El-Sheimy und Lavigne (1998)].

GEOMOBIL Das GEOMOBIL ist eine Entwicklung des Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) ([Talaya et al. (2004)]; [Alamus et al. (2004)]). Das System folgt im System- und Softwaredesign den Vorarbeiten für die Systeme KiSS (siehe oben) und MoSES (siehe Kapitel 3.2). Als eines der wenigen Fahrzeuge weltweit verfügt das GEOMOBIL über eine Kombination aus Kameras und Laserscannern. Zwei Messkameras für die stereophotogrammetrische Objektbestimmung und ein Laserscanner werden auf einer Messplattform zusammengeführt. Die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung relativ zum Fahrzeug wird mit 0,05 m quer und mit 0,13 m längs zur Fahrtrichtung sowie mit 0,03 m in der Höhe angegeben. Absolute Objektpositionen werden mit einer Präzision von 0,5 m in der Lage und 0,1 m in der Höhe bestimmt. Die Qualität der Punktaufnahmen mit Hilfe des Laserscanners vom Typ Riegl Z-210 (vergleiche hierzu auch Tab. 4.1) liegt im gleichen Bereich. Die Kalibrierung der geometrischen Lage der Scanner im Fahrzeugkoordinatensystem erfolgt mit Hilfe von geeignet signalisierten Kontrollpunkten. Die Messungen des Scanners zu den Kontrollpunkten

werden extrahiert und mit den Orientierungsparametern als Unbekannten ausgeglichen. Die resultierende Genauigkeit der Koordinaten im Fahrzeugkoordinatensystem wird mit 0,006 m und der Winkel mit 0,003° bis 0,009° angegeben (vergleiche Kap. 5.2.5 und Tab. 5.2).

Photobus Aus den Anforderungen in Tabelle 2.1 geht hervor, dass die Bestimmung der geometrischen Lage der Fahrbahnachse von besonderer Bedeutung für die Straßendatenbanken ist. Insofern wurden Systemlösungen speziell für diese Aufgabenstellung entwickelt. Ein Beispiel für ein spezialisiertes System zur Verfolgung der Achse eines Verkehrsweges beschreiben [Gillieron et al. (2001)] und [Gontran et al. (2003)]. Position und Lagewinkel des Fahrzeuges dienen zur Orientierung einer senkrecht nach unten gerichteten Kamera, die mit einer Frequenz von 30 Hz die Fahrbahnoberfläche links vom Fahrzeug abbildet. Mit Hilfe von Algorithmen zur automatischen Objektextraktion wird die Mittelmarkierung bildweise extrahiert und eine diskrete, dreidimensionale Punktfolge erzeugt, die näherungsweise die Fahrbahnachse beschreibt. Die Genauigkeit der extrahierten Markierung wird mit 0,1 m angegeben. Schilder längs des Verkehrsweges werden mit einer einzelnen CCD-Kamera erfasst. Zur photogrammetrischen Bestimmung der relativen Position zum Fahrzeug wird der Durchmesser der Schilderpfosten als Restriktion in die Objektmessung eingefügt und für Straßenschilder eine Genauigkeit von 0,4 m in längs und 0,15 m quer zur Fahrtrichtung erzielt.

Ohio State University An der Ohio-State University wurde ein ähnlicher Weg wie beim Photobus besprochen [Grejner-Brzezinska et al. (2000)]. Das Ohio State Department of Transport (ODOT) hat die Entwicklung eines Systems zur Aufnahme der Mittel- und Randmarkierungen auf Highways finanziert [Toth und Grejner-Brzezinska (2002)]. Eine nach unten ausgerichtete Kamera nimmt bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h bis 110 km/h mit bis zu 15 Hz Bilder der Fahrbahnoberfläche auf, denen jeweils eine äußere Orientierung zugewiesen wird. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren werden die Fahrbahnmarkierungen in Echtzeit extrahiert. Die aufeinanderfolgenden Bilder weisen eine so große Überlappung auf, dass eine stereophotogrammetrische Auswertung möglich ist. Die Fahrbahnmarkierungen werden automatisch extrahiert, verfolgt und dreidimensional vermessen. Die Genauigkeit der extrahierten Markierungen wird mit 4 – 10 cm angegeben.

2.3. Straßenzustandserfassung

Aufgrund der wachsenden Verkehrsbelastung und der Altersstruktur des Verkehrsnetzes wird seit Mitte der 80er Jahre intensiv an Methoden zur systematischen Erhaltungsplanung gearbeitet. Zur Lösung der Aufgabe sind Managementsysteme für die Straßenerhaltung (PMS) entwickelt worden, die aus den Teilbereichen Zustandserfassung, Zustandsbewertung, Maßnahmenplanung sowie Kosten- und Bedarfsanalyse bestehen. Eine ausführliche Darstellung der Zusammenhänge findet sich in [Schmuck (1987)], [Stuetze (2004)] oder auch unter www.zeb.bast.de. Der Zustand der Straßenbefestigung wird im Hinblick auf Oberflächengestalt, Oberflächenschäden, Formänderungsverhalten und Oberflächenwirkungen klassifiziert. Zur Untersuchung dienen Messungen mit geeigneten Geräten oder visuelle Feststellungen. Die eingesetzten Messmethoden wurden ohne signifikante Wechselwirkung mit geodätischen Verfahren parallel zur Erfassungstechnologie für Straßendatenbanken und Navigationssysteme entwickelt. Die messtechnische Erhebung der Straßenzustandsdaten stellt einen speziellen Teilbereich der kinematischen Vermessung von Verkehrswegen dar. Die Untersuchungen dieser Arbeit beschränken sich auf die Querebene, deren Zustandsgrößen in Tabelle 2.2 dargestellt sind (vgl. Kap. 8.5).

Merkmalsgruppe	Zustandsmerkmal	Zustandsindikator
Ebenheit im Querprofil	Spurrinnen	Maximum der Mittelwerte von rechter und linker Spurrinntiefe nach dem 2 m-Latten-Prinzip [mm]
		Maximum der Mittelwerte von rechter und linker fiktiver Wassertiefe [mm]

Tabelle 2.2.: Einteilung der relevanten Größen bei der messtechnischen Zustandserfassung der Querebenheit.

2.3.1. Zustandserfassung und -bewertung auf Bundesfernstraßen (ZEB)

Seit 1992 werden im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung auf Bundesfernstraßen (ZEB) pro Jahr regelmäßig Zustandsmerkmale für ca. 30.000 Messkilometer auf Bundesfernstraßen erfasst. Die ZEB ist damit in Bezug auf die jährliche Kilometerleistung führend im Einsatz kinematischer Messmethoden. Zustandsindikatoren, wie z.B. die maximale Spurrinntiefe, dienen zur quantitativen Beschreibung der einzelnen Zustandsmerkmale. Aus den Zustandsindikatoren lassen sich bewertungsrelevante Zustandsgrößen ableiten. Im Verlauf der Zustandsbewertung werden die dimensionsbehafteten Zustandsgrößen mit Hilfe merkmalspezifischer Normierungsfunktionen in eine dimensionslose Notenskala, die sogenannten Zustandswerte, überführt und charakterisieren mit Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) den Erhaltungszustand der Fahrbahn. Eine Zusammenstellung typischer Schadensbilder auf Bundesautobahnen mit Beispielen zu den verschiedenen Zustandsmerkmalen findet sich in [Oertelt (1999)]. Zur Erfassung der Zustandsgrößen werden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) schnellfahrende Messsysteme gefordert, die für die jeweilige Aufgabe messtechnisch zertifiziert sein müssen [BASt (2001)]. Ein schnellfahrendes System ist gegeben, wenn die Messgeschwindigkeit auf Bundesautobahnen bei mindestens 60 km/h liegt.

2.3.2. Merkmale der Oberflächengestalt - Querebenheit

Eine Verkehrsfläche ist eben, wenn die tatsächliche Schichtoberfläche in Längs- und Querrichtung mit der durch den Straßenentwurf vorgegebenen Sollfläche übereinstimmt, wobei die Rauheit außer acht gelassen wird [FGSV (1985)]. Verformungen entstehen durch senkrecht und tangential zur Fahrbahnoberfläche angreifende Verkehrslasten unter Mitwirkung von Witterungseinflüssen sowie durch Bewegungen in Untergrund und Unterbau. Die Verformungen der Fahrbahn bewirken vor allem Beeinträchtigungen in den Bereichen Fahrsicherheit, Fahrkomfort und Nutzungsdauer der Straßenbefestigung. Bei der Bewertung von Fahrbahnebenheiten wird zwischen der Ebenheit in Quer- und in Längsrichtung unterschieden. In Kapitel 8.5 wird die Querebenheit untersucht. Die Ebenheit quer zur Fahrtrichtung wird quantitativ durch folgende Indikatoren charakterisiert:

- Spurrinntiefe
- fiktive Wassertiefe
- Hilfsgrößen, wie z.B. Querneigung, Spurrinnenbreiten, maximale Spurrinnenflankenneigungen, usw.

Anforderungen und Rechenverfahren zur Bestimmung der Querebenheit finden sich in den Vorschriften für die Straßenzustandserfassung [BASt (2001)]. Gefordert wird die Erfassung von Querprofilen im Abstand von 1 m in Fahrtrichtung mit einer Punktdichte von 0,1 m. Die Messbreite beträgt mindestens 3,2 m auf Bundesautobahnen und 3 m auf Bundesstraßen. Die Messeinrichtungen sollen dabei senkrecht zur Fahrtrichtung ausgerichtet sein und die Rollspuren auf der Fahrbahn möglichst symmetrisch abdecken. Zusätzlich ist die korrekte Erfassung der Neigungsverhältnisse für die einwandfreie Beurteilung der Oberflächenentwässerung erforderlich. Wesentliche Zustandsgrößen sind die maximale Spurrinntiefe und die maximale fiktive Wassertiefe in der linken und rechten Rollspur. Beide Größen werden nach dem 2 m-Latten-Prinzip ermittelt. Zur Bestimmung der Spurrinntiefe wird jeweils der vertikale Abstand der Profilmesspunkte zu einer rechnerisch auf den höchsten Punkten aufliegenden 2 m-Latte bestimmt. Im Unterschied dazu basiert die Ableitung der fiktiven Wassertiefe auf einer horizontalen Ausrichtung der rechnerischen Messlatte (vgl. Kap. 8.5). Die Qualität

Querebenheit	$\bar{\Delta}_V$	$\bar{\Delta}_W$	σ_{Δ_V}	σ_{Δ_W}
maximale Spurrinntiefe	1,0 [mm]	0,7 [mm]	2,5 [mm]	1,5 [mm]
fiktive Wassertiefe	1,0 [mm]	0,7 [mm]	2,5 [mm]	1,5 [mm]

Tabelle 2.3.: Anforderungen an die Messgenauigkeit aus Vergleichsmessungen (V) und Wiederholungsmessungen (W) in Bezug auf die Zustandsgrößen zur Beurteilung der Querebenheit.

der Messungen wird durch Vergleichs- und Wiederholungsmessungen sichergestellt. Tabelle 2.3 stellt eine Zusammenfassung der Anforderungen dar. Vergleichsmessungen werden im Zuge der Zertifizierung des Messverfahrens sowie begleitend zu laufenden Messkampagnen durchgeführt. Die Mittelwerte $\bar{\Delta}_V$ der Differenzen zwischen dem eingesetzten Messsystem und den Referenzmessungen dürfen nicht signifikant voneinander abweichen. Die Toleranzgrenze liegt bei 1,0 mm. Die maximale Standardabweichung σ_{Δ_V} aus den Differenzen wird mit 2,5 mm angegeben. Wiederholungsmessungen erfolgen durch mehrfache Befahrung eines bestimmten Streckenabschnitts mit dem gleichen Messsystem. Da Wiederholungsmessungen lediglich Rückschlüsse auf die innere Genauigkeit erlauben, sind die Toleranzen geringer als bei Vergleichsmessungen.

2.3.3. Systeme zur Erfassung der Querebenheit

Zur Bestimmung der einzelnen Zustandsgrößen für die Straßenzustandserfassung wurden spezielle, messtechnische Verfahren entwickelt. Die Zustandsindikatoren werden bei allen Systemen in Echtzeit ermittelt. Systeme zur Bestimmung der Querebenheit nehmen während der Fahrt mit Hilfe industrieller Laserabstandssensoren Querprofile des befahrenen Fahrstreifens auf. Häufig werden Triangulationslaser in einem Messbalken kombiniert, der senkrecht zur Fahrtrichtung ausgerichtet ist. Die Sensoren sind dabei nebeneinander angeordnet und messen jeweils senkrecht nach unten den Abstand zur Fahrbahnoberfläche. Triangulationslaser haben nur einen eingeschränkten Messbereich von einigen Zentimetern, weisen aber neben einer hohen Messfrequenz auch eine hohe Genauigkeit von 0,2 mm oder weniger auf [Schwarz (1996)]. Für die zuverlässige Erfassung der Messgrößen muss die Fahrbahnoberfläche sauber und trocken sein. Die Einzelmessungen werden zur Minimierung von Rauheitseinflüssen auf mittlere Abstandswerte pro Längeneinheit zusammengefasst, z.B. 0,1 m. Ein Beispiel ist das Lasersystem Analyse Querebenheit (LSAQ) der BASt (Abbildung 2.3) [Kempkens

und Glattki (2001)]. Die maximale Aufnahmebreite für das LSAQ System ist auf 4 m begrenzt. Aus sensortechnischer Sicht erscheinen sowohl die Angaben zur Messunsicherheit der Querneigung als auch zur Messunsicherheit der Abstandsmessung relativ optimistisch zu sein. Bei den Messsystemen zur Bestimmung der Querebenheit ist die Georeferenzierung der Messwerte konzeptionell in der Regel auf die exakte Bestimmung des zurückgelegten Weges ausgelegt, z.B. mit Hilfe eines Peiseler-Rades (www.peiseler-gmbh.com). Die Messunsicherheit der Längenmessung eines Peiseler-Rades wird mit 0,1 % der zurückgelegten Entfernung angegeben, also mit einem Fehler von 1 m pro Kilometer [TÜV (1989)]. Die gewonnenen Zustandsgrößen werden relativ zum Netzknoten-Stationierungssystem positioniert. Die Verwendung eines DGPS-Empfängers zur Positionsbestimmung in Echtzeit ist zwar vorgeschrieben, die exakte Georeferenzierung jedes einzelnen Messwertes erfolgt aber bisher nicht. Die Nutzung der Querprofildaten für weitergehende Auswertungen, z.B. die Erstellung eines digitalen Oberflächenmodells, ist bisher technisch nicht möglich.



Bezeichnung	
Breite Messbalken	2,4 - 3,4 m
Gewicht	200 kg
Fahrgeschwindigkeit	20 - 80 km/h
Anzahl Lasersonden	max. 34
Arbeitsbereich	± 100 mm
Genauigkeit	
Querprofilpunkt	$\pm 0,2$ mm
Querneigung	$\pm 0,1\%$

Abbildung 2.3.: Technische Daten zum Lasersystem Analyse Querebenheit (LSAQ) der Bundesanstalt für Straßenwesen [Kempkens und Glattki (2001)].

2.3.4. Multisensor-Messsysteme für die Zustandserfassung

Weltweit existiert eine Vielzahl von Messsystemen zur kinematischen Erfassung des Straßenzustandes, deren Sensorausstattung die gleichzeitige Erfassung mehrerer Zustandsgrößen erlaubt. Beispiele finden sich bei der Firma Schniering (www.schniering.com), der BAST [Glattki und Jakubzig (2004)], den amerikanischen Firmen Pathway (www.pathwayservices.com) oder Roadware (www.roadware.com) sowie bei Arsenal Research in Österreich (www.arsenal.ac.at).

2.4. Fahrerassistenzsysteme

Mindestens 65% der Oberklassefahrzeuge in Deutschland sind mit einem Navigationssystem ausgerüstet [Rauterberg und Brülle-Drews (2004)] und nutzen digitale Daten über den Straßenraum. Aus diesem Grund zählt die Datenerhebung für den Bereich der Fahrerassistenzsysteme, zu denen auch die Navigationssysteme zählen, zu einem zentralen Anwendungsgebiet für die mobile Erfassung von Verkehrswegen.

2.4.1. Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)

Advanced Driver Assistance Systemes verfolgen das Ziel, die Fahrbelastung zu verringern, die Auswirkungen fahrerspezifischer Defizite zu entschärfen und so einen wirkungsvollen Beitrag zur Erhöhung von Fahrkomfort und Fahrsicherheit zu leisten. Fahrerassistenzsysteme werden mit Hilfe des 3-Ebenen-Modells der Fahrzeugführung klassifiziert, das folgende Kernaufgaben des Autofahrers unterscheidet [Schraut (2000)]:

- Planung der Route und Orientierung entlang der Fahrstrecke (Planungsebene)
- Stabilisierung der Fahrlage des Fahrzeuges (Stabilisierungsebene)
- Wahl der Führungsgrößen, wie z.B. Geschwindigkeit und Spurlage (Führungsebene)

Das technische Hauptproblem bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen sind nicht die Abläufe zur Regelung des Fahrzeugverhaltens, sondern die korrekte und sichere Erfassung der Eingangsgrößen, also insbesondere der beweglichen und unbeweglichen Objekte im Straßenraum. Fahrerassistenzsysteme der Führungsebene lassen sich wesentlich leichter implementieren, wenn nur noch die nicht-statischen Objekte detektiert werden müssen und alle relevanten statischen Objekte im Straßenraum bereits geometrisch korrekt erfasst worden und in der Straßendatenbank des Navigationssystems enthalten sind [Schraut (2000)]. Digitale Karten übernehmen auf diese Weise die Funktion eines vorausschauenden Sensors, der Eigenschaften der Straße vorhersagt, die außerhalb der eigentlichen Sensorreichweite liegen und in Kürze das weitere Verhalten des Fahrers bestimmen [Nöcker et al. (2005)]. Das Fahrerassistenzsystem wird rechtzeitig auf die kommenden Fahrsituationen konditioniert, zum Beispiel in Bezug auf Kurven, den Höhenverlauf, Unfall Schwerpunkte oder Ähnliches.

2.4.2. Forderungen an die geometrische Genauigkeit digitaler Navigationskarten

Nach dem Entwicklungsstand werden drei Generationen digitaler Navigationskarten (DNK) unterschieden [Schraut (2000)]. Die erste Generation beschreibt Inhalte und Anwendungen für heute im Fahrzeug verwendete digitale Karten. Der Straßenverlauf wird als Punktfolge gespeichert, aus der bei Bedarf Krümmungsparameter abgeleitet werden. Die Qualität des Ergebnisses ist somit vom Abstand der Stützpunkte abhängig und häufig nicht verlässlich. Die zweite Kartengeneration enthält vor allem die geometrischen Anforderungen von Systemen zur Längsregelung, wie sie derzeit zur Anwendung gelangen, während die dritte Generation schließlich die Genauigkeitsforderungen von zukünftigen Querregelungs- und Kollisionsvermeidungssystemen als Ziel der Entwicklung zusammenfasst. Aus den Angaben geht hervor, dass bereits heute für Karten der zweiten Generation eine detaillierte Streckenabbildung mit einer Genauigkeit von ± 1 m gefordert wird. Mittelfristig gehen die Anforderungen, z.B. für Systeme zur Fahrspurführung, bis in den cm-Bereich [Löwenau et al. (2002)]. Die zukünftigen Forderungen entsprechen weitgehend den Spezifikationen der Straßeninformationsbank (vgl. Tabelle 2.1).

2.4.3. Methoden zur Datenerhebung

Digitale Kartengrundlagen für die Navigation müssen geometrisch präzise, topologisch konsistent, vollständig und aktuell sein. Für die Erfassung bieten sich vor allem kinematische, geodätische Messverfahren an [Wieser und Bartelme (1998)]. Daher setzt zum Beispiel die Firma NAVTEQ weltweit 500 Mitarbeiter für Datenerfassungsaufgaben ein. Gestützt auf

differentielle GPS-Positionsbestimmung werden durch Teams aus Fahrer und Beifahrer manuell bis zu 160 Attribute vergeben (www.navteq.com). Nach Angaben von TeleAtlas liegt die Aufnahmegeschwindigkeit des manuellen Verfahrens bei ca. 9 km/h. Die Firma TeleAtlas setzt seit Neuestem Messfahrzeuge mit einem Multisensorsystem zur digitalen Erfassung des Straßenraumes ein. Die Systeme verfügen über eine inertialgestützte Positionsbestimmung, deren Genauigkeit mit 1 m angegeben wird und 6 Kameras zur Erfassung des Straßenraumes. Stereophotogrammetrische Auswertungen sollen möglich sein (www.teleatlas.com). Eine Nutzung der geometrischen Bestandsdaten der Navigationsdatenbanken für die Straßeninformationsbank hat bisher nicht stattgefunden, erscheint aber zukünftig denkbar.

2.5. Dreidimensionale Vermessung des Straßenraumes mit Laserscannern

Die hochauflösende Vermessung des Straßenraumes ist ein klassisches Anwendungsgebiet für statische Messtechniken. Zum Einsatz kommen stationär betriebene 3D-Laserscanner oder tachymetrische Verfahren. Alternativ stehen heute auch kinematische Methoden zur Verfügung. Ziel der Vermessung mit Laserscannern ist dabei entweder die Digitalisierung der Fahrbahnoberfläche oder des gesamten Straßenkorridors. Kinematische Systeme mit Laserscannern verfügen grundsätzlich über eine Multisensorausstattung mit einem inertialen Messsystem zur Bestimmung der dreidimensionalen Trajektorie der Messplattform (vergleiche Kap. 3.3.1). Für folgende Spezialanwendungen wurden in den vergangenen Jahren Messsysteme entwickelt:

Straßenzustandserfassung mit punktgenauer Detektion von Schadstellen Die Firma Mandli Communications, Oregon, bietet ein System zur koordinatenbasierten Straßenzustandserfassung an. Das Spezialsystem beinhaltet einen Phoenix-Scientific-Laserscanner (siehe Tabelle 4.1). Die Aufnahmebreite umfasst ca. 4,5 m mit 944 Messpunkten. Die Systeme können außerdem mit 2 Kameras zur bildhaften Dokumentation des Straßenraumes, Zeilenkameras zur visuellen Beurteilung der Straßenoberfläche sowie mit Laserabstandsmessgeräten zur Bestimmung von Durchfahrtshöhen ausgestattet werden. Das Hauptanwendungsgebiet liegt im Bereich der Querebenheitsmessung für die Straßenzustandserfassung.

Oberflächenmodelle für Teststrecken Digitale Fahrbahnoberflächenmodelle können als Grundlage für die Simulation von Test- oder Rennstrecken zum Zweck der Fahrzeugentwicklung oder Fahrzeugerprobung verwendet werden. Eine spezialisierte Systemlösung für diesen Anwendungsbereich stellt die Entwicklung *3D-Track* von Daimler-Chrysler dar [Gimmler et al. (2005)]. Bei diesem System wird mit Hilfe einer Kombination aus Laserabstandssensoren und einem Lichtschnittverfahren ein hochauflösendes Abbild der Fahrbahnoberfläche erzeugt. Die Triangulationslaser arbeiten in Längsrichtung mit 20 kHz, während beim Lichtschnittverfahren Kameras mit 2 kHz jeweils 3000 Punkte pro Querprofil abtasten. Die effektive Messbreite liegt lediglich bei 1,8 m, so dass ein Fahrstreifen nicht abgedeckt werden kann. Die Genauigkeit der Höhenmessung wird mit 1 mm angegeben.

3D-Stadtmodelle Ein weiteres Anwendungsgebiet für kinematisches Laserscanning ist die Digitalisierung innerstädtischer Straßenzüge als Grundlage für die Generierung von 3D-Stadtmodellen. Eine Systementwicklung in diesem Bereich ist das Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS) der University of Tokyo [Zhao und Shibasaki (2003)]. Der Befahrungskorridor wird mit 3 zweidimensionalen Laserscannern abgetastet, die mit 20 Hz jeweils

600 Punkte pro Profil messen. Die Genauigkeit der Messungen liegt bei 0,03 m. 6 Zeilenkameras ergänzen hochauflösende Texturinformationen, so dass ein dreidimensionales Abbild mit Helligkeiten entsteht. Zusätzlich ist das System mit 3 CCD Kameras zur Bilddokumentation ausgestattet. Die Daten werden zur Generierung von 3D-Modellen von Innenstädten verwendet. Gebäudefassaden, die Straße oder Bäume werden extrahiert und mit Texturinformationen belegt.

2.6. Analyse der bestehenden Systeme

Das gemeinsame Merkmal der bestehenden Systeme zur Vermessung im fließenden Verkehr ist die bildhafte Dokumentation des Straßenraumes mit Hilfe digitaler Kameras. In Bezug auf die Art der eingesetzten Aufnahmesensoren, die Genauigkeit und die Zielsetzung der Auswertung unterscheiden sich die Systeme allerdings deutlich voneinander. Bei der Datenerfassung für die Straßeninformationsbank zum Beispiel wird die absolute Messgenauigkeit der Koordinaten im Bereich $< 1\text{m}$ und die relative Genauigkeit im Bereich weniger Zentimeter gefordert. Die fortschrittlicheren Systeme verfügen aus diesem Grund generell über Komponenten zur dreidimensionalen, inertialgestützten Positionsbestimmung. Zur Objektbestimmung bedienen sich die vorgestellten Systeme durchweg stereophotogrammetrischer Methoden. Einen besonders praktischen Bezug haben die Messtechniken zur Zustandserfassung auf Bundesfernstraßen (ZEB). Pro Jahr werden nach einem standardisierten Verfahren ca. 30.000 km Richtungsfahrbahnen zur Zustandserfassung ausgeschrieben. Das Hauptelement der Positionierung ist die Längenmessung relativ zum Netzknoten-Stationierungssystem mit einer Genauigkeit $< 1\text{m}$. Die Genauigkeitsforderungen in Bezug auf die absolute Positionsbestimmung in Koordinaten sind gering. In der Praxis entstehen dadurch Unsicherheiten bei der räumlichen Zuordnung der Messungen. Das Messverfahren zur Zustandserfassung hat aus geodätischer Sicht die Schwächen, dass die Qualität der Messergebnisse von der Spurlage bei der Befahrung abhängt und dass die Erfassung auf den befahrenen Fahrstreifen beschränkt ist. Die Systeme zur Bereitstellung von Daten für Zwecke der Navigation oder für Fahrerassistenzsysteme sind zurzeit im Umbruch. Auf der einen Seite müssen die Hersteller der Datenbanken großräumig das Straßennetz erfassen und beständig aktualisieren und auf der anderen Seite sind die Genauigkeitsforderungen mit der Einführung von Fahrerassistenzsystemen deutlich gestiegen. Die Vorgaben des Projektes NextMAP schreiben für die geometrischen Grundlagen zukünftiger Navigationssysteme die gleichen Genauigkeiten vor, wie sie auch für die Straßeninformationsbank bereits üblich sind [Löwenau et al. (2002)]. Die vorgestellten Systeme für Spezialanwendungen können zur Erfassung der Daten für dreidimensionale Stadtmodelle oder für die Gewinnung von Oberflächenmodellen von Fahrbahnen eingesetzt werden. Die Anwendungsbereiche liegen somit in Gebieten, die bisher der statischen Vermessung vorbehalten gewesen sind. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Genauigkeitsforderungen der verschiedenen Anwendungsgebiete für kinematische Messverfahren angleichen. Bisher werden für die jeweiligen Aufgaben aber unterschiedliche Messsysteme eingesetzt. Viele Messfahrzeuge sind bisher nur für eine spezielle Aufgabenstellung ausgerüstet. Ein Beispiel stellen die Systeme zur Straßenzustandserfassung dar, die exakt die Spezifikationen für die Erfassung der Zustandsgrößen erfüllen, aber eine weitergehende Nutzung, z.B. für die SIB, technisch nicht zulassen. Synergiemöglichkeiten durch die gleichzeitige Erfassung der Messgrößen für mehrere Anwendungsgebiete bleiben bei den bisher vorhandenen Systemen zum größten Teil ungenutzt. Ein neuartiges Messsystem, das in allen genannten Bereichen tätig sein kann und dessen Sensordaten sich für die Auswertung in verschiedenen Aufgabengebieten gleichermaßen eignen, bringt erhebliche Einsparmöglichkeiten

mit sich. In Anbetracht des Aufwandes für die Befahrung des Straßennetzes erscheint es sinnvoll, im Verlauf möglichst weniger Messfahrten die Daten für möglichst viele Anwendungen zu erheben.

2.7. Zielsetzung der Arbeit

Kinematische Messverfahren haben das Potential, neue geodätische Aufgabengebiete zu eröffnen oder in Teilbereichen an die Stelle konventioneller, stationärer Messmethoden zu treten. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von neuen Auswertungsmethoden für Laserscanner-Messdaten, die kinematisch mit dem Mobilien Straßen-Erfassungs-System (MoSES) gewonnen werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Schaffung einer durchgehenden, qualitativ hochwertigen Auswertungskette für präzise georeferenzierte Laserscanner-Messdaten. Dabei werden neben speziellen Kalibrierverfahren auch automatische Methoden zur Extraktion von Markierungen sowie Berechnungs- und Analysemethoden für Fahrbahnoberflächen neu entwickelt. Die Algorithmen sollen innovative Anwendungen für die mobile Vermessung von Verkehrswegen erschließen. Mit Hilfe der neuen Verfahren sollen Messgenauigkeiten erreichbar sein, die bisher der statischen Vermessung vorbehalten gewesen sind.

3. Das Mobile Straßen – Erfassungs – System (MoSES)

Aufbauend auf den Erfahrungen beim Einsatz des Systems KiSS (siehe Kap. 2.2.4) wurde das System MoSES konzipiert und seit 1997 kontinuierlich ausgebaut. Das MoSES ist ein Multisensorsystem zur Erfassung des Straßenraumes mit Kameras und Laserscannern in einem Korridor von 15 m beiderseits der befahrenen Strecke (vgl. [Gräfe et al. (2001)] bzw. [Gräfe (2002)]). Der Aufbau des Systems folgt einer modularen Struktur. Das Modul zur Bestimmung der Trajektorie ermittelt laufend dreidimensionale Positionen und Lagewinkel für das Fahrzeug. Die Erfassung des Straßenraumes erfolgt mit verschiedenen Sensormodulen mit komplementären Eigenschaften, die sich variabel an die jeweilige Messaufgabe anpassen lassen.

3.1. Zielsetzung

In die Konzeption des MoSES sind die Folgerungen aus Kap. 2.6 eingeflossen. Für Aufgaben der Datenerfassung entlang von Verkehrswegen sollte das MoSES als kinematisches Multisensorsystem ein besonderes Maß an Vielseitigkeit aufweisen und für verschiedene Anwendungsgebiete einsetzbar sein. Hintergrund dieser Zielsetzung ist auch der Gedanke, dass ein wirtschaftlicher Systembetrieb erleichtert wird, wenn das Fahrzeug ein breites Aufgabenspektrum abdeckt. Das MoSES eignet sich aus diesem Grund zur Erfassung von Datengrundlagen für Straßendatenbanken oder Navigationssysteme ebenso, wie für die Bestimmung digitaler Oberflächenmodelle und die Straßenzustandserfassung. Eine besondere Bedeutung kommt den integrierten Laserscannern zu, deren Messdaten als Grundlage für eine Reihe zentraler Anwendungen dienen.

3.2. Systemkonzept

Das System wurde auf einem geeigneten Trägerfahrzeug aufgebaut und in verschiedenen Entwicklungsschritten realisiert. Im Messsystem MoSES werden aktuell folgende Sensormodule unterschieden:

- Modul Trajektorie (vgl. Kapitel 3.5)
- Modul Bilddokumentation (vgl. Kapitel 3.9)
- Modul Photogrammetrie (vgl. Kapitel 3.10)
- Modul Laserscanner (vgl. Kapitel 4.2)

Kern des Systems ist das Modul Trajektorie (siehe Abb. 3.1). Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines komplexen Multisensor-Messsystems ist die kontinuierliche, dreidimensionale Bestimmung der Bewegung des Fahrzeuges im Raum. Die Trajektorie stellt für jeden

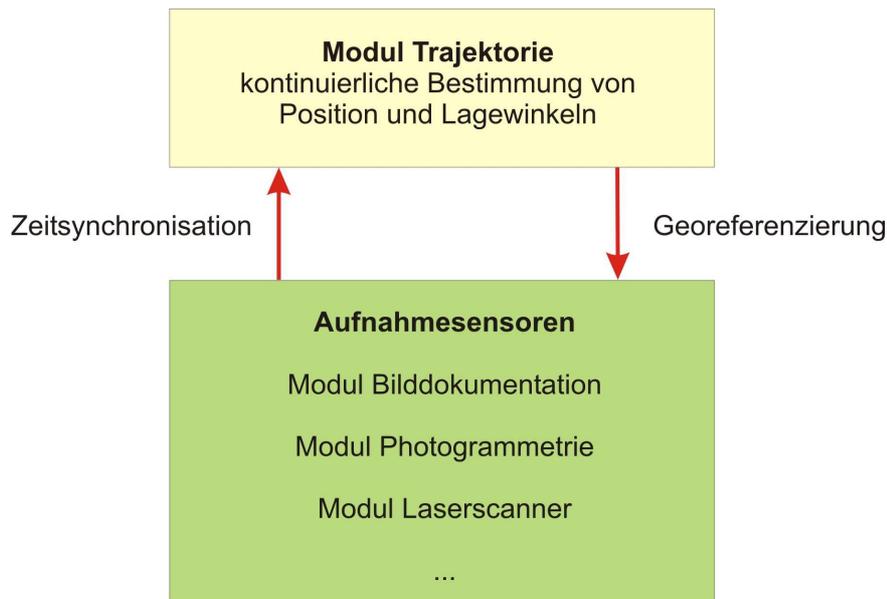


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung des Systemkonzepts für das MoSES.

Sensor die äußere Orientierung zu jedem Messzeitpunkt zur Verfügung, d.h. also Position und Lagewinkel, und ermöglicht damit die Vermessung der Fahrstrecke mit Hilfe der Aufnahmesensoren. Hauptbestandteil des Moduls zur Trajektorienbestimmung ist ein inertiales Messsystem gestützt auf weitere Sensoren, insbesondere differentielles GPS, Wegsensor und ggf. auch ein digitales Barometer. Die Sensormodule zur Erfassung der Objektdaten müssen zeitlich exakt zur Trajektorie synchronisiert werden, damit die Sensordaten bei der Auswertung um die Fahrzeugbewegungen entzerrt werden können. Außerdem wird für das Fahrzeug ein einheitliches Bezugskoordinatensystem definiert, das den geometrischen Bezug für alle Sensordaten darstellt. Die Sensoren zur Datenerfassung sollen den Aufnahmebereich mit redundanten Messverfahren möglichst vollständig abbilden. Der Aufnahmebereich umfasst einen engen Korridor ca. 15 m links und rechts der Trajektorie, in dem die Informationen zu einer Verkehrsanlage liegen. Abbildung 3.2 veranschaulicht den Messaufbau:

- Das Modul Bilddokumentation umfasst derzeit 3 Kameras zur Aufnahme des Straßenkorridors sowie der sichtbaren Fahrwegeigenschaften. Eine Kamera dokumentiert den Straßenraum in Fahrtrichtung. Diese wird ergänzt durch eine Kamera mit Blickrichtung nach rechts zur Erfassung von Details der Objekte am Fahrbahnrand. Für Anwendungen im Bereich der visuellen Straßenzustandserfassung dokumentiert eine dritte Kamera die Fahrbahnoberfläche (siehe Kap. 3.9).
- Das Modul Photogrammetrie besteht aus 2 Kameras, die synchron betrieben werden und deren Aufnahmebereiche sich überlappen. Koordinaten von Objekten werden stereophotogrammetrisch bestimmt (vgl. Kapitel 3.10). In der Regel sind die Kameras in Fahrtrichtung ausgerichtet.
- Das Modul Laserscanner kombiniert 2 Laserscanner vom Typ Sick LMS 200 (siehe Kap. 4.2.1). Die Scanner sind am hinteren Ende des Fahrzeuges angebracht. Die Scanebene liegt jeweils senkrecht zur Befahrungsrichtung. Beide Scanner digitalisieren die Umgebung mit einem Öffnungswinkel von 180°. Die gegenseitige Ausrichtung ist variabel, so dass eine vollständige Rundumsicht von 360° möglich ist.

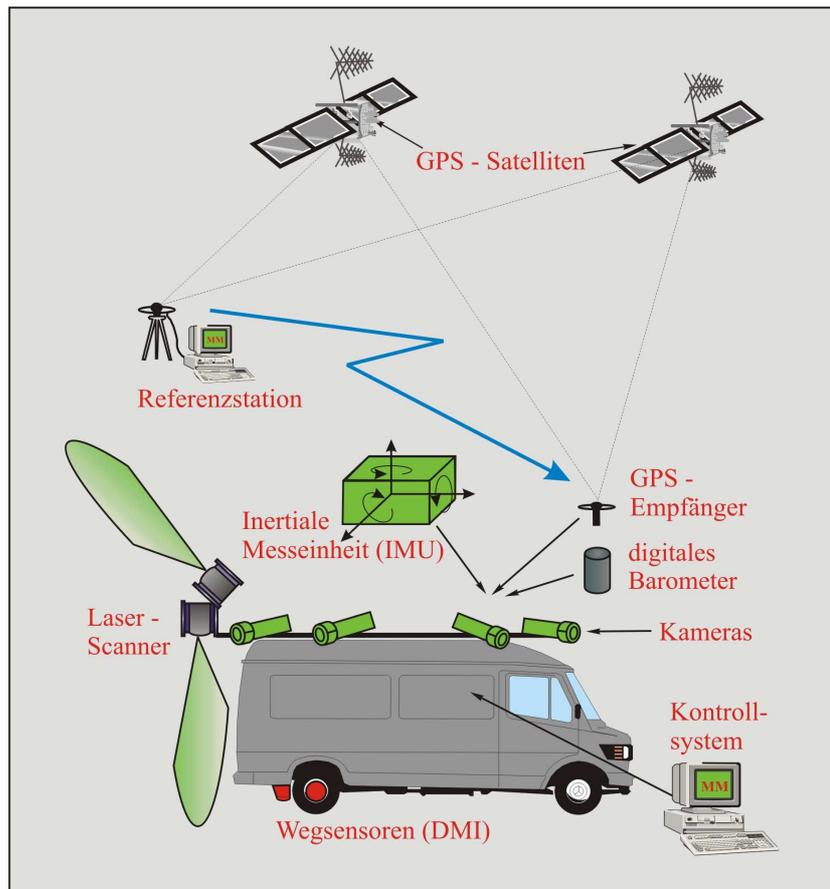


Abbildung 3.2.: Messaufbau der Sensoren im MoSES.

Die Messsignale werden mit hoher Frequenz erfasst und als Rohdaten gespeichert. Die Auswertung erfolgt getrennt von der Datenerfassung im Anschluss an die Befahrung. Dies ermöglicht die Auswertung mit optimalen mathematischen Methoden und die Nutzung aller Möglichkeiten des Qualitätsmanagements sowie der Genauigkeitsschätzung. Für die Objektmessung werden die komplementären Sensoreigenschaften genutzt (siehe Tab. 3.1). Punktuelle Objekte lassen sich mit Hilfe von Kameras leichter bestimmen, da diese im Bild einfacher zu identifizieren sind als in einer diskreten Punktwolke aus Laserscannermessungen. Attribute, wie z.B. die Farbe eines Verkehrsschildes oder der Betrag einer Geschwindigkeitsbegrenzung, sind nur in Bildern feststellbar. Flächenhafte Objekte, z.B. die Fahrbahnoberfläche, werden dagegen durch Laserscanner automatisch mit einem regelmäßigen Abtastungsmuster vermessen. Photogrammetrisch ist dies bedeutend aufwändiger. Ein weiterer Vorteil der Scannertechnik besteht darin, dass die metrische Abbildung bereits in den gemessenen Polarkoordinaten enthalten ist. Aus den Messbildern hingegen müssen Koordinaten oder Abstände in einem weiteren Auswertungsschritt erst bestimmt werden, z.B. mit Hilfe eines photogrammetrischen Vorwärtsschnittes. Eine redundante Aufnahme des Verkehrskorridors mit einer Sensorkombination aus Kameras und Laserscannern ermöglicht also die sichere Bestimmung der gesuchten Informationen. Werden Messgrößen mit Hilfe beider Messmethoden erzeugt, kann die Redundanz Qualität und Zuverlässigkeit der Aufnahme erheblich steigern. Bisher ist gerade die Qualitätssicherung im Bereich der kinematischen Vermessung ein großes Problem, das mit Hilfe der Sensorkombination beherrscht werden kann (vgl. Kap. 7).

	Kamera	Laserscanner
visuelle Gesamtbeurteilung	einfach	schwierig
Identifikation punktförmiger Objekte	einfach	schwierig
Messung von Flächen	schwierig	einfach
Punktdichte	selektiv	hoch; regelmäßiges Abtastungsmuster
metrische Erfassung des Aufnahmebereiches	erfordert zusätzliche Messungen	im Messergebnis enthalten
Aufnahmegeometrie	perspektivische Abbildung	Polarkoordinaten
Automatische Objekterkennung	möglich	möglich
Störungen des Messergebnisses durch bewegliche Objekte, z.B. Fahrzeuge	Nein, da Objekte selektiv gemessen werden.	Ja, da automatisch alle Objekte erfasst werden.

Tabelle 3.1.: Vergleich der Sensoreigenschaften von Kameras und Laserscannern.

3.3. Trajektorienbestimmung

Die dreidimensionale, kinematische Erfassung von Verkehrswegen erfordert die Kombination der Sensoren zur Objekterfassung mit einem Positionierungs- und Orientierungssystem (für Beispiele siehe Kap. 2.1 bis 2.5). Funktionsweise, Art, Anzahl und Aufbau der Aufnahmesensoren können je nach Aufgabenstellung für ein kinematisches Messsystem variieren. Die Grundlage für die Weiterverarbeitung und korrekte Interpretation der gewonnenen Informationen für alle Anwendungen bildet aber deren Georeferenzierung. Zu jedem kinematisch erfassten Datensatz wird die äußere Orientierung zum Aufnahmezeitpunkt benötigt. Unter der äußeren Orientierung versteht man im Allgemeinen die Bestimmung von Standort und Ausrichtung eines Sensors. Der Ort zu einer Epoche k wird durch den Ortsvektor \mathbf{x}_k beschrieben, während die Ausrichtung im Raum durch Rollwinkel $\varphi_{x,k}$, Nickwinkel $\varphi_{y,k}$ und Azimut α_k festgelegt werden kann. Die Grundlagen für die korrekte Georeferenzierung der Messungen bilden die Trajektorienbestimmung für das Trägerfahrzeug (siehe Kapitel 3.3.1), das Qualitätsmanagement für die Trajektorie (siehe Kap. 3.6), die zeitliche Synchronisation der Sensoren zur Trajektorie (siehe Kapitel 3.7) und das definierte Koordinatensystem des Fahrzeuges (siehe Kap. 3.8).

3.3.1. Bestimmung von Position und Orientierung

Position und Orientierung zu jedem Messzeitpunkt eines Sensors werden aus der Trajektorie des Trägerfahrzeuges abgeleitet. Unter der Trajektorie versteht man die kontinuierlich ermittelte, orientierte Bewegungskurve der Trägerplattform im dreidimensionalen Raum. Die Trajektorie lässt sich nach (3.1) mit einem dynamischen Zustandsvektor beschreiben und enthält für jede Epoche Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie die Lagewinkel und Drehraten. Zur Auswertung von Sensordaten werden in der Regel die Position mit den Bestandteilen Breite, Länge und Höhe sowie die Lagewinkel mit den Komponenten Rollwinkel,

Nickwinkel und Azimut benötigt. Die erfolgreiche Durchführung der angestrebten Aufgaben mit dem System MoSES (vgl. Kap. 3.1), insbesondere die Laserscanner-Auswertung, setzt folgende Eigenschaften der Trajektorie voraus:

- kontinuierlich verfügbare äußere Orientierung für alle Sensoren
- hohe Positionsgenauigkeit ($< 0,5$ m)
- Stetigkeit, d.h. kontinuierlicher Verlauf ohne Lücken und ohne sprunghafte Änderungen

Zur Bestimmung der Trajektorie des Fahrzeuges werden Sensoren benötigt, die eine Berechnung der Lage im Raum mit 6 Freiheitsgraden ermöglichen. Voraussetzung für die korrekte Auswertung von Laserscanner-Messdaten ist die exakte dreidimensionale Erfassung aller Bewegungen des Trägerfahrzeuges, insbesondere der periodischen Schwingungen und der Änderungen des Bewegungszustandes, wie z.B. der Bremsvorgänge. Aus diesem Grund kommen für die Trajektorienbestimmung Multisensorsysteme zum Einsatz, die aus einer inertialen Messeinheit und Stützsensoren, wie zum Beispiel differentiellem GPS und einem hochgenauen Wegsensor bestehen ([Lapucha (1990)]; [Sternberg et al. (1996)]). Die Sensoren zur Bestimmung von Position und Orientierung sollen sich gegenseitig ergänzen, unterstützen und kontrollieren.

3.3.2. Inertiale Messeinheit (IMU)

Die inertielle Messeinheit (IMU) bildet den Kern eines hybriden Systems zur Trajektorienbestimmung. Eine IMU ermöglicht die Bestimmung von Position und Orientierung unabhängig von äußeren Informationen mit einer Datenrate von 200 Hz oder mehr. Zur autonomen Bestimmung der Trajektorie in allen drei Raumdimensionen ist mindestens eine Sensorkombination aus drei Beschleunigungsmessern und drei Kreiseln erforderlich. Bei Landfahrzeugen werden in der Regel Strapdown-Systeme eingesetzt, bei denen die Sensoren in einem festen, dreiachsigen Aufbau angeordnet sind. [Schwarz (1996)] oder [Jekeli (2001)] geben einen Überblick über die kinematische Vermessung mit inertialen und anderen Sensoren. Die Genauigkeit der Trajektorienbestimmung nimmt aufgrund von Sensorfehlern, insbesondere Driften, exponentiell mit der Messzeit ab. Bei längerer Messdauer, wie beim Einsatz eines fahrzeuggestützten Messsystems, müssen die Auswirkungen der Sensordrift reduziert werden. Dies geschieht bei einem Landfahrzeug mit Hilfe zusätzlicher Messinformationen:

- **Wegmessungen** Durch die zusätzliche Messung der zurückgelegten Wegstrecke, bzw. der Weginkremente in einem festen Zeitintervall lassen sich die Auswirkungen der Sensordrift kontinuierlich kontrollieren. Detaillierte Darstellungen finden sich bei [Sternberg (2000)] oder [Gräfe (1996)].
- **Differentielle GPS-Beobachtungen** Zur Stützung des Inertialsystems bieten sich differentielle GPS-Beobachtungen an. Die Messunsicherheit der DGPS-Koordinaten bildet den Rahmen für die Genauigkeit der Trajektorie (siehe Kap. 3.3.3).
- **Nullgeschwindigkeitsmessungen (Zero Velocity Update-ZUPT)** Im Stand nimmt die Relativgeschwindigkeit des Trägerfahrzeuges in Bezug zur Erde den Wert Null an. Mit Hilfe dieser Zwangsbedingung lassen sich die inertialen Sensorfehler abschätzen.
- **Passpunktinformationen (Coordinate Update-CUPT)** Während der Fahrt kann das Messfahrzeug entweder an Punkten mit bekannten Koordinaten halten oder mit

Hilfe von Sensoren Passpunkte aus der Bewegung messen. Diese Art der Kontrolle der Sensordrift bietet sich insbesondere in Bereichen an, in denen DGPS nicht oder für längere Zeit nicht mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung steht (vgl. auch Kap. 8.1).

3.3.3. Differentielles GPS (DGPS)

Das Global Positioning System (GPS) liefert als Stützsensoren Informationen über Position und Geschwindigkeit. Die Datenrate der eingesetzten GPS-Empfänger liegt bei 1 bis 20 Hz. Zukünftig wird auch das europäische Galileo-System zur Verfügung stehen. Die Grundlagen der globalen Positionierung wurden vielfach behandelt. Eine ausführliche Darstellung in Bezug auf kinematische Vermessung findet sich in [Sternberg (2000)]. Die definierten Anforderungen an die Genauigkeit der kinematischen Positionierung bei der Vermessung von Verkehrswegen (vgl. Tabelle 2.1) können nur mit differentiellen Verfahren erreicht werden. Das Grundprinzip besteht darin, dass ein oder mehrere Empfänger ein statisches Referenzsystem mit bekannten Koordinaten bilden, in deren näherer Umgebung der bewegte GPS-Empfänger Positionen bestimmt. Vorteilhaft für die praktische Durchführung von Messprojekten wirken sich flächendeckend vorhandene, permanente Referenzstationsnetze aus, wie zum Beispiel das deutsche SAPOS-Netz (www.sapos.de). Ergebnisse für die kinematische Positionierung mit DGPS werden in der Regel im Post-Processing durch Kombination von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung mit anschließender Glättung ermittelt (vgl. Kapitel 3.4). Bei Verwendung von Trägerphasenbeobachtungen der Referenzstation und des bewegten Empfängers lassen sich im Wesentlichen zwei Lösungsverfahren unterscheiden ([Sternberg et al. (1996)] oder [Sternberg (2000)]):

- **Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten** Eine Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten in der Bewegung ist nur erreichbar, wenn der kontinuierliche Empfang von mindestens 5 Satelliten für eine Mindestdauer gewährleistet ist. Moderne Lösungsalgorithmen liefern schon nach einigen Sekunden Ergebnisse, wobei mit erhöhter Wahrscheinlichkeit fehlerhafte Lösungen vorkommen. Erfahrungsgemäß ist für die zuverlässige Bestimmung eine kontinuierliche Beobachtungszeit von mindestens 2 Minuten erforderlich. Die erreichbare Positionsgenauigkeit liegt bei 0,01 m bis 0,03 m.
- **Phasengeglättete Code-Lösung** Aufgrund topographisch bedingter Abschattungen ist der kontinuierliche Empfang der GPS-Signale häufig nicht gegeben. In diesem Fall lässt sich das unterschiedliche Ausbreitungsverhalten der Signale in der Atmosphäre zur Verbesserung der Positionsqualität nutzen. Die Laufzeitmessungen werden mit Hilfe der Trägerphasenbeobachtungen geglättet. Die erreichbare Lagegenauigkeit liegt bei 0,3 m.

In der Praxis hängt die erreichbare Messunsicherheit von der geometrischen Konfiguration der empfangenen Satelliten und den beobachtungsabhängigen Fehlereinflüssen ab. Aufgrund der geringen Signalstärke ist bei der Messung mit GPS quasi-optische Sicht zu den Satelliten erforderlich. Topographische Gegebenheiten, wie z.B. Bebauung oder Vegetation, verursachen Störungen und häufige Signalabschattungen im GPS-Empfang. Insbesondere bei kinematischen Messungen wird die Qualität einer Position durch Mehrwegeeffekte negativ beeinflusst. Unter dem Oberbegriff der Mehrwegeausbreitung werden Reflexionen zusammengefasst, die an glatten Oberflächen, z.B. Gebäudefassaden, auftreten und als Phasensprünge oder systematische Verschiebungen die Ergebnisse der GPS-Berechnungen verfälschen. Dies kann bei der GPS-Filterung zu systematischen Lageabweichungen führen, die weit über der geschätzten Messgenauigkeit liegen (vgl. Kap. 3.6.1).

3.3.4. Berechnung der Trajektorie

Während der Datenakquisition, d.h. in Echtzeit, können lediglich die Datenintegrität geprüft und die Trajektorie als zeitliches Vorwärtsfilter gerechnet werden. Die Grundlage für die Bestimmung der Trajektorie bildet in der Regel ein erweitertes Kalman-Filter in diskreter Zeit (vgl. Kap. 3.4.1). Optimale Verfahren zur Parameterschätzung sehen die Filterung vorwärts und rückwärts sowie eine anschließende Glättung vor (vgl. Abb. 3.3). Die eigentliche Trajektorienbestimmung findet also erst nach Abschluss der Messung im Rahmen einer Nachbearbeitungsphase statt, so dass Datenerfassung und Auswertung zeitlich getrennt erfolgen. Die Eingangsdaten der Sensoren, insbesondere die DGPS-Messungen, sind empfindlich für Störungen, so dass die statistische Suche nach groben Beobachtungsfehlern und deren Elimination unerlässlich sind (siehe Kap. A.2). Im System MoSES wurde für die Trajektorienbestimmung die PosPac Software der Firma Applanix verwendet (siehe Kap. 3.5.2). Die absolute Messunsicherheit der Trajektorie ist abhängig von der Qualität der eingesetzten Hardware und Software. In Bezug auf die Hardware spielen zum Beispiel die Technologie der DGPS-Empfänger und die Größe der Sensordrift der verwendeten IMU eine Rolle. In Bezug auf die Software sind die Art der Filtermodells, die Güte der Geschwindigkeitsbestimmung, die Qualität der Varianzschätzung und insbesondere die Robustheit gegen grobe Beobachtungsfehler zu nennen. Ein praktisches Beispiel für erreichbare Genauigkeiten und das erforderliche Qualitätsmanagement findet sich in Kapitel 3.6.

3.4. Das Kalman-Filter

Bei der Bestimmung von Trajektorien treten an die Stelle der Ausgleichsrechnung optimale Filtertechniken. Als optimal im statistischen Sinn werden Verfahren zur linearen, erwartungstreuen Schätzung mit minimaler Varianz bezeichnet. Die Kalman-Filter-Technik ermöglicht die Ermittlung der Zustandsgrößen eines dynamischen Systems. Der Begriff des Systems entspricht in diesem Zusammenhang dem mathematisch-physikalischen Modell der Ausgleichsrechnung. Analog zur Ausgleichsrechnung basiert das Kalman-Filter auf Beobachtungsgleichungen, die in einem funktionalen und stochastischen Modell den Zusammenhang zwischen kinematischen Messdaten und den gesuchten Unbekannten formulieren. Ausführliche Darstellungen zur Herleitung und zum Ablauf der Algorithmen finden sich in ([Schrick (1977)], [Loffeld (1990)], [Brammer und Siffing (1994)] oder [Jekeli (2001)]).

3.4.1. Das Kalman-Filter zur Trajektorienbestimmung

Das Kalman-Filter wird als zentrales Verfahren verwendet, um die Trajektorie für ein Landfahrzeug zu bestimmen. Ausführliche Darstellungen zur Modellierung eines Kalman-Filters für ein kinematisches Messsystem finden sich in ([Knickmeyer et al. (1996)], [Otto (1998)], [Schwarz (1998)] oder [Sternberg et al. (1998)]). Die Basis für die Schätzung der dynamischen Vorgänge in einem verrauschten System bilden ein Modell der Systemdynamik und das Vorliegen von Beobachtungen für die Ausgangsgrößen. Unter dem Zustand eines Systems versteht man eine bestimmte Anzahl von Parametern, die über das vergangene Verhalten bekannt sein müssen, um das zukünftige Systemverhalten zu beschreiben. Die Unbekannten repräsentieren bei der kinematischen Vermessung den Bewegungszustand zu jeder Filtereopoche. Der Bewegungszustand wird zu diskreten Zeitpunkten ermittelt. Ein typisches dynamisches Modell der Trajektorie für ein Landfahrzeug ist in Formel (3.1) dargestellt und umfasst fünfzehn

Zustandsgrößen.

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} b \\ l \\ h \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{a} \\ \varphi_x \\ \varphi_y \\ \alpha \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} \text{Breite} \\ \text{Länge} \\ \text{Höhe} \\ \text{Geschwindigkeitsvektor} \\ \text{Beschleunigungsvektor} \\ \text{Rollwinkel} \\ \text{Nickwinkel} \\ \text{Azimut} \\ \text{Drehratenvektor} \end{pmatrix}_k \quad (3.1)$$

Parallel erfolgt eine Schätzung der Sensorfehler, zum Beispiel der Offset- und Driftparameter der Sensoren der inertialen Messeinheit oder des Skalenfaktors für den Wegsensor. Das Ergebnis eines solchen Kalman-Filter-Modells ist ein sich mathematisch selbstkalibrierendes Multisensorsystem zur Trajektorienbestimmung. Für den Ablauf eines Kalman-Filters gibt

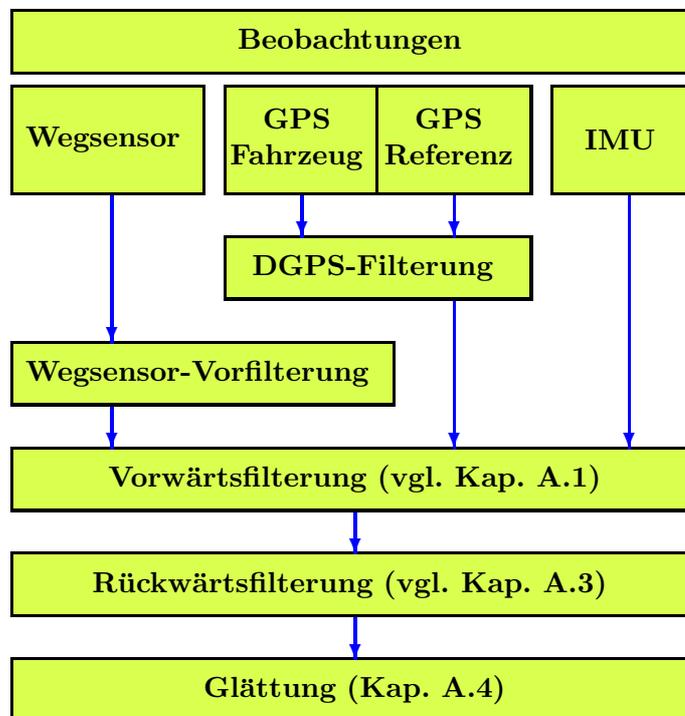


Abbildung 3.3.: Vereinfachter Ablauf der Trajektorienberechnung mit Hilfe eines kaskadierenden Kalman-Filters.

es verschiedene Ansätze. Unterschieden wird zwischen der kaskadierenden und der sogenannten zentralisierten Filterung. Bei der kaskadierenden Filterung wird die Trajektorie durch eigenständig nacheinander ablaufende Filtervorgänge erzeugt (siehe Abb. 3.3). Ein Beispiel für die Vorverarbeitung ist das DGPS-Filter, das aus den GPS-Beobachtungen und Referenzstationsdaten Positionen, Geschwindigkeiten und deren Standardabweichungen schätzt (siehe Kap. 3.6). Mit dem kaskadierenden Ansatz ergibt sich häufig die Problematik, dass die Resultate der aufeinanderfolgenden Filterschritte miteinander korreliert sind. In den nachfolgenden Filterschritten verletzen die Eingangsbeobachtungen, z.B. die DGPS-Positionen, auf diese Weise eine Grundvoraussetzung der Kalman-Filterung (vgl. Kap. A.1). Ein zentralisiertes Filter liegt vor, wenn inertielle Messdaten und die Rohdaten der Stützsensoren in

einem gemeinsamen Modell in einem Schritt verarbeitet werden. Von dieser Filtervariante verspricht man sich durch die direkte Kopplung von inertialen Daten mit DGPS erhebliche Vorteile [Scherzinger (2000)]. Trotzdem ist der kaskadierende Ansatz in der Praxis häufiger anzutreffen, da die Filtermodelle wesentlich einfacher zu realisieren und unter praktischen Bedingungen leichter beherrschbar sind. Die Filterung kann in Echtzeit oder auch erst in einer Nachbearbeitungsphase stattfinden. Bei einer zeitlich von der Befahrung getrennten Berechnung wird der Filterprozess in der Regel zeitlich vorwärts und entgegengesetzt zeitlich rückwärts durchlaufen. Die Kombination der Resultate von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (siehe Kapitel A.3) mit Hilfe eines geeigneten Glättungsverfahrens verbessert die Zuverlässigkeit des Ergebnisses deutlich (siehe Kapitel A.4).

3.4.2. Adaption der Kalman-Filtertechnik für weabhängige Probleme

Das Kalman-Filter ermöglicht die Schätzung der Zustandsgrößen dynamischer Systeme in diskreter Zeit. Die Filtertechnik lässt sich in entsprechender Weise auch auf Messreihen anwenden, die nicht zeitlich, sondern anhand einer geometrischen Kenngröße, z.B. der zurückgelegten Strecke, diskretisiert vorliegen. Voraussetzungen für die verallgemeinerte Anwendung des Kalman-Filters auf eine Messreihe sind:

- Erfassung der Messgrößen in regelmäßiger, fester Abfolge
- Formulierung eines mathematischen Modells für die Zustandsgrößen und entsprechender Beobachtungsgleichungen zur Verknüpfung mit den Beobachtungen
- statistische Eigenschaften der Zufallsvektoren äquivalent zu den Annahmen bei der Filterung in diskreter Zeit (Gauß-Markov-Zufallsprozesse)
- stochastische Eigenschaften der Rauschprozesse entsprechend zu den Grundannahmen der Kalman-Filterung

Kalman-Filter bezogen auf geometrisch diskretisierte Größen werden in folgenden Kapiteln verwendet:

- Kapitel 6.1 - geometrische Analyse der Scanprofile
- Kapitel 6.3 - Linienverfolgung
- Kapitel 7.2 - Homogenisierung von Befahrungen

3.5. Trajektorienbestimmung im System MoSES

Im System MoSES wird für die Trajektorienbestimmung das POS/LV 420 der kanadischen Firma Applanix eingesetzt. Im Gegensatz zum System KiSS wurden Sensorintegration, Datenerfassung und Software nicht selbst entwickelt. Aus diesem Grund lag der Schwerpunkt der Forschungstätigkeit auf der Beurteilung der praktischen Leistungsfähigkeit des Systems zur Trajektorienbestimmung und auf der Entwicklung von Methoden zur qualitativen Beurteilung der Ergebnisse (siehe Kap. 3.6).

3.5.1. Position and Orientation System for Land Vehicles (POS/LV)

Das Position and Orientation System for Land Vehicles (POS/LV) ermöglicht die Bereitstellung der vollständigen Trajektorie für ein kinematisches Messfahrzeug. Kern des Systems ist eine Strapdown-IMU vom Typ LN 200 der Firma Litton, deren Beschleunigungsmesser und Kreisel mit einer Rate von 200 Hz die dreidimensionalen Bewegungen des Fahrzeuges abbilden. Die IMU basiert auf faseroptischen Kreiseln mit einer Drift von $1^\circ/\text{h}$. Zwei Trimble GPS-Empfänger sowie einen Radsensor hoher Genauigkeit dienen als Stützsensoren. Die Trimble GPS-Empfänger teilen sich auf in einen L1/L2-Hauptempfänger, der mit 10 Hz GPS-Rohdaten bereitstellt, und einen Nebenempfänger, der für die Bestimmung des Azimuts zwischen den beiden GPS-Antennen eingesetzt wird. Die Azimutstützung errechnet einmal pro Sekunde eine GPS-Phasenlösung zwischen den beiden Antennen. Bei ausreichend hoher Qualität wird diese zur Stabilisierung der Richtungsbestimmung verwendet. Die Trajektorie steht bereits in Echtzeit zur Verfügung, wird aber in der Regel im post-processing verfeinert. Die inertielle Messeinheit als Kernkomponente und die anschließende robuste Filterung garantieren, dass die angestrebte Genauigkeit auch in Gebieten erzielt werden kann, in denen lediglich qualitativ minderwertige oder gar keine GPS-Positionen zur Stützung der IMU zur Verfügung stehen. Ausführliche Angaben zum System finden sich in [Applanix (2005)].

	0 Min.	1 Min.	3 Min.	5 Min.	10 Min.	20 Min.
X, Y Position [m]	0.02	0.12	0.40	0.75	1.5	2.5
Z Vertical Position [m]	0.03	0.15	0.50	0.65	1.0	2.0
Roll & Pitch [°]	0.005	0.005	0.005	0.007	0.007	0.009
True Heading [°]	0.02	0.02	0.02	0.03	0.035	0.035

Tabelle 3.2.: Messunsicherheit der geglätteten Trajektorie (post-processing) mit einem POS/LV 420 abhängig von der Dauer der GPS-Empfangslücken [Applanix (2001)].

3.5.2. Trajektorienberechnung mit dem Applanix PosPac

Nach Abschluss der Datenerfassung wird die Trajektorie des Fahrzeuges mit Hilfe optimaler Filtertechniken aus den aufgezeichneten Sensordaten ermittelt. Zu diesem Zweck wird ein robustes Kalman-Filter eingesetzt. Der Ablauf der Berechnungen entspricht der schematischen Darstellung in Abbildung 3.3. Abschätzungen für die Messunsicherheit der Ergebnisse enthält Tabelle 3.2. Nach einer GPS-Lücke von 3 Minuten liegt die Standardabweichung der Trajektorie nach Herstellerangaben bei 0,40 m für die horizontalen Koordinaten sowie 0,50 m für die Höhe. Die Standardabweichung der Lagewinkel liegt bei $0,005^\circ$ für Roll- und Nickwinkel sowie $0,02^\circ$ für das Azimut. Die Standardabweichung des Rollwinkels von $0,005^\circ$ entspricht übertragen auf die Querneigung der Fahrbahn einer Genauigkeit $< 0,01\%$. Damit erfüllt das System theoretisch die Anforderungen aus Kapitel 2. Die Einhaltung der spezifizierten Genauigkeit ist aber im Zuge des Qualitätsmanagements zu prüfen (siehe Kap. 3.6). Seit Neuestem ist auch ein Kalman-Filter verfügbar, das DGPS und IMU-Daten direkt in einem zentralisierten Modell integriert [Scherzinger (2000)].

3.6. Qualitätsmanagement bei der Trajektorienbestimmung

Die Auswertung von Trajektorien erfolgt in der Praxis mit Hilfe eines effizienten, festgelegten Berechnungsablaufs, bei dem die Auswertung für die überwiegende Anzahl von Messfahrten mit einem Standard-Parametersatz stattfindet. Trajektorienberechnungen lassen sich technisch durch die jeweils gesetzten Filterparameter optimieren. Parameter sind zum Beispiel das gesetzte Gewicht der GPS-Messungen, das in Formel (A.6) eingeht, oder die Einstellungen für das Systemrauschen in Formel (A.2). Die Projekterfahrungen mit den Systemen KiSS und MoSES (vergleiche [Heister und Gräfe (2004)]) haben gezeigt, dass die berechneten Trajektorien grundsätzlich einem standardisierten Qualitätsmanagement unterworfen werden müssen. Bei Projekten wird im Regelfall ohnehin vom Auftraggeber der Nachweis gefordert, dass die Spezifikationen bei der Trajektorienbestimmung eingehalten worden sind. Es hat sich bewährt, anhand der Ergebnisse der Qualitätsprüfung über Art und Umfang von Neuberechnungen zu entscheiden. Jede Trajektorie wird grundsätzlich in folgenden Schritten untersucht:

1. Analyse der DGPS Auswertung (Kap. 3.6.1)
2. Analyse der Messunsicherheit der Trajektorienbestimmung (Kap. 3.6.2)
3. Analyse der Stetigkeit der Trajektorie (Kap. 3.6.3)
4. Analyse der Abweichungen gegenüber Passpunkten (Kap. 3.6.4)

Für weitere Auswertungen (für Anwendungen siehe Kap. 6 bis 8) kann eine Trajektorie nur genutzt werden, wenn diese den qualitativen Untersuchungen standgehalten hat. Im Verlauf der Entwicklung der Systeme KiSS und MoSES hat sich gezeigt, dass die qualitative Prüfung der Ergebnisse der Trajektorienberechnung und damit die Kontrolle der eingesetzten Software genauso wichtig ist, wie die Einhaltung der Hardware-Spezifikationen. Mängel in der Software sind in Anbetracht der Komplexität der Filterung zu erwarten und machen sich immer wieder bemerkbar (vgl. auch [Gräfe (2000)]). Erste Ansätze zur Prüfung der Trajektorienqualität unter realen Anwendungsbedingungen finden sich in [Gräfe et al. (2001)]. Die folgenden Analysen zeigen ein Beispiel für die Untersuchung einer Messfahrt im Raum München, bei der eine Teststrecke im Hin- und Rückweg befahren wurde (siehe Abbildung 3.4). Die Fahrstrecke führt durch eine Hügellandschaft entlang von Landesstraßen durch ein Gebiet mit abwechslungsreicher Topographie. Enthalten sind Ortschaften, offene Bereiche und Waldgebiete. Die Berechnungen wurden mit der Applanix Software PosPac 4.2 durchgeführt. Die Fahrtstrecke betrug 52 km und die Fahrzeit 100 Minuten.

3.6.1. Analyse der DGPS Auswertung

Die Analyse der differentiellen GPS-Auswertung ermöglicht eine Beurteilung der zu erwartenden Trajektorienqualität. Dabei werden zwei Kriterien geprüft:

- Messunsicherheit der DGPS-Positionsbestimmung
- zeitliche Länge der Lücken in den auswertbaren Positionen

Die DGPS-Auswertung der kinematischen Messungen erfolgt mit einer Rate von 10 Hz. Abbildung 3.4 enthält die resultierende Qualität der DGPS-Positionsbestimmung in farbcodierter Darstellung differenziert in fünf Stufen. Aus Abbildung 3.5 geht die zugehörige Länge

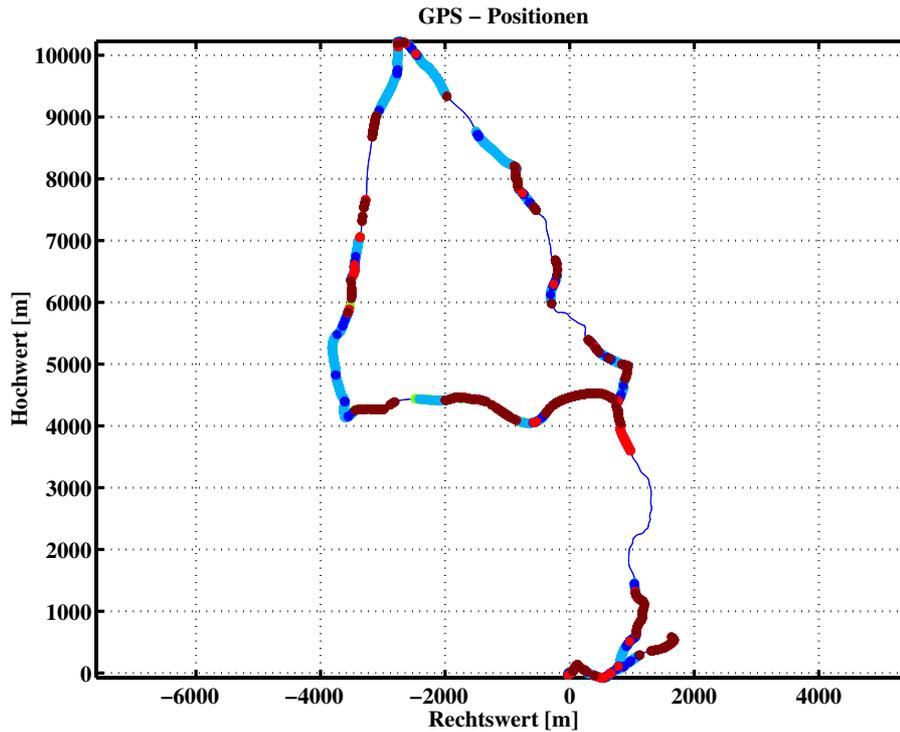


Abbildung 3.4.: Darstellung der Teststrecke mit DGPS-Positionen. Die DGPS-Qualität ist farbcodiert unterlegt (grün=1, hellblau=2, blau=3, rot=4, dunkelrot=5).

der Zeitintervalle hervor, in denen keine DGPS-Positionen errechnet werden konnten. Insgesamt liegen für 40 % der Fahrzeit keine GPS-Positionen vor. Die maximale Dauer einer DGPS-Lücke ist mit 330 Sekunden vergleichsweise lang. In der Regel sind Unterbrechungen nicht länger als 150 bis 180 Sekunden. Abbildung 3.5 enthält zusätzlich die Standardabweichungen der ermittelten DGPS-Positionen. Diese variieren stark zwischen wenigen cm bis zu maximalen Werten im Meter-Bereich. Der Genauigkeitsrahmen der Trajektorie wird von der Messunsicherheit der GPS-Positionen vorgegeben. Für die Bestimmung der Trajektorie ist wichtig, dass die geschätzten Standardabweichungen für die GPS-Positionen eine den jeweiligen Bedingungen entsprechende, repräsentative Größenordnung annehmen, da die reziproke Varianz als Gewicht bei der Filterung verwendet wird. Die Standardabweichungen erreichen für 42 % der Fahrzeit eine Größenordnung von $\sigma \leq 0,05$ m in der Lage. In diesen Bereichen der Befahrung liegt eine differentielle Phasenlösung vor. Für den verbleibenden Anteil der Fahrzeit liegen 13 % der Positionen in einem Bereich von $\sigma \leq 0,5$ m in der Lage. 4 % der Positionen weisen eine höhere Messunsicherheit auf. Bei der DGPS-Auswertung kinematischer Messungen werden von einigen Programmpaketen deutlich zu niedrige oder sogar grob falsche Standardabweichungen geschätzt. Eine Möglichkeit zur Kontrolle der Messunsicherheit stellt die Ermittlung der Differenzen zwischen Vorwärts- und Rückwärts-Filterung der GPS-Messungen dar. Anhand der Größenordnung der Differenzen können die ermittelten Standardabweichungen kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden.

3.6.2. Analyse der Messunsicherheit der Trajektorienbestimmung

Im Zuge der Kalman-Filterung zur Bestimmung der Trajektorie wird die Messunsicherheit der Zustandsgrößen geschätzt. Abbildung 3.5 enthält die dreidimensionale Standardabweichung für jede Epoche der geglätteten Trajektorie. Die Messunsicherheit weist einen stetigen Verlauf

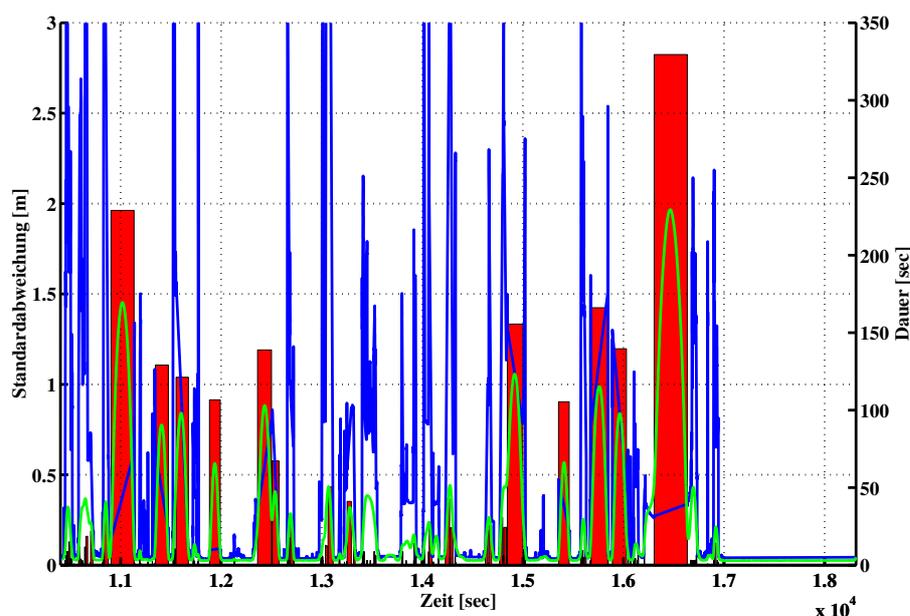


Abbildung 3.5.: Dauer der DGPS-Lücken (rote Balken), 3D-Standardabweichung der ermittelten DGPS-Positionen (blau) und 3D-Standardabweichung der Trajektorie (grün).

auf und erreicht jeweils in der Mitte einer DGPS-Lücke ein Maximum. Die dreidimensionale Standardabweichung liegt im Bereich von 0,6 m bis 0,7 m, solange die Länge einer GPS-Empfangslücke 3 Minuten nicht überschreitet. Diese Größenordnung liegt im Rahmen der Erwartungen nach Tabelle 3.2.

3.6.3. Analyse der Stetigkeit der Trajektorie

Die Stetigkeit der Trajektorie ist eine wesentliche Voraussetzung für Anwendungen der kinematischen Vermessung, insbesondere die Auswertung von Laserscanner-Messdaten (siehe Kap. 6 bis Kap. 8). Unter Stetigkeit versteht man einen kontinuierlichen Verlauf ohne Lücken oder sprunghafte Änderungen. Die Forderung nach Stetigkeit bezieht sich somit auf zwei Bereiche:

- den geometrischen Verlauf der zeitlich geordneten Epochen (Stetigkeit der Bewegungskurve) und
- die Gleichmäßigkeit der Geometrie unabhängig vom zeitlichen Ablauf der Fahrzeugbewegung (Stetigkeit in Standphasen).

Die Stetigkeit der Bewegungskurve des Fahrzeuges gewährleisten die inertialen Messdaten, d.h. die Beschleunigungen und Drehraten, sofern diese korrekt erfasst worden sind. Bei der praktischen Anwendung von Kalman-Filtern zeigt sich aber, dass Unstetigkeiten auch aufgrund von Mängeln in der Filtermodellierung oder im Laufe der Glättung entstehen können. Eine Möglichkeit zum Auffinden problematischer Stellen in der Zeitreihe ist die Bildung der Differenz zwischen den Zustandsvektoren der einzelnen Epochen nach Formel (3.2).

$$\Delta \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1} \quad (3.2)$$

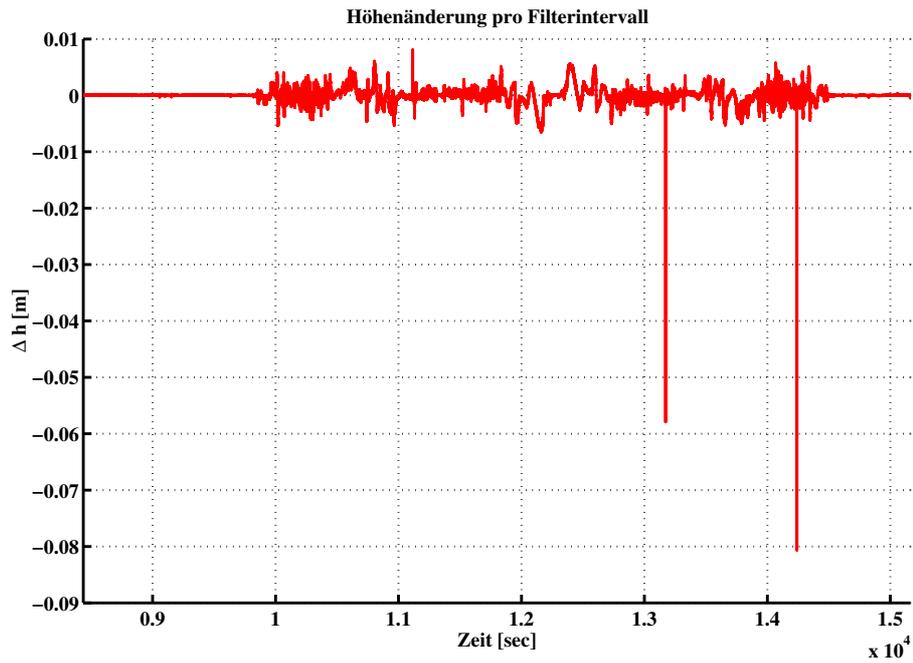


Abbildung 3.6.: Höhenänderung pro Epoche der Trajektorie in Abb. 3.4 nach Formel (3.2).

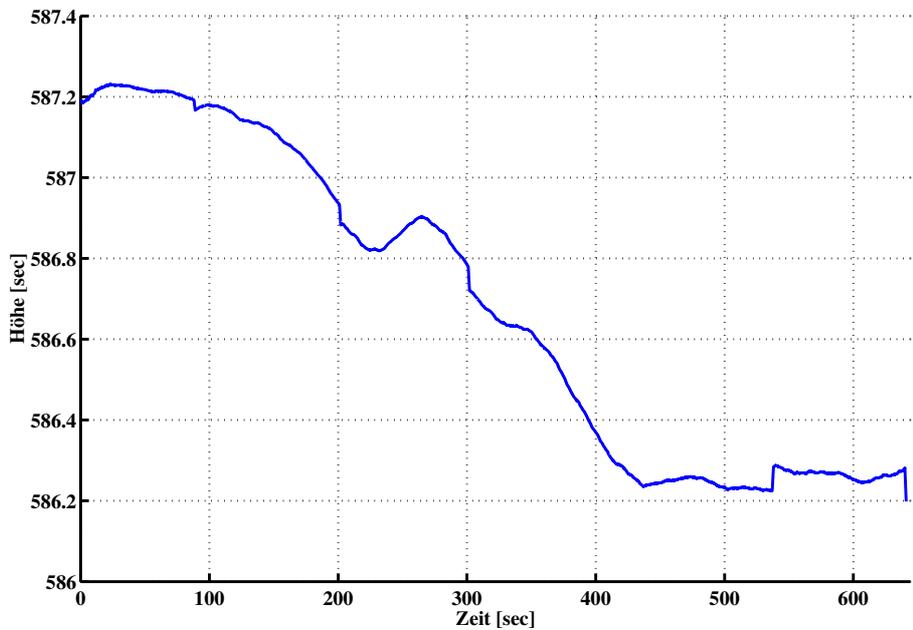


Abbildung 3.7.: Drift der Trajektorie in der Standphase am Ende der Messfahrt in Abb. 3.4.

Die zeitliche Differenz zwischen zwei Epochen $\Delta t_{k-1,k} = t_k - t_{k-1}$ beträgt 0,005 Sekunden bei einer inertialen Datenrate von 200 Hz. Die Änderung der Zustandsgrößen darf in diesem Zeitintervall einen festen Schwellwert Δ_{Max} nicht überschreiten. Grenzwerte können z.B. für die zurückgelegte Strecke oder den Höhenunterschied festgelegt werden. Für die Höhe hat sich der Schwellwert $\Delta h_{Max} = 0,01$ m bewährt. Abb. 3.6 enthält die Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Filterepochen in der Trajektorie zu Abb. 3.4. Deutlich erkennbar ist die statische Initialisierung des Messsystems am Beginn und Ende der Messfahrt. Abb. 3.6 zeigt zwei Sprünge, von denen der erste $-0,058$ m und der zweite $-0,081$ m beträgt. Die Stetigkeit der dargestellten Trajektorie geht bei der Berechnung offensichtlich verloren. Die gleichmäßige Geometrie der Trajektorie muss aber nicht nur im zeitlichen Ablauf der Messfahrt, sondern auch unabhängig davon gewährleistet sein. Dies betrifft insbesondere diejenigen Abschnitte einer Messfahrt, in denen das Fahrzeug die Bewegung unterbrechen muss und der Betrag des Fahrgeschwindigkeitsvektors den Wert Null annimmt. Typische Standphasen sind zum Beispiel Wartezeiten an Lichtsignalanlagen oder Ähnliches. Bei kinematischen Vermessungen mit einem Landfahrzeug sind hohe Forderungen an die Filtermodellierung von statischen Abschnitten zu stellen. Während das Fahrzeug steht, liegen insbesondere unter den DGPS-Positionen häufig stark verrauschte Beobachtungen vor. Trotzdem darf sich die Fahrzeugposition der geglätteten Lösung während der Standphase nicht signifikant ändern. Dies lässt sich durch entsprechende Filtermodelle sicherstellen. Abb. 3.7 zeigt die Standphase am Ende der Messfahrt in Abb. 3.4. Die Höhe ändert sich trotz stehenden Messfahrzeuges um ca. 1 m. Dieses Verhalten des Filters zur Trajektorienbestimmung ist nicht akzeptabel. Die Trajektorie aus Abb. 3.6 und Abb. 3.7 wurde mit einem Programmpaket errechnet, dessen Ergebnisse aufgrund des Mangels an Stetigkeit nicht für weitere Auswertungen verwendet werden konnten.

1.Messfahrt 86 Punkte	Standard- abweichung	Abweichung Δ_{Max}	Abweichung Δ_{Min}	Mittelwert der Abweichungen $\bar{\Delta}$
Rechtswert	0,249 m	0,513 m	-1,094 m	0,014 m
Hochwert	0,323 m	0,585 m	-1,535 m	-0,113 m
Höhe	0,338 m	0,238 m	-1,383 m	-0,130 m
2.Messfahrt 82 Punkte	Standard- abweichung	Abweichung Δ_{Max}	Abweichung Δ_{Min}	Mittelwert der Abweichungen $\bar{\Delta}$
Rechtswert	0,230 m	0,321 m	-1,143 m	-0,059 m
Hochwert	0,295 m	0,961 m	-1,126 m	-0,001 m
Höhe	0,339 m	0,904 m	-0,918 m	-0,010 m

Tabelle 3.3.: Abweichungen der Trajektorie gegenüber Passpunkten.

3.6.4. Analyse der Abweichungen gegenüber Passpunkten

Die Einhaltung der Genauigkeitsforderungen nach Kapitel 2 lässt sich unter praktischen Messbedingungen über extern gemessene Passpunkte nachweisen. Die Messung der Passpunkte kann stereo-photogrammetrisch erfolgen (siehe Kap. 3.10) oder mit Hilfe entsprechender Signalisierung über die Laserscanner (siehe Kap. 8.1). Entlang der Teststrecke aus Abbildung 3.8 existieren Passpunkte aus stationären DGPS-Messungen mit bekannten Koordinaten, die photogrammetrisch gemessen wurden. Die Genauigkeit der photogrammetrischen

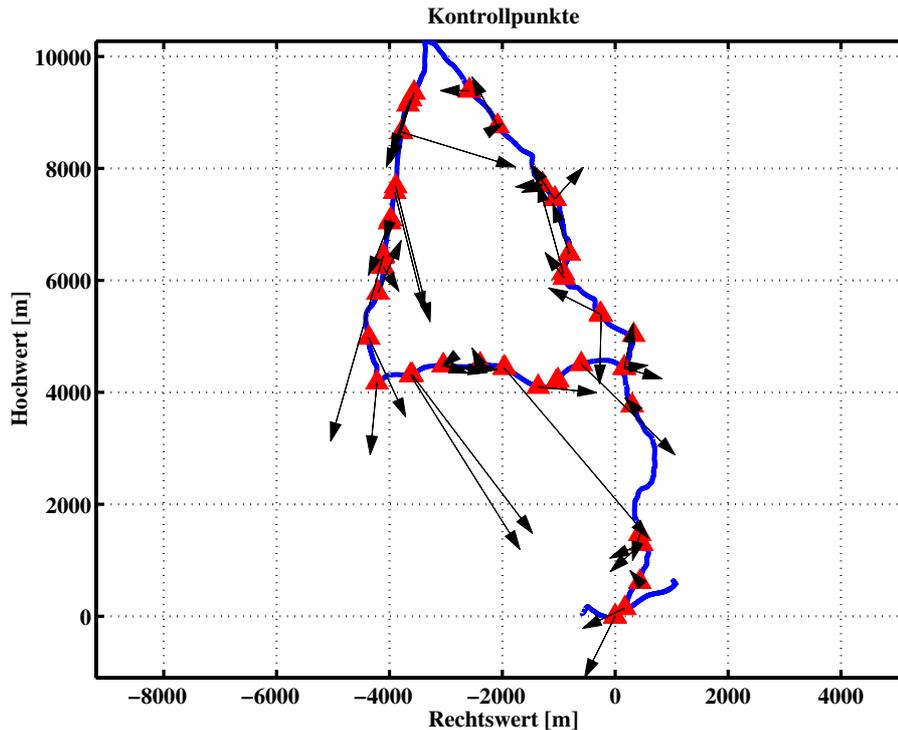


Abbildung 3.8.: Darstellung der Teststrecke aus Abb. 3.4 mit Passpunkten und deren Abweichungen (vgl. auch Abb. 3.9 und Tab. 3.3). Die Pfeile stellen die gemessenen Differenzen im Maßstab 1:50 dar.

Punktbestimmung kann mit $< 0,1$ m in der Lage und $< 0,05$ m in der Höhe angenommen werden und ist damit für den Nachweis der Genauigkeit der Trajektorie von nachgeordneter Bedeutung. Aus den Abweichungen der gemessenen Koordinaten zu den Sollwerten ergeben sich aus zwei unabhängigen Befahrungen im Hin- und Rückweg nach Tabelle 3.3 Standardabweichungen von ca. 0,30 m für Rechtswert, Hochwert und die Höhe. Dies erfüllt die Genauigkeitsanforderungen deutlich und ist für Befahrungen unter den beschriebenen, ungünstigen GPS-Bedingungen zufriedenstellend. Auffällig ist vor allem, dass die Höhe der Trajektorie nicht weniger genau ist als die Lage. Abbildung 3.9 stellt die Länge der DGPS-Lücken und die Standardabweichung der Trajektorie zusammen mit dem Betrag der Abweichung an den Passpunkten dar. In manchen Bereichen ist die geschätzte Standardabweichung erheblich kleiner als der tatsächliche Punktfehler. Dies ist vermutlich auf eine deutlich zu optimistische Genauigkeitsschätzung der DGPS-Positionen zurückzuführen. Als Folge erhalten die GPS-Beobachtungen bei der Filterung ein zu hohes Gewicht und die Trajektorie wird in einigen Bereichen systematisch verzerrt. Das Beispiel zeigt, dass die geschätzte Messunsicherheit aus der Trajektorienfilterung nicht immer ein verlässliches Maß für die tatsächliche Genauigkeit der Trajektorie darstellt. Aus diesem Grunde sind bei qualitativ hochwertige Anwendungen Maßnahmen zur Qualitätssicherung zwingend erforderlich (vgl. Kapitel 7).

3.7. Zeitsynchronisation

Voraussetzung für die Georeferenzierung gemessener Objekte ist die Herstellung eines exakten zeitlichen Bezuges zwischen den Messungen eines Sensors und dem System zur Bestimmung der Trajektorie (siehe Abb. 3.1). Folgende Anforderungen an die Synchronisation der Sensoren in einem kinematischen Messsystem lassen sich definieren:

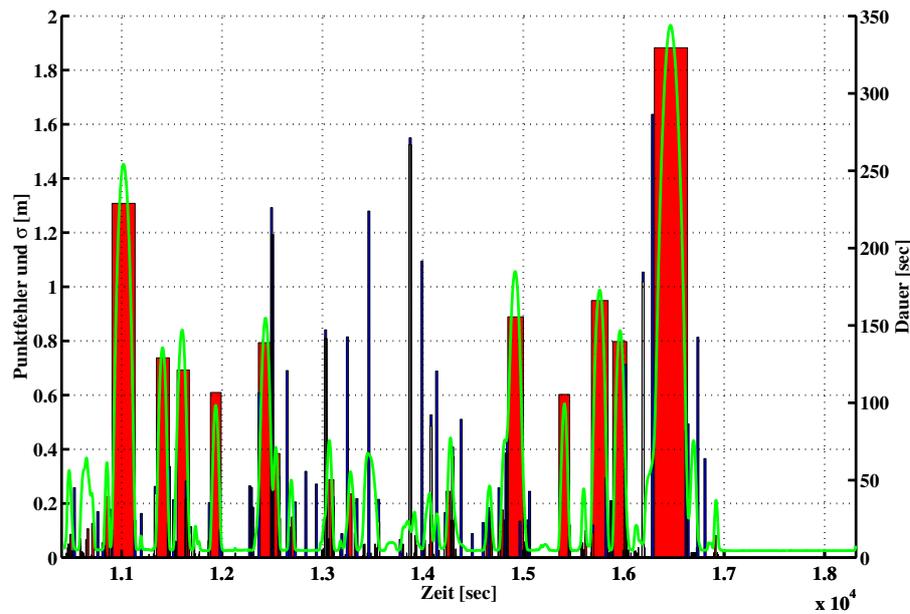


Abbildung 3.9.: Darstellung der Messfahrt aus Abb. 3.5: Dauer der DGPS-Lücken (rote Balken), Betrag der Abweichung zu den Passpunkten (blau) und 3D-Standardabweichung der Trajektorie (grün).

- Die Erfassung der Daten für alle Sensoren inklusive der Sensoren zur Bestimmung der Trajektorie erfolgt in Bezug auf eine einheitliche Zeitbasis.
- Die Güte der zeitlichen Synchronisation soll so hoch sein, dass der räumliche Bezug der jeweiligen Sensormessung ohne signifikante Bewegungsunschärfen hergestellt werden kann.

Beispiel: Eine Unsicherheit in der Zeitzuordnung von 1 ms entspricht bei einer Messgeschwindigkeit von 20 m/s einer zurückgelegten Strecke von 2 cm.

- An die Verfügbarkeit, die Stabilität und die Zuverlässigkeit der zeitliche Synchronisation der Messungen sind höchste Anforderungen zu stellen.
- Die Definition der erforderlichen Genauigkeit für die zeitliche Zuordnung richtet sich im Wesentlichen nach
 - der Auflösung der eingesetzten Sensoren,
 - der angestrebten Messgenauigkeit und
 - der vorgesehenen Bewegungsgeschwindigkeit.

Beim MoSES wird die Zeit des Systems zur Trajektorienbestimmung, also das GPS-Zeitnormal, als Basis für das Gesamtsystem verwendet. Jeder Sensor verfügt über eine eigene, interne Uhr. Die Synchronisation der internen Uhr zur Systemzeit kann je nach Sensor auf zwei Arten erfolgen:

- Einspeisung eines Taktsignals in den Sensor
- Kennzeichnung der Messwerte mit einem Zeitstempel

Das erste Verfahren synchronisiert die interne Uhr des Sensors direkt und ist aufgrund der Betriebssicherheit anderen Verfahren vorzuziehen. Wenn ein Sensor sich nicht für die Einspeisung eines externen Taktsignals eignet, kommt die softwaremäßige Kennzeichnung mit einem Zeitstempel zum Einsatz. In speziellen Fällen werden beide Methoden zur zeitlichen Homogenisierung kombiniert eingesetzt. Als Synchronisationstakt findet das PPS-Signal (Puls-Pro-Sekunde) des GPS Verwendung. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Güte der systeminternen Referenzzeit kommen normale PC-Uhren oder PC-Betriebssysteme, die nicht echtzeitfähig sind, für die Erzeugung der Zeitinformation nicht infrage.

3.8. Georeferenzierung

Georeferenzierung bedeutet, dass jedem gemessenen Objekt über die Trajektorie ein fester räumlicher Bezug im übergeordneten Koordinatensystem zugewiesen werden kann. Jeder Sensor liefert spezifische Daten entlang des vermessenen Verkehrsweges. Diese werden zunächst vorverarbeitet und schrittweise über mehrere Transformationen in das Zielkoordinatensystem überführt. Bei der Georeferenzierung finden verschiedene Koordinatensysteme Verwendung (siehe Tab. 3.4). Einzelheiten zur möglichen Festlegung der verschiedenen Koordinatensysteme finden sich in [Jekeli (2001)] und [Sigl (1991)]. Die Georeferenzierung kinematisch er-

Bezeichnung des Koordinatensystems	Abkürzung	Nullpunkt	Orientierung der Achsen
Sensor	s	Zentrum des Sensors	parallel zu den Messachsen oder der Messebene
Fahrzeug	f	definierter Bezugspunkt im Fahrzeug	x in Fahrtrichtung, y nach rechts und z nach oben
topozentrisch	t	definierter Bezugspunkt im Fahrzeug	x nach Norden, y nach Westen und z nach oben
geozentrisch	g	Ursprung des Bezugsellipsoids (WGS-84)	Achsen des Bezugsellipsoids
Anwender	a	Ursprung des Nutzer-Koordinatensystems	Achsen des konformen Nutzer-Koordinatensystems

Tabelle 3.4.: Verwendete Koordinatensysteme für die Georeferenzierung.

fasster Daten erfolgt für die verschiedenen Arten von Aufnahmesensoren in ähnlicher Weise. Ausführliche Darstellungen der Transformationen und deren Zusammenhänge finden sich in [Gräfe (1996)] und [Gräfe et al. (1998)].

3.8.1. Messdaten

Für jeden Sensor liegen Daten zu bestimmten Messepochen vor. Die Messung zur Epoche k umfasst den Messdatensatz \mathbf{w}_k sowie den zugehörigen Zeitbezug t_k . Je nach Sensortyp handelt es sich um ein- oder mehrdimensionale Messungen, zum Beispiel:

- eindimensionale Messungen
 - Wegabschnitt

- Geschwindigkeit
- zweidimensionale Messungen
 - Bildkoordinaten für ein Objekt in einer digitalen Kameraaufnahme
 - Laserscanner-Polarkoordinaten

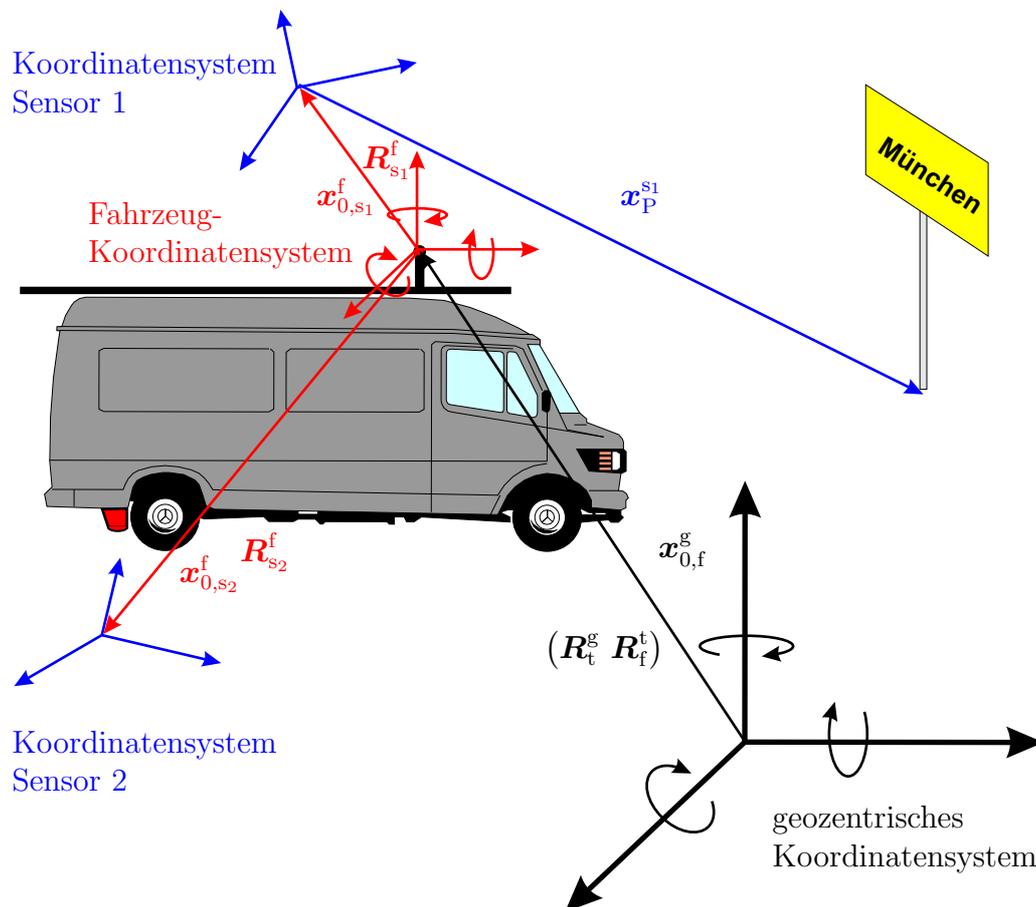


Abbildung 3.10.: Schematische Darstellung der verwendeten Koordinatensysteme.

3.8.2. Berücksichtigung der Sensorkalibrierung

Jeder Sensor unterliegt systematischen Fehlereinflüssen, die mit Hilfe von Kalibrierverfahren vor Beginn der Auswertung ermittelt und als Korrekturen nach (3.3) an den Messdaten angebracht werden müssen.

$$\mathbf{w}_{\text{Kal},k} = f_{\text{Kal}}(\mathbf{w}_k, \boldsymbol{\lambda}) \quad (3.3)$$

mit: f_{Kal} sensorspezifische Kalibrierfunktion
 $\boldsymbol{\lambda}$ sensorspezifische Kalibrierparameter

Typische Fehler eines Sensors sind Nullpunktfehler, Maßstabsfehler, Nichtlinearitäten oder Temperaturabhängigkeiten. Die systematischen Abweichungen werden als Kalibrierparameter berücksichtigt. Bei mehrdimensionalen Sensoren ist es erforderlich, komplexere Verfahren einzusetzen, z.B. die Berücksichtigung von Verzeichnungsparametern bei einer Kamera.

3.8.3. Transformation in das Sensor-Koordinatensystem

Die Georeferenzierung der Sensormessungen erfordert den Bezug der Messwerte auf ein kartesisches Sensorkoordinatensystem (s), das für jeden Sensor fest definiert werden muss (siehe Abb. 3.10). Der Übergang zwischen Sensorkalibrierung nach (3.3) und der Transformation der Messwerte in das Sensorkoordinatensystem nach (3.4) ist dabei fließend, da die Transformationsparameter zum Teil auch mit Hilfe von Kalibrierverfahren ermittelt werden.

$$\mathbf{x}_k^s = f_s(\mathbf{w}_{\text{Kal},k}, \boldsymbol{\mu}) \quad (3.4)$$

mit: \mathbf{x}_k^s Koordinate bezogen auf das Sensor-Koordinatensystem
 f_s sensorspezifische Transformationsfunktion
 $\boldsymbol{\mu}$ sensorspezifische Transformationsparameter

Ein Beispiel für die Festlegung eines Sensorkoordinatensystems ist das 2D-Laserscanner-Koordinatensystem (siehe auch Abb. 4.7):

- Ursprung: Zentrum des Laserscanners
- Ausrichtung der Achsen:
 - x-Achse als Bezugsachse für die Winkelmessung in der Scanebene
 - y-Achse senkrecht zur x-Achse in der Scanebene
 - z-Achse senkrecht auf der xy-Ebene, also in Fahrtrichtung

3.8.4. Transformation in das Fahrzeug-Koordinatensystem

Im nächsten Schritt werden die Messdaten mit Hilfe von (3.5) auf das Fahrzeug-Koordinatensystem (f) bezogen. Das Fahrzeug-Koordinatensystem stellt einen einheitlichen Bezugsrahmen für alle Sensoren her (siehe Abb. 3.10).

$$\mathbf{x}_k^f = \mathbf{x}_{0,s}^f + \mathbf{R}_s^f \cdot \mathbf{x}_k^s \quad (3.5)$$

mit: \mathbf{x}_k^f Koordinate bezogen auf das Fahrzeug-Koordinatensystem
 $\mathbf{x}_{0,s}^f$ Ursprung des Sensor-Koordinatensystems bezogen auf das Koordinatensystem des Messfahrzeuges
 \mathbf{R}_s^f Rotationsmatrix vom Sensor-Koordinatensystem in das Koordinatensystem des Messfahrzeuges

Der Translationsvektor $\mathbf{x}_{0,s}^f$ und die Parameter für die Rotationsmatrix \mathbf{R}_s^f werden in geeigneter Weise ermittelt, z.B. mit Hilfe hochgenauer Zentrierungsmessungen (vgl. Kap. 5.2). Zur Parametrisierung der Rotationsmatrix werden die drei Rotationen γ_x , γ_y und γ_z verwendet. Für die Rotationsmatrix gilt

$$\mathbf{R}_s^f = \mathbf{R}_{z,s}^f \cdot \mathbf{R}_{y,s}^f \cdot \mathbf{R}_{x,s}^f \quad (3.6)$$

mit

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{x,s}^f &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_x & -\sin \gamma_x \\ 0 & \sin \gamma_x & \cos \gamma_x \end{pmatrix}, \\ \mathbf{R}_{y,s}^f &= \begin{pmatrix} \cos \gamma_y & 0 & \sin \gamma_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma_y & 0 & \cos \gamma_y \end{pmatrix} \text{ und} \\ \mathbf{R}_{z,s}^f &= \begin{pmatrix} \cos \gamma_z & -\sin \gamma_z & 0 \\ \sin \gamma_z & \cos \gamma_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

3.8.5. Transformation in das geozentrische Koordinatensystem der Trajektorie

Aufgrund der zeitlichen Synchronisation der Sensormessungen steht zum Aufnahmezeitpunkt t_k die Trajektorie als äußere Orientierung zur Verfügung. Die Trajektorie bezieht sich auf ein geozentrisches Koordinatensystem, z.B. WGS-84 (World Geodetic System). Zur Transformation eines Punktes \mathbf{x}_k^f in das übergeordnete Koordinatensystem werden die dreidimensionalen Lagewinkel und die Koordinaten für den Bezugspunkt des Fahrzeug-Koordinatensystems benötigt.

$$\mathbf{x}_k^g = \mathbf{x}_{0,f_k}^g + \mathbf{R}_{t_k}^g \cdot \mathbf{R}_{f_k}^t \cdot \mathbf{x}_k^f \quad (3.7)$$

mit: \mathbf{x}_k^g Position bezogen auf das geozentrische Koordinatensystem
 \mathbf{x}_{0,f_k}^g geozentrische Position für den Ursprung des Fahrzeug-Koordinatensystems
 $\mathbf{R}_{t_k}^g$ Rotationsmatrix vom topozentrischen Koordinatensystem in das geozentrische Koordinatensystem
 $\mathbf{R}_{f_k}^t$ Rotationsmatrix vom Fahrzeug-Koordinatensystem in das topozentrische Koordinatensystem

Im ersten Schritt erfolgt die Transformation vom Fahrzeug in das topozentrische Koordinatensystem, das eine fahrzeuggebundene Realisierung eines Navigationskoordinatensystems darstellt. Für die Rotation in das topozentrische Koordinatensystem gilt:

$$\mathbf{R}_{f_k}^t = \begin{pmatrix} \cos \alpha_k \cos \varphi_{y,k} & \cos \varphi_{x,k} \sin \alpha_k + \sin \varphi_{y,k} \sin \varphi_{x,k} \cos \alpha_k & & \\ \cos \varphi_{y,k} \sin \alpha_k & -\cos \varphi_{x,k} \cos \alpha_k + \sin \alpha_k \sin \varphi_{y,k} \sin \varphi_{x,k} & \cdots & \\ -\sin \varphi_{y,k} & \cos \varphi_{y,k} \sin \varphi_{x,k} & & \\ & -\sin \varphi_{x,k} \sin \alpha_k + \sin \varphi_{y,k} \cos \varphi_{x,k} \cos \alpha_k & & \\ & \cos \alpha_k \sin \varphi_{x,k} + \sin \varphi_{y,k} \cos \varphi_{x,k} \sin \alpha_k & & \\ & \cos \varphi_{y,k} \cos \varphi_{x,k} & & \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

mit: $\varphi_{x,k}$ Rollwinkel
 $\varphi_{y,k}$ Nickwinkel
 α_k Azimut

Die Vorzeichen der Winkel hängen von der Definition der Achsen des Fahrzeug-Koordinatensystems ab. Mit λ_k als geographische Länge und φ_k als geographische Breite der Messplattform zum Zeitpunkt t_k gilt für die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{t_k}^g$:

$$\mathbf{R}_{t_k}^g = \begin{pmatrix} -\cos \lambda_k \sin \varphi_k & -\sin \lambda_k & \cos \lambda_k \cos \varphi_k \\ -\sin \lambda_k \sin \varphi_k & \cos \lambda_k & \cos \varphi_k \sin \lambda_k \\ \cos \varphi_k & 0 & \sin \varphi_k \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

3.8.6. Transformation in das Nutzer-Koordinatensystem

Nach Abschluss der Georeferenzierung können die gewonnenen Koordinaten in ein Anwenderkoordinatensystem transformiert werden. Dies beinhaltet zumeist den Übergang auf ein anderes Bezugsellipsoid und eine spezielle Abbildung zur Verebnung mit einem festgelegten geodätischen Datum. Eine umfassende Darstellung der Algorithmen findet sich in [Schödlbauer (1982)]. Häufig findet das jeweilige Landeskoordinatensystem Verwendung. Das Ergebnis

sind Koordinaten \mathbf{x}_k^a für die aufgenommenen Messdaten zur Epoche k . In einem weiteren Schritt kann durch die Verwendung von Passpunkten die Anpassung der Messergebnisse an ein lokales Koordinatensystem erfolgen. Die dreidimensionalen Transformationsparameter werden über die Messung von Passpunkten erzeugt (vgl. Kap. 8.1). Ein Spezialfall ist das Anwenderkoordinatensystem der Straßenbauverwaltung (vgl. Kap. 2.2.2). Im Netzknoten-Stationierungssystem werden die dreidimensionalen Koordinaten auf die Straßenachse abgebildet und mit Station und Abstand zur Achse referenziert (siehe Kap. 7.4.1).

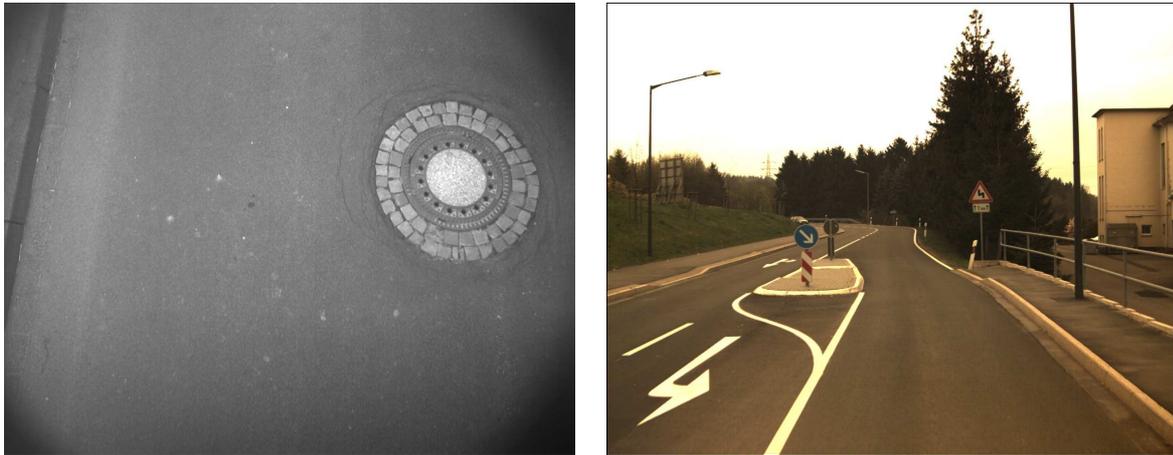


Abbildung 3.11.: Beispiel für ein Bild der Fahrbahnoberfläche (links) und des Straßenraumes (rechts).

3.9. Bilddokumentation

Die Bilddokumentation liefert wichtige Informationen über den Straßenraum sowie die sichtbaren Fahrwegeigenschaften. Die Daten dienen Anwendern zur Einschätzung der Situation vor Ort. Digitale Bilddaten sind ein grundlegender Bestandteil von Straßendatenbanken (siehe Kap. 2.2) oder liefern im Rahmen der Straßenzustandserfassung (siehe Kap. 2.3) Informationen für die Zustandsbewertung des Verkehrsweges oder die Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Die bildhafte Dokumentation des Straßenraumes erfolgt beim System MoSES durch digitale Einzelbilder verschiedener Kameras. Aktuell ist das Fahrzeug mit 3 Kameras ausgestattet (siehe Abb. 3.12). Eine Kamera dokumentiert den Straßenraum in Fahrtrichtung. Die zweite Kamera wird nach rechts zum Fahrbahnrand ausgerichtet, während die Aufgabe der dritten Kamera die Dokumentation der Fahrbahnoberfläche des aktuell befahrenen Fahrstreifens ist (siehe Abb. 3.11). Die Bilder der hinteren Kameras von der Straßenoberfläche dienen zur visuellen Beurteilung des Straßenzustandes. Die Aufnahmen der Dokumentationskameras werden zeitlich zur Trajektorie synchronisiert und mit Hilfe der Trajektorie georeferenziert. Auf diese Weise lassen sich die Bilddaten flexibel in geographische Informationssysteme einbinden. Ein Beispiel für eine Anwendungssoftware enthält Abbildung 3.13. Die Bilddaten für alle Kameras und verschiedene Fahrten werden parallel verwaltet und auf der Basis der Referenzierung organisiert. Die Orientierung für jedes Bild ermöglicht zudem die Abbildung von Hilfslinien, wie z.B. der eingblendeten Entfernungsmarkierung.

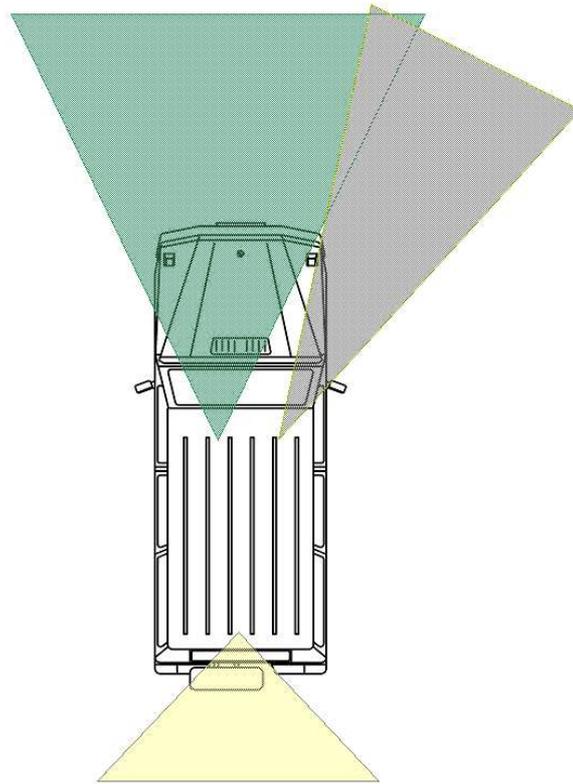


Abbildung 3.12.: Anordnung der Kameras zur Bilddokumentation im MoSES.

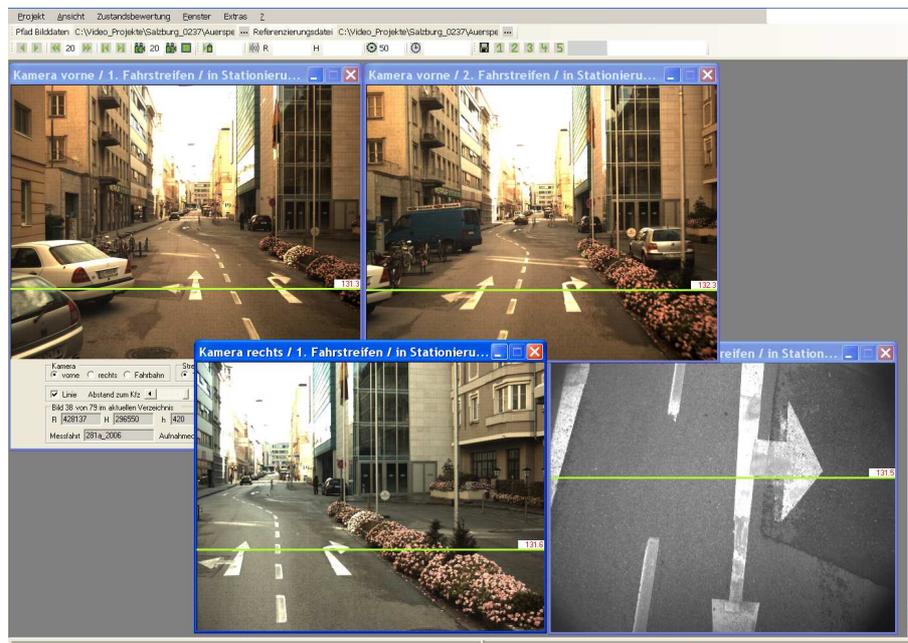


Abbildung 3.13.: Software für die Verwaltung und Betrachtung der Bilddaten. Die grüne eingeblendete Linie markiert eine Entfernung von 15 m zur Kamera.

3.10. Stereophotogrammetrische Objektmessung

Die Bestimmung von Koordinaten für Objekte im Straßenraum erfolgt beim System MoSES mit Hilfe stereo-photogrammetrischer Messverfahren aufbauend auf dem photogrammetrischen Vorwärtsschnitt. In den Aufnahmen von jeweils zwei synchronisiert arbeitenden



Abbildung 3.14.: Photogrammetrische Auswertungssoftware.

Kameras mit überlappender Ausrichtung werden Bildkoordinaten gemessen. Unter der Voraussetzung, dass die innere Orientierung der Kameras bekannt ist, lassen sich mit Hilfe der relativen Orientierung der Kameras zueinander dreidimensionale Koordinaten berechnen. Die erforderlichen Parameter werden im Rahmen der Kalibrierung des Systems bestimmt ([Gräfe (1996)]; [Klemm et al. (1997)]). Die Aufnahmen der Kameras erfolgen zeitlich exakt synchronisiert zur Trajektorie. Entlang der gefahrenen Fahrstrecke lassen sich in einem ca. 15 m breiten Korridor Koordinaten für alle Objekte bestimmen, die in den Stereobildpaaren sichtbar sind. Die gemessenen Objekte werden mit Hilfe der Trajektorie georeferenziert und nach den Algorithmen in Kap. 3.8 in das Nutzer-Koordinatensystem überführt. Die Messunsicherheit der photogrammetrischen Punktbestimmung relativ zum Fahrzeugkoordinatensystem liegt bei einer Messentfernung bis 30 m unter günstigen Bedingungen bei $< 0,1$ m für die Position und $< 0,05$ m für die Höhe [Gräfe et al. (2001)]. Die Genauigkeit der photogrammetrischen Messung kann durch Umgebungsbedingungen beeinträchtigt werden. Negativ wirken sich insbesondere die Lichtverhältnisse aus, wie zum Beispiel starke Sonneneinstrahlung, Abschattungen oder Bereiche mit stark wechselnden Beleuchtungsverhältnissen. Außerdem lassen sich an manchen Objekten Messpunkte nicht befriedigend definieren. Aufgrund der kurzen Basis zwischen den Kameras von ca. 1,80 m steigt die Messunsicherheit generell mit der Entfernung vom Fahrzeug. Relative Maße zwischen den Objekten in einem Stereobildpaar, wie z.B. die Fahrstreifenbreite, lassen sich mit einer Messunsicherheit unter 0,03 m messen. Für die photogrammetrische Auswertung der Befahrungen mit den Systemen KiSS und MoSES wurde eine speziell ausgelegte, praxistaugliche Auswertungssoftware entwickelt, die neben der Bestimmung von Koordinaten die visuelle Identifikation der gesuchten Objekte und die Vergabe der Attribute ermöglicht (siehe Abb. 3.14). Objekte für verschiedene Anwendungsgebiete lassen sich photogrammetrisch effizient ermitteln. Im Verlauf von Pilot-

projekten wurden umfangreiche Erfahrungen mit der photogrammetrischen Objektbestimmung gesammelt ([Caspary et al. (2000)], [Sternberg et al. (2001)] und [Heister und Gräfe (2004)]). Insbesondere für Bebauung, Leitpfosten, Beschilderungen oder Lichtsignalanlagen bietet sich eine kamerabasierte Erfassung an. Relative Maße im Straßenraum, wie zum Beispiel Brückenhöhen, Fahrbahnbreiten, Dimensionen von Schutzplanken, Abstände etc. lassen sich in digitalen Bildpaaren ebenfalls zuverlässig bestimmen. Die Genauigkeitsforderungen aus Kap. 2.1 sind mit stereo-photogrammetrischen Methoden in Teilbereichen zu erfüllen. Allerdings hat sich gezeigt, dass flächenhafte Objekte mit Hilfe von Kameras messtechnisch nur mit hohem Aufwand und gleichzeitig ungenügender Genauigkeit zu erfassen sind. Daher bietet sich der kombinierte Einsatz mit Laserscannern an, die insbesondere bei der Erfassung der Fahrbahnoberfläche oder auch bei der kinematischen Vermessung von Tunneln oder Brücken zum Einsatz kommen (siehe Kap. 8). Beide Sensorsysteme weisen komplementäre Eigenschaften auf. Ein Beispiel für die kombinierte Nutzung von Photogrammetrie- und Laserscanner-Messdaten findet sich in Kapitel 7.

4. Kinematischer Einsatz von Laserscannern

Laserscanner sind aktive, optische Messsysteme, die auf der Aussendung von Laserlicht basieren und der berührungslosen Abtastung von Objekten oder Oberflächen dienen. Die statische Vermessung mit 3D-Laserscannern ist mittlerweile weit verbreitet. Im Straßenraum kommen statische Verfahren nur für die Aufnahme kurzer Abschnitte in Betracht, z.B. bei Brücken- oder Tunnelvermessungen. Luftfahrzeugbasierte Laserscanner-Messverfahren haben sich bei der großräumigen Erstellung digitaler Geländemodelle fest etabliert. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Methoden gibt [Lindenberger (1993)]. In Bezug auf Reichweite und Signalstärke müssen die aus der Luft eingesetzten Scanner deutlich leistungsfähiger sein. Die kinematische Vermessung von Verkehrswegen bzw. eines Verkehrskorridors mit scannerbasierten Techniken erfolgt dagegen im Nahbereich. Die Messentfernung zur Fahrbahnoberfläche für ein fahrzeuggestütztes System liegt unter 10 m. Zur Erfassung der Bebauung sind Messdistanzen bis zu 100 m denkbar. Die nachfolgenden Darstellungen beschränken sich auf diejenigen Laser-Messprinzipien, die für die kinematische Aufnahme von Verkehrswegen in Frage kommen.

4.1. Grundlagen und Funktionsprinzipien

4.1.1. Messprinzip

Im Aufbau eines Laserscanners werden die Komponenten Entfernungsmesseinheit, Ablenk-system, Steuereinheit und Datenaufzeichnungseinheit unterschieden [Wehr (1998)]. Die Entfernungsmesseinheit arbeitet reflektorlos durch Emission von Lasersignalen, die häufig im nahen Infrarotbereich liegen (siehe Abb. 4.1). Durch geeignete optische Bauteile und Stellmotoren wird erreicht, dass der Messstrahl in die gewünschte Richtung gelenkt wird [Schlemmer (1996)]. Im Fall eines 2D-Scanners wird nur eine Ablenkeinheit verwendet, die mit möglichst hoher Frequenz in der Ebene rotiert. Zur dreidimensionalen Abtastung räumlicher Objekte muss zusätzlich die Scanebene bewegt werden. Bei statischen Scannern geschieht dies durch ein zweites Ablenk-system. Bei kinematischen Scanverfahren ist der zweite Ablenkspiegel entbehrlich, da sich die Messebene des Scanners mit dem Fahrzeug bewegt [Heinz et al. (2001)]. Das Ergebnis der Aufnahme sind Polarkoordinaten bestehend aus der gemessenen Entfernung und der Winkelstellung des mechanischen Ablenkspiegels oder -prismas bezogen auf das momentane Zentrum des Scanners. Manche Scansysteme geben zusätzlich die Intensität des reflektierten Lasersignals aus. Die Intensität lässt Rückschlüsse auf die Reflektivität des angemessenen Objektes zu. Die reflektorlose Distanzmessung bei Laserscannern erfolgt im wesentlichen mit Hilfe zweier Verfahren:

- Impulslaufzeitverfahren
- Phasendifferenzverfahren

Die Grundlagen der elektrooptischen Distanzmessung im geodätischen Bereich sind detailliert z.B. in [Joeckel und Stober (1999)] beschrieben.

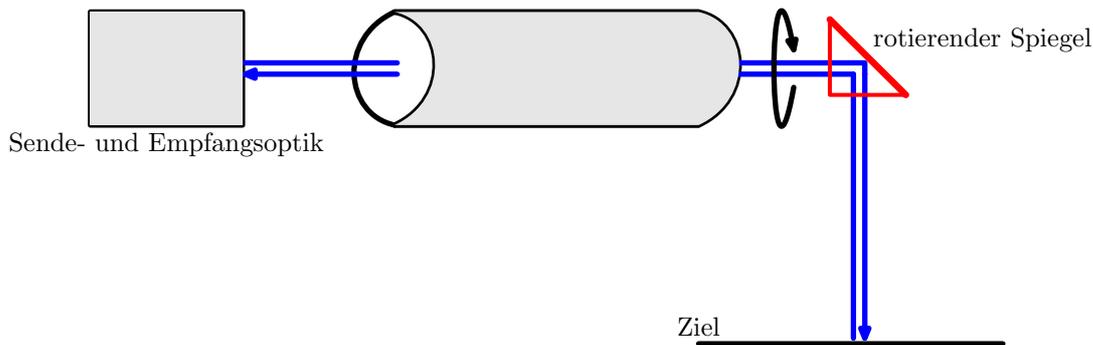


Abbildung 4.1.: Funktionsprinzip eines 2D-Laserscanners.

Impulslaufzeitverfahren Die Laufzeitmessung basiert auf der präzisen Messung der Zeitspanne Δt zwischen dem Aussenden des Impulses einer Laserdiode von wenigen ns Dauer und dem Empfang des reflektierten Signals. Unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit c gilt für die gemessene Entfernung $e = c \cdot \Delta t / 2$. Die Auflösung der Messung hängt in erster Linie von der Güte der Zeitmessung ab. Eine Entfernung von 1 mm entspricht einer Laufzeit Δt von 6,6 ps.

Phasendifferenzverfahren Beim Phasendifferenzverfahren tritt an die Stelle der Pulsmodulation des Trägersignals eine sinusförmige Modulation der Frequenz f . Die Laufzeitmessung basiert auf der Messung der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen Sende- und Empfangssignal. Die eindeutig messbare Distanz ist auf die halbe Modulationswellenlänge begrenzt. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen und eindeutige Entfernungsbestimmungen zu ermöglichen, wird der Messvorgang durch die Verwendung mehrerer aufeinander abgestimmter Frequenzen in Stufen unterteilt. Es werden mindestens zwei Frequenzen nacheinander eingesetzt.

4.1.2. Systematische Messabweichungen

Die verschiedenen Verfahren zur Entfernungsmessung weisen systematische Fehlerquellen auf ([Joeckel und Stober (1999)]; [Schlemmer (1996)]). Im einfachsten Fall sind dies die Nullpunktkorrektur und der Skalenfaktorfehler. Eine wesentliche Fehlerquelle für alle Verfahren sind Abweichungen in der Zeitmessung. Aufgrund der kurzen Distanzen, die bei kinematischen Messungen mit Laserscannern auftreten, sind atmosphärische Parameter von untergeordneter Bedeutung. Zur Minimierung der Auswirkung der verschiedenen Fehlereinflüsse verwenden einige Lasersysteme interne Referenzstrecken zur laufenden Rekalibrierung während des Messvorgangs. Die Laserscanner unterliegen außerdem sensortypischen Messfehlern, die sich analog zu den systematischen Einflüssen bei Tachymetern untersuchen lassen (siehe zum Beispiel [Ingensand et al. (2003)] oder [Schulz und Ingensand (2004)]).

4.1.3. Probleme der reflektorlosen Entfernungsmessung

Bei der reflektorlosen Entfernungsmessung mit Laserscannern treten durch die geometrischen Gegebenheiten der Zielflächen Probleme auf, die für die erfolgreiche Auswertung der Messungen und die korrekte Interpretation der Ergebnisse zu beachten sind:

- Das reflektierte Signal bezieht sich auf eine Zielfläche, nicht auf einen Zielpunkt. Der Durchmesser der abgetasteten Fläche hängt von der Bauart des jeweiligen Scanners ab.

- Bei allen Verfahren ist die Güte der Messung abhängig von der Intensität des reflektierten Signals, so dass häufig bei geringerer Signalstärke eine Zunahme der Messunsicherheit zu beobachten ist.
- Der Öffnungswinkel der Sendekeule des Lasers lässt sich auch mit einer vorgeschalteten Optik nicht beliebig verkleinern und nicht über den gesamten Messbereich gleichmäßig fokussieren. Der Messstrahl divergiert. Aus diesem Grund nimmt die Größe der abgetasteten Fläche mit der Entfernung zu (vgl. auch Abb. 4.5). Entsprechend nimmt die Intensität I des Signals ab (siehe Kap. 5.1.7).
- Licht wird an Oberflächen diffus reflektiert, so dass die reflektierte Intensität abnimmt. Zusätzlich führt schräges Auftreffen der Lichtwellen auf das Ziel zu einem Signalverlust, der mit Abweichung des Messstrahles aus der Lotrichtung zunimmt (vgl. Kap. 5.1.7).
- Die reflektorlose Entfernungsmessung setzt eine homogene, stetige Zielfläche voraus. Insbesondere an Ecken oder Lücken können durch Mehrfachreflexionen fehlerhafte Entfernungsmessungen auftreten (Abb. 4.2).
- Manche Laserscanner sind empfindlich gegen Fremdlicht, z.B. den Infrarotanteil des Sonnenlichts. Durch direkte Sonneneinstrahlung oder Reflexionen des Sonnenlichts kann es zu Fehlmessungen kommen.

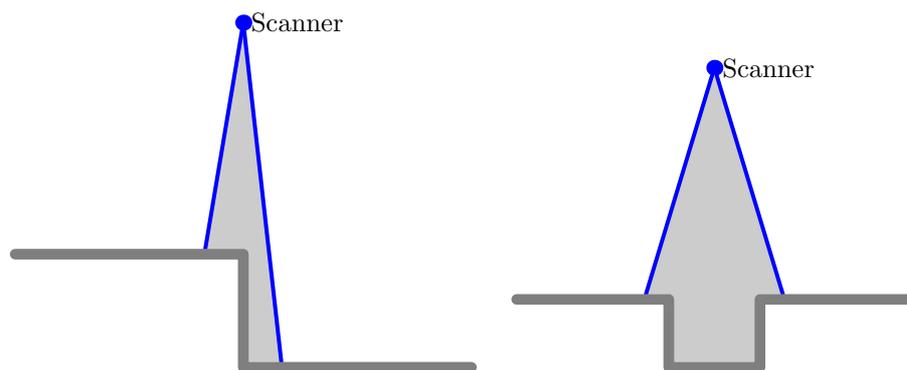


Abbildung 4.2.: Mehrfachreflexion durch Unstetigkeiten der Zielfläche, z.B. durch Kanten.

4.1.4. Anforderungen an Laserscanner für die kinematische Vermessung

Ergänzend zu den Forderungen aus Kapitel 3.2 an ein System zur mobilen Erfassung des Straßenraumes lassen sich folgende zusätzliche Kriterien zur Auswahl geeigneter Laserscanner festlegen:

- Hohe Messgeschwindigkeit, d.h. hohe Wiederholungsfrequenz von regelmäßigen Abtastungsmustern. Im einfachsten Fall handelt es sich um Profilmessungen mit jeweils möglichst vielen Messpunkten.
- Auflösung und Messunsicherheit der Streckenmessung im mm-Bereich oder darunter
- Hohe Zuverlässigkeit der reflektorlosen Entfernungsmessung
- Robuste Signalauswertung, auch bei unterschiedlicher Reflektivität der Oberfläche

- Geringe Störanfälligkeit durch Umgebungseinflüsse, wie z.B. Sonnenlicht
- Stabilität der Sensorkalibrierung auch bei längeren Messzeiten
- Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen Störungen durch die Bewegungen des Trägerfahrzeuges
- Begrenzte Leistung des Laserlichtes zur Gewährleistung der Augensicherheit
- Reichweite des Scanner mindestens 10 m
- Zuverlässige Ermittlung der Winkelstellung des Ablenkspiegels bei jeder Messung
- Synchronisierbarkeit in Bezug auf ein externes Zeitsignal

4.1.5. Laserscanner für kinematische Anwendungen

Diverse Laserscanner-Modellreihen verschiedener Hersteller sind auf dem Markt verfügbar. Für den kinematischen Einsatz auf Straßen- oder Schienenwegen kommen nur wenige Systeme in Frage (vgl. auch Kap. 2.5). Tabelle 4.1 enthält eine Auswahl geeigneter Modelle. Bei allen dargestellten Laserscannern handelt es sich um 2D-Scanner mit nur einer Strahlableitfähigkeit. Die 2D-Scanner werden für kinematische Anwendungen quer zur Fahrtrichtung montiert (vgl. Abb. 4.4 und Abb. 4.6). Die Profilmessung ergibt zusammen mit der Fahrzeugbewegung in Längsrichtung dreidimensionale, zylindrische Koordinaten. Alle ausgewählten Scanner ermitteln neben der Entfernung auch die Intensität des empfangenen Signals. Die Systeme in Tabelle 4.1 kommen aus verschiedenen Anwendungsgebieten und repräsentieren unterschiedliche Preiskategorien. Der LMS 200 ist ein Scanner, der für ein breites Anwendungsspektrum von der Sicherheitstechnik bis zur Schüttgutvermessung eingesetzt und in großer Stückzahl hergestellt wird. Bei den Scannern LMS - Q250i, Profiler 6000 und CPS 201 handelt es sich um Vermessungssysteme, die für die dreidimensionale kinematische Vermessung von Straßen- oder Schienenwegen bis hin zur Datenerfassung für die 3D-Stadtmodellierung sowie zur Aufnahme von Tunnelbauwerken konzipiert worden sind. Der PPS 2005 ist ein speziell für die Belange der Straßenzustandserfassung ausgelegter Laserscanner, dessen Kernanwendungen im Bereich der exakten Vermessung von Fahrbahnoberflächen, der Erkennung von Rissen in der Fahrbahndecke und der Ableitung von Zustandswerten für Längsebenheit und Querebenheit liegen. Entsprechend den unterschiedlichen Zielsetzungen unterscheiden sich die Scanner hinsichtlich der Leistungsfähigkeit deutlich. Die Punktdichte im Profil liegt zwischen 181 Punkten (LMS 200) und 5000 Punkten (CPS 201). Die höchste Messrate zeigt der PPS 2005. Die Phasendifferenzmessung ermöglicht gegenüber der Impulslaufzeitmessung generell höhere Auflösungen und höhere Genauigkeiten. Allerdings birgt die Phasenvergleichsmessung auch ein vermehrtes Risiko für grobe Messfehler [Blug et al. (2005)]. Bei hoher Reflektivität der Zieloberfläche und einer Messentfernung deutlich unter 10 m liegt die Wiederholgenauigkeit der Einzelmessung zwischen 10 mm (LMS - Q250i) und 0,07 mm (PPS 2005). Die Messgenauigkeit der Geräte hängt neben der Güte der Messelektronik auch von der Art und Weise ab, mit der die Kalibrierung geräteintern sichergestellt wird. Dies geschieht beispielsweise durch den ständigen Abgleich der aktuellen Messwerte mit einer internen Referenzstrecke. Mögliche Konzepte zur Minimierung der Fehlereinflüsse finden sich in [Blug et al. (2005)]. Die mögliche Größenordnung systematischer Fehler wird nicht von allen Herstellern veröffentlicht. Der systematische Fehleranteil ist gegenüber dem Messrauschen der Einzelmessung in allen Fällen signifikant und liegt zwischen ≤ 15 mm (LMS 200) und 1 mm (PPS 2005).

Hersteller	Sick	Riegl	Zoller+Fröhlich	Fraunhofer (IPM)	Phoenix Scientific
Typ	LMS 200	LMS-Q250i	Profilier 6000	CPS 201	PPS 2005
Verfahren zur Distanzmessung	Impuls	Impuls	Phase	Phase	Phase
Öffnungswinkel (effektiv) [°]	180	350	360	350	90
Punkte pro Profil (max.)	181	600	2048	5000	944
Profile pro Sekunde (max.)	75	40	300	50	1000
Messentfernung (max.) [m]	8 bis 80 (je nach Modus)	15	25, 2	9, 6	keine Angabe
Auflösung Entfernungsmessung [mm]	1 oder 10 (je nach Modus)	5	1	1, 2	0, 02
systematischer Fehler [mm]	≤ 15	≤ 10	≤ 4	nicht signifikant	≤ 1
σ [mm] (hohe Reflektivität)	5	10	1, 0	3	0, 07
σ [mm] (geringe Reflektivität)	keine Angabe	10	1, 6	10	0, 25
Winkelauflösung [°]	keine Angabe	0, 01	0, 18	keine Angabe	keine Angabe
Quelle	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Legende	
Phase	Phasendifferenzverfahren
Impuls	Impulslaufzeitverfahren
(1)	[Sick (2005)]
(2)	[Riegl (2005)]
(3)	[Zoller+Fröhlich (2004)]
(4)	[Fraunhofer (IPM)], [Blug et al. (2004)]
(5)	[Phoenix (2005)]

Tabelle 4.1.: 2D-Laserscanner für kinematische Anwendungen.

Lediglich für den CPS 201 wird vom Hersteller angegeben, dass der systematische Anteil aufgrund spezieller, interner Kompensationsmaßnahmen keine signifikante Größe erreicht. Ein wichtiger Punkt für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Laserscanners ist die Güte der Winkelmessung. In den meisten Fällen sind zu diesem Punkt kaum Angaben verfügbar. Einer Winkelauflösung von $0,18^\circ$ (Profiler 6000) entspricht zum Beispiel in 10 m Entfernung eine relativ große radiale Abweichung von 0,07 m. Der LMS 200 sieht dagegen gar keine Winkelausgabe vor. Die jeweiligen Winkel werden den Entfernungsmessungen anhand der Messreihenfolge zugeordnet. Dabei ergibt der Takt der Streckenmessung in 1° Schritten den zugehörigen Rotationswinkel.

4.2. Eigenschaften und Messaufbau der Laserscanner im MoSES

Das System MoSES wurde mit zwei Laserscannern Sick LMS 200 ausgestattet, siehe Abb. 4.3 und 4.4.

4.2.1. Der Laserscanner LMS 200

Der LMS 200 arbeitet nach dem Prinzip der Impulslaufzeitmessung. Ein einzelner, senkrecht zur Achse des Scanners rotierender Spiegel lenkt den Strahl ab, so dass für Zielpunkte innerhalb der Scanebene Polarkoordinaten bestimmt werden (siehe Abb. 4.5). Der Scanner



Abbildung 4.3.: Laserscanner LMS 200, hergestellt von der Firma Sick.

erfasst pro Sekunde 75 Profile mit einem Öffnungswinkel von 180° . Die Abtastung erfolgt in Schritten von 1° , so dass 181 Messungen pro Profil vorliegen. Die Divergenz des Messstrahles beträgt $0,25^\circ$. Bei lotrechtem Einfall liegt der Durchmesser der abgetasteten Fläche pro Messpunkt in einer Distanz von 2 m bei 2,1 cm und in einer Distanz von 8 m bei 4,7 cm. Die maximale Messentfernung des Scanners liegt mit mm-Auflösung bei 8 m. Neben der Entfernung zum Zielpunkt kann auch die Intensität des reflektierten Signals ausgegeben werden, die auch als Remission bezeichnet wird. Die Intensität des reflektierten Signals hängt von der Oberflächenstruktur und Helligkeit des Zieles sowie der Entfernung und dem Einfallswinkel des Messstrahles ab. Die Konfiguration des LMS 200 ist variabel und erlaubt die spezielle Anpassung des Scanners für verschiedene Messaufgaben. Die Messungen lassen sich z.B. für den vollständigen Öffnungswinkel oder auch nur für Teile davon ausgeben. Bei der Ausgabe aller Messwerte inklusive der Remissionsmessungen für den gesamten Messbereich sinkt die effektive Scanrate von 75 Hz auf 37,5 Hz, da die Schnittstelle des Gerätes bei umfangreicheren Datenmengen nur die Ausgabe jedes zweiten Profils ermöglicht.



Abbildung 4.4.: Laserscanner-Messaufbau mit Ausrichtung beider Scanner nach unten.

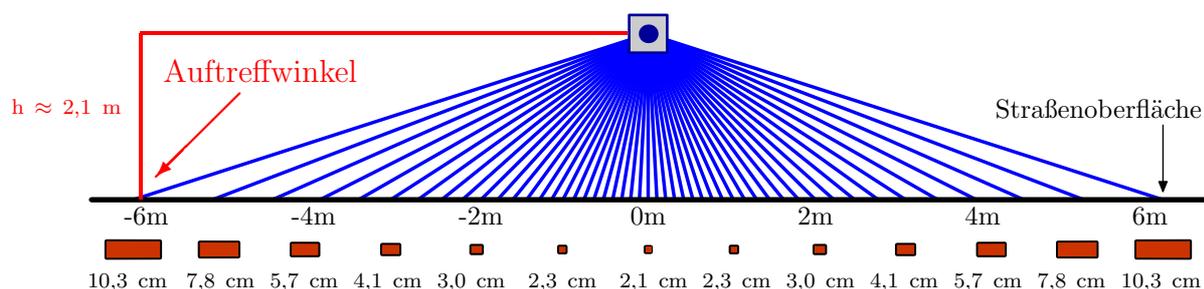


Abbildung 4.5.: Schematische Darstellung eines Profils mit zugehöriger maßstäblich vergrößerter Darstellung der Messpunkte.

4.2.2. Messaufbau

Die Anbringung der beiden Scanner LMS 200 am MoSES Trägerfahrzeug wurde so gewählt, dass Profile quer zur Befahrungsrichtung abgetastet werden, siehe Abb. 4.4 und 4.5. Durch die Bewegung des Messfahrzeuges entsteht eine dreidimensionale Vermessung des Aufnahmekorridors. Abbildung 4.6 stellt die Messungen schematisch dar. Die gegenseitige Ausrichtung der Scanner ist variabel und reicht von der redundanten Erfassung der Fahrbahnoberfläche durch beide Sensoren bis zur entgegengesetzten Ausrichtung, die vollständige 360° Unterführungs- oder Tunnelprofilmessungen möglich macht. Die Höhe des Scanners über der Fahrbahnoberfläche liegt bei ca. 2,1 m. Für den Einsatz im System MoSES wurde der Messbereich der Laserscanner standardmäßig auf 8 m begrenzt und die Messauflösung auf 1 mm festgelegt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h weisen benachbarte Scanprofile bei einer Aufnahme rate von 75 Hz einen Abstand von 22 cm in Bewegungsrichtung auf. Abhängig von der Entfernung zum Scanner liegt der Punktabstand innerhalb der Profile zwischen 3,5 cm senkrecht unter dem Scanner und 7 cm in einer Aufnahmeentfernung von 4 m (vgl. Abb. 4.6). Dies entspricht einer mittleren Punktdichte von 90 Messpunkten pro Quadratmeter und Scanner in Bezug auf einen Aufnahmekorridor von 8 m Breite.

4.2.3. Datenerfassung

Zum Zweck der Konfiguration, Steuerung und zeitsynchronisierten Datenerfassung wurde ein Modul Laserscanner für das MoSES aufgebaut, das aus der Hardware und speziell entwickelter Software besteht. Die Software stellt alle benötigten, teilweise komplexen Konfigurationsmöglichkeiten zur Verfügung und stellt die korrekte Datenerfassung sicher. Schwerpunkt

Entfernung zum Scanner [m]	6	5	4	3
Auftreffwinkel [°]	70	65	58	46

Tabelle 4.2.: Winkel der Messstrahlen beim Auftreffen auf die Fahrbahnoberfläche bezüglich des Messaufbaus im MoSES. Die Höhe über der Fahrbahn beträgt ca. 2,1 m. Der Auftreffwinkel ist hier die Abweichung aus der Lotrichtung.

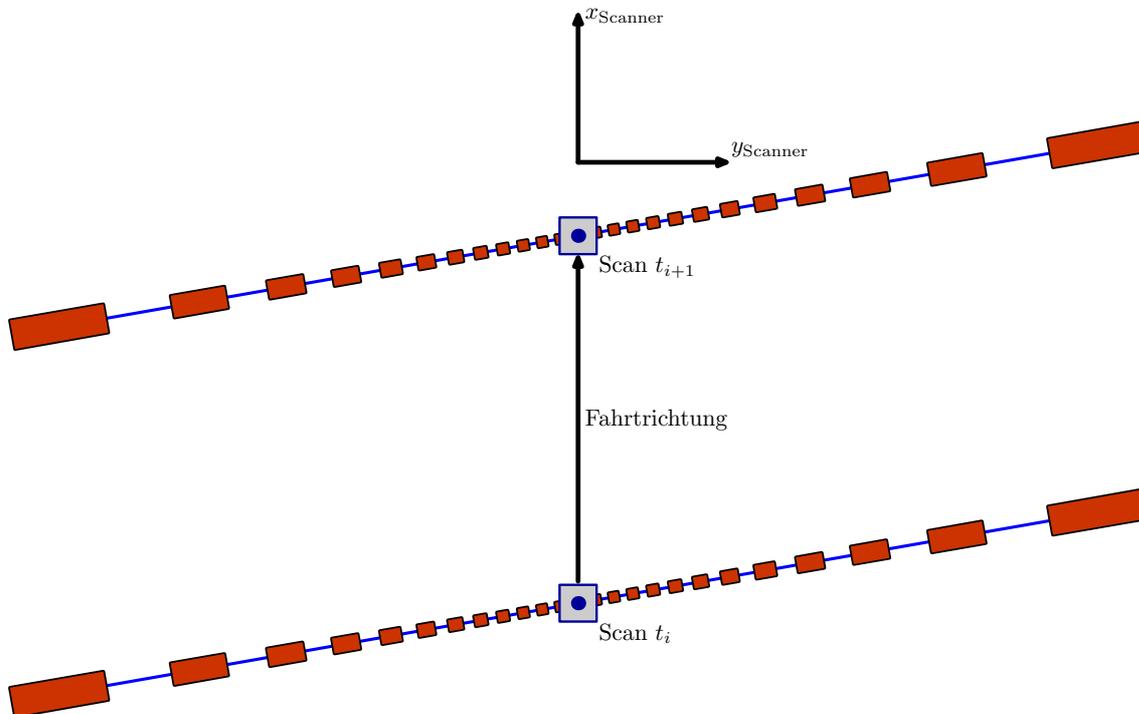


Abbildung 4.6.: Schematische Darstellung kinematisch gemessener Laserscanner-Profile.

ist die zeitliche Synchronisation der Daten mit der Referenzzeit der Trajektorie. Die Messdaten werden in einem speziellen Datenmodell gespeichert, das für jeden Scan die exakte Aufnahmezeit und die Scannummer sowie für jeden Punkt den Ablenkwinkel im Scannerkoordinatensystem, die Entfernung aus der Laufzeitmessung und die Rückstrahlintensität beinhaltet (vgl. Formel (4.1)).

4.2.4. Zeitsynchronisation

Um die Laserscanner-Polarkoordinaten georeferenzieren zu können, muss jeder Messung ohne Verlust an Messgenauigkeit die äußere Orientierung zum Aufnahmezeitpunkt zugewiesen werden können (vgl. Kap. 3.7). Die zeitliche Synchronisation der Laserscanner wird durch ein zentrales Modul zur Zeitkontrolle und Sensorsteuerung gewährleistet. Die Laserscanner werden durch Pulssignale gesteuert, die der Aufnahmezeitpunkt entsprechen. Da sich je nach Messaufbau der Messbereich der Scanner eventuell überschneidet, stellt die Synchronisation sicher, dass beide Scanner zeitversetzt im Abstand von $1/150$ Sekunde arbeiten. Auf diese Weise wird die gegenseitige Überlagerung der Lichtimpulse ausgeschlossen. Um eine Datenauswertung ohne Bewegungsunschärfen zu gewährleisten, erfolgt die zeitliche Erfassung der Steuerpulse im MoSES mit einer Messunsicherheit $< 5 \cdot 10^{-5}$ Sekunden.

4.3. Georeferenzierung der Laserscanner-Messungen

Die Georeferenzierung von Laserscanner-Messungen erfolgt in mehreren Schritten analog zu Kapitel 3.8. Folgende Messwerte werden in einer Epoche k ermittelt (vgl. Kap. 4.2.1):

$$\begin{array}{ll} \text{die Entfernung } s_k, & \text{die Intensität } I_k, \\ \text{der Aufnahmewinkel } \varphi_k \text{ und} & \text{die Zeit } t_k \text{ für den Messwert mit Index } k. \end{array} \quad (4.1)$$

Im ersten Schritt der Auswertung werden die Messwerte um sensorspezifische Kalibrierpa-

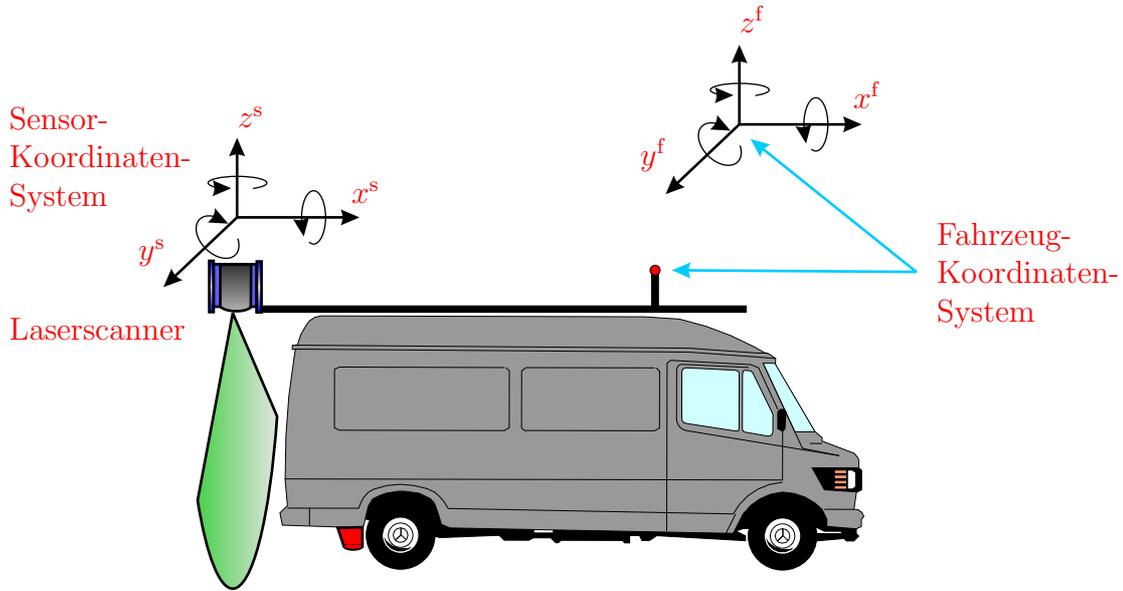


Abbildung 4.7.: Fahrzeugkoordinatensystem im MoSES und Sensorkoordinatensystem eines Laserscanners.

rameter korrigiert (vgl. Kap. 3.8.2):

$$\begin{aligned} s_{\text{Kal},k} &= f_{\text{Kal,Entf}}(s_k, \boldsymbol{\alpha}_{\text{Entf.}}) \\ I_{\text{Kal},k} &= f_{\text{Kal,Int}}(I_k, \boldsymbol{\alpha}_{\text{Int.}}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

mit: $\boldsymbol{\alpha}_{\text{Entf.}}$, $\boldsymbol{\alpha}_{\text{Int.}}$ Kalibrierparameter für Streckenmessung und Intensität
 $f_{\text{Kal,Entf}}$, $f_{\text{Kal,Int}}$ Kalibrierfunktionen

Aus den kalibrierten Entfernungsmessungen und den zugehörigen Winkeln werden kartesische Koordinaten bezogen auf das Sensor-Koordinatensystem berechnet. Für die Laserscanner im MoSES gilt folgender Zusammenhang (vgl. Abb. 4.5 und 4.7):

$$\boldsymbol{x}_k^s = f_s(\boldsymbol{w}_{\text{Kal},k}, \boldsymbol{\mu}) = \begin{pmatrix} 0 & -\cos \varphi_k & -\sin \varphi_k \end{pmatrix}^\top \cdot s_{\text{Kal},k} \quad (4.3)$$

Die Sensorkoordinaten werden auf das zentrale Fahrzeug-Koordinatensystem des MoSES bezogen, das einen einheitlichen Bezugsrahmen für alle Sensoren herstellt (siehe Kap. 3.8.4 und vgl. Abb. 4.7). Aufgrund der zeitlichen Synchronisation der Messungen einer Epoche k (vgl. Kap. 3.7 und Kap. 4.2.4) steht die Trajektorie als äußere Orientierung zum Aufnahmezeitpunkt t_k zur Verfügung und dient als Grundlage für die weiteren Transformationen zur Georeferenzierung der Messungen (vgl. Kap. 3.8.5 und Kap. 3.8.6). Das Ergebnis sind Koordinaten \boldsymbol{x}_k^a im Anwender-Koordinatensystem für alle Messwerte der Laserscanner.

5. Kalibrierung von Laserscannern

Voraussetzung für den Einsatz von Laserscannern im Rahmen der kinematischen Vermessung ist deren Kalibrierung. Ausgehend von den Genauigkeitsforderungen der Anwendungen wurde ein allgemeines Kalibrierkonzept entwickelt, das für unterschiedliche Laserradarsysteme und verschiedene Anordnungen der Messaufbauten auf einem Trägerfahrzeug Gültigkeit besitzt. Das Konzept umfasst in zwei Schritten sowohl die Bestimmung der Messeigenschaften des Sensors als auch die Ermittlung der geometrischen Einbaulage im Fahrzeug:

- Sensorkalibrierung von Laserscannern (Kap. 5.1)
Dies betrifft die Kalibrierung der Einzelmessungen: Strecke, Winkel und Remission.
- Bestimmung der Zentrierparameter (Kap. 5.2)
 - Ermittlung der geometrischen Lage des Scanners im Fahrzeug (Koordinaten und Lagewinkel im Fahrzeugkoordinatensystem)
 - Kontrolle der Größenordnung systematischer Fehler in den Entfernungsmessungen bezogen auf die Einbaulage im Fahrzeug

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Anwendung des Kalibrierverfahrens auf Laserscanner vom Typ LMS 200 bezogen auf den Messaufbau im MoSES.

5.1. Sensorkalibrierung des Laserscanners Sick LMS 200

Die elektrooptische Entfernungsmessung mit Laserscannern unterliegt systematischen Fehlereinflüssen (vgl. Kap. 4.1.2). Die charakteristischen Systematiken werden in der Regel durch den Hersteller eines Scanners bereits ermittelt und mit Hilfe von sensorinternen Korrekturfunktionen kompensiert. Strecken- und Winkelmessungen ohne Berücksichtigung der internen Kalibrierung stehen für eine Analyse meist nicht zur Verfügung, so dass die Untersuchung der Messeigenschaften auf der Basis der systemintern bereits korrigierten Laserscanner-Messdaten erfolgt. Die Güte der Strecken- und Winkelmessung eines Laserscanners kann mit Hilfe geeigneter Messanordnungen in geodätischen Laboreinrichtungen kontrolliert werden. Die Ziele der Sensorkalibrierung bestehen darin, die grundlegenden Messeigenschaften und die Größenordnung systematischer Restfehler der Distanzmessung festzustellen. Insbesondere sind folgende Eigenschaften von Interesse:

- Standardabweichung aus Einzelmessungen
- systematische Messabweichungen der Entfernungsmessung
 - entfernungsabhängige Fehler, wie z.B. Maßstabsfehler
 - intensitätsabhängige Fehler, z.B. durch schräges Auftreffen des Messstrahles oder unterschiedliche Reflexionseigenschaften der Zielflächen
- systematische Fehler der Winkelmessung

Die Beschreibung eines Verfahrens zur Prüfung der Messgenauigkeit eines Scanners findet sich in [Niemeier und Jungmichel (2005)] am Beispiel des dreidimensionalen Laserscanners Z+F 5003 (vergleiche Tab. 4.1). [Reshetyuk (2006)] beschreibt detaillierte Untersuchungen zu den Grundlagen systematischer Messabweichungen statischer 3D-Laserscanner. Das Messverhalten der Laserscanner vom Typ LMS 200 wurde in den Arbeiten von [Pfeil (1999)], [Sebald (2000)], [Schuhmann (2002)] und [Hovenbitzer (2003)] analysiert. Die Untersuchungen der Entfernungsmessung ergeben bei allen Autoren systematische Abweichungen gegenüber gemessenen Referenzstrecken. Die bisher gewählten Ansätze zur Kalibrierung des Laserscanners erfassen allerdings die Abweichungen für die angestrebte Messaufgabe mit dem MoSES nicht in ausreichender Weise. Aus diesem Grund wurde ein völlig neuer Ansatz zur Kalibrierung der Messungen entwickelt.

5.1.1. Ziele der Sensorkalibrierung

Die Kalibrierung des Laserscanners LMS 200 hat das Ziel, systematische Einflüsse auf die Entfernungs- und Remissionsmessungen des Sensors zu beseitigen. Daraus ergeben sich folgende Aufgaben für die Sensorkalibrierung:

- **Streckenkalibrierung 1:** Die Streckenmessung unterliegt systematischen Einflüssen, die von der Reflektivität der Zielfläche und der Messentfernung abhängen. Ziel der Sensorkalibrierung ist, dass jede gemessene Strecke abhängig von den Parametern Entfernung und Signalintensität um den entsprechenden systematischen Fehler korrigiert werden kann. Zu diesem Zweck müssen in einem Entfernungsbereich bis zu 8 m Strecken auf Ziele verschiedener Helligkeit gemessen und mit einer Referenz verglichen werden. Die Ergebnisse der Vergleichsmessung werden dann in eine Korrekturfunktion oder eine Korrekturmatrix überführt. Die Gültigkeit der Kalibrierung 1 ist auf senkrecht auftreffende Messstrahlen begrenzt.
- **Streckenkalibrierung 2:** Aufgrund des Messaufbaus der Scanner im MoSES treten bei Messungen auf die Fahrbahnoberfläche zusätzlich systematische Abweichungen der Entfernungsmessungen auf, die von der Abweichung des Messstrahles aus der Lotrichtung abhängen (siehe Abb. 4.4 und Abb. 4.5). Ziel der 2.Streckenkalibrierung ist die Bereitstellung einer speziell auf die Vermessung von Straßendecken angepassten Sensorkalibrierung. Wenn eine Fahrbahnoberfläche vermessen werden soll, sind die Abweichungen aus der Lotrichtung näherungsweise für die einzelnen Entfernungen bekannt. Im Entfernungsbereich bis zu 8 m werden in diesem Fall Strecken auf Ziele verschiedener Helligkeit gemessen und mit einer Referenz verglichen, wobei die Zieltafeln jeweils um den erforderlichen Winkel gedreht werden. Die übrigen Vorgaben lauten wie bei der Streckenkalibrierung 1.
- **Remissionskalibrierung 1 und 2:** Die Rückstrahlintensität unterliegt den gleichen Einflüssen, wie die Streckenmessung. Die Kalibrierung der Remission erfolgt nach den gleichen Vorgaben. Der einzige Unterschied besteht darin, dass es keine Referenzmessung für die Remission gibt und an die Stelle des Komparators der Vergleich mit einem frei festgelegten Ausgangsniveau tritt.

Aus den Zielsetzungen ist ersichtlich, dass die erforderlichen Datengrundlagen durch gemeinsame Messreihen für Entfernung und Remission erfasst werden können. Die einzelnen Korrekturmatriizen werden aus diesen Daten abgeleitet.

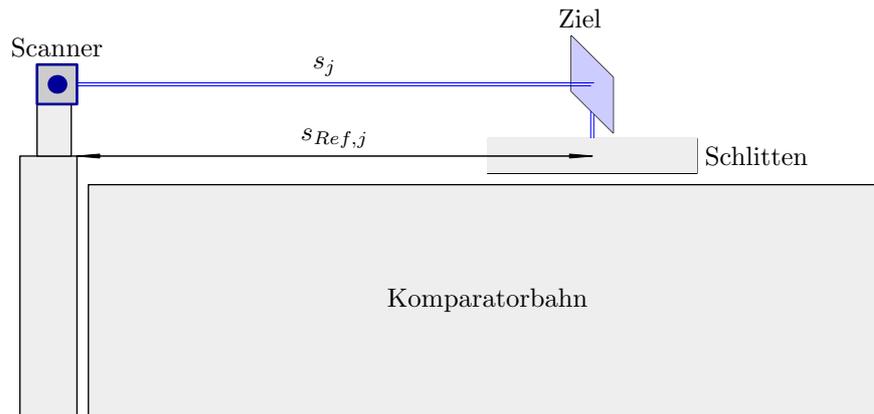


Abbildung 5.1.: Messaufbau zur Kalibrierung eines Laserscanners auf dem Komparator des Geodätischen Labors der Universität der Bundeswehr.

5.1.2. Messverfahren zur Sensorkalibrierung

Zur Prüfung der Streckenmessungen eines Laserscanners in Bezug auf systematische Fehler eignet sich ein Longitudinalkomparator. Das Geodätische Labor der Universität der Bundeswehr München verfügt über eine Komparatorbahn von 30 m Länge. Eine ausführliche Darstellung der Kalibrierung geodätischer Längenmessinstrumente findet sich in [Heister (1988)]. Ein Longitudinalkomparator verfügt über einen verschiebbaren Schlitten, dessen Entfernung zum Nullpunkt der Messstrecke mit Hilfe eines Laserinterferometers mit einer Standardabweichung $< 0,00001$ m bestimmt werden kann. Der Messaufbau zur Kalibrierung des Laserscanners LMS 200 ist in Abb. 5.1 dargestellt. Das Messverfahren basiert auf folgenden Vorgehensweisen:

- Der Scanner wird auf der Instrumentenplattform des Longitudinalkomparators angebracht und ausgerichtet (vgl. Abb. 5.1).
- Die Kalibrierung erfolgt in Bezug auf eine definierte Messrichtung des Scanners von ca. 90° (vgl. Abb. 5.2). Die exakte Bezugsrichtung der Kalibrierung entlang der Achse der Komparatorbahn wird im Verlauf der Auswertung bestimmt. Das Messverhalten des Scanners, das entlang der Bezugsachse beobachtet werden kann, wird als repräsentativ für das Messverhalten im gesamten Messbereich angesehen.
- Die Kalibrierung erfolgt in einem Entfernungsbereich von 1,5 bis 7 m. Der Messschlitten wird im Hin- und Rückweg z.B. in Schritten von 0,2 m Länge bewegt, um alle systematischen Abweichungen der Streckenmessung vollständig erfassen sowie eventuelle, zeitabhängige Effekte eliminieren zu können.
- Die Entfernungsmessung erfolgt zu verschiedenen Zieltafeln, deren Oberflächen in Rauheit und Helligkeit den tatsächlichen Gegebenheiten bei der Entfernungsmessung im Straßenraum entsprechen. Folgende Zielflächen wurden verwendet:
 - schwarz
 - grau
 - sandfarben
 - weiß

- Die Zieltafeln werden nicht nur senkrecht zum auftreffenden Messstrahl ausgerichtet, sondern in jeder Messreihe im positiven und negativen Sinn in festen Schrittweiten um verschiedene Winkel α_i gedreht (vgl. Abb. 5.2).
- Winkelabhängige Fehler der Streckenmessung werden durch die Laborkalibrierung nicht erfasst, sondern im Rahmen der Bestimmung der geometrischen Einbaulage (siehe Kap. 5.2) überprüft.

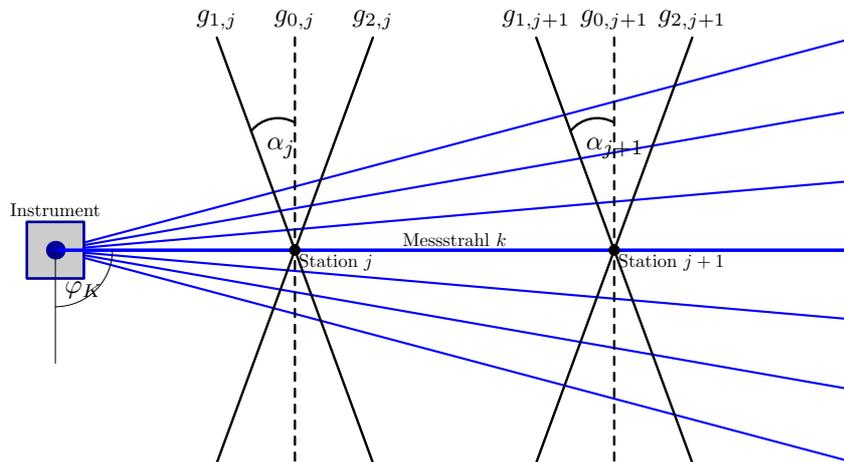


Abbildung 5.2.: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Zieltafeln in verschiedenen Entfernungen und unterschiedlichen Ausrichtungen zum Scanner.

Mit dem beschriebenen Verfahren zur Sensorkalibrierung werden Restfehler der Streckenmessung in Abhängigkeit von der Helligkeit der Zielfläche und vom Auftreffwinkel des Messstrahles erfasst. Das Kalibrierverfahren lässt sich variabel an die tatsächliche Messsituation der Scanner anpassen. Bezogen auf die Einbaulage der Scanner im MoSES bedeutet dies, dass die Lage der einzelnen Messstrahlen gegenüber der Fahrbahnoberfläche in die Kalibrierung eingeht. Bei einer festen Ausrichtung der Scanner kann der Auftreffwinkel auf die Fahrbahn für jeden Messpunkt ermittelt werden (vgl. Abb. 4.5 sowie Tabelle 4.2). Bei der Sensorkalibrierung auf der Komparatorbahn ist also für jede Entfernung bekannt, welche Größe die Abweichung des Messstrahles aus der Lotrichtung annehmen muss, um die Sensorkalibrierung exakt auf Ausrichtung des Scanners gegenüber der Zielfläche anzupassen.

5.1.3. Auswertung der Laborkalibrierung

Für die Auswertung der Laborkalibrierung ist es erforderlich, die Differenzen zwischen gemessenen Strecken und Sollstrecken zu bilden. Die Sollstrecken werden parallel zur Achse des Komparators bestimmt, während die gemessene Strecken aus den Laserscanner-Messdaten erst interpoliert werden müssen. Einzelne Messpunkte auf den Zieltafeln lassen sich beim Scanner LMS 200 allerdings nicht einfach einem bestimmten Winkel zuordnen, da nicht jede Messung eindeutig identifiziert werden kann. Aus diesem Grund ist keine exakte Ausrichtung auf einen bestimmten Messstrahl, z.B. 90° , möglich. Daher werden zunächst aus den gemessenen diskreten Punkten des Laserscanners Entfernungen entlang der Komparatorachse interpoliert, die mit den Sollstrecken der Komparatorbahn verglichen werden können. Zur Gewinnung der interpolierten Messungen wird ausgenutzt, dass bei der Kalibrierung die Messebene des Laserscanners mit der jeweiligen Zielfläche eine Schnittgerade bildet. An jeder Station ergeben die verschiedenen Ausrichtungen der Zieltafeln eine Geradenschar. Die

Schnittpunkten der Geraden liegen näherungsweise auf der Achse der Komparatorbahn. Aus der Bestimmung der Geradenschnittpunkte an jeder Station wird die Bezugsrichtung des Laserscanners für die Kalibrierung abgeleitet. Entlang dieser Messachse lassen sich Beobachtungen interpolieren. Anhand der Differenzen zu den Sollstrecken und anhand der Abnahme der Rückstrahlintensität werden die Eigenschaften der Entfernungs- und Remissionsmessung und der Winkelstabilität analysiert. Die Auswertung wird in folgenden Schritten durchgeführt:

Bildung der Mittelwerte für jede Messreihe Die Einzelmessungen nach (4.1) sind Strecke, Winkel und Remission. Für jede Station und Ausrichtung einer Zielfläche liegen Messreihen bezüglich mehrerer Scanwinkel vor. Die Messreihen umfassen i.d.R. mindestens 100 Scans. Die Strecken- und Remissionsmessungen zu jedem Winkel werden gemittelt und die empirische Standardabweichung bestimmt. Die resultierenden Polarkoordinaten der Mittelwerte sind Grundlage der weiteren Auswertung.

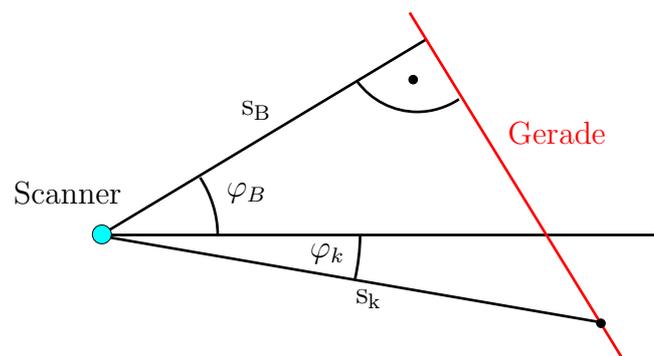


Abbildung 5.3.: Berechnung einer ausgleichenden Gerade.

Berechnung der ausgleichenden Gerade für jede Zielfläche An jeder Station j entlang der Komparatorbahn (vgl. Abb. 5.2) lassen sich über eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen anhand der Polarkoordinaten des Laserscanners die Schnittgeraden der Scanebene mit den jeweiligen Zielflächen berechnen. Der Ansatz für eine ausgleichende Gerade g_i in Polarkoordinaten lautet:

$$\text{Station } j, \text{ Gerade } g_i : s_k(\varphi_k) = \frac{s_B}{\cos(\varphi_k - \varphi_B)} \quad (5.1)$$

- mit:
- j Messepoche bei der Station $s_{\text{Ref},j}$ auf der Komparatorbahn
 - i Ausrichtung der Zielfläche mit dem Winkel α_i zum Scanner
 - φ_k Scanwinkel für den Messpunkt k
 - s_B Normalstrecke zur Gerade
 - φ_B Bezugsrichtung zur Gerade

Schnittpunktbestimmung für die Geraden an jeder Station Die Ausrichtung der Zielflächen zum Scanner variiert, so dass die Messstrahlen senkrecht oder um verschiedene Winkel α_i geneigt auftreffen. Für jede Ausrichtung der Zielfläche zum Scanner liegt eine ausgleichende Gerade vor. Die Geraden für die verschiedenen Ausrichtungen α_i an jeder Station schneiden sich (vgl. Abb. 5.2). Die Polarkoordinaten des ausgeglichenen Schnittpunktes $S(s_{S_j}, \varphi_{S_j})$ an einer Station j ergeben sich mit Hilfe einer Ausgleichungsberechnung nach dem Gauß-Markov-Modell. Der Schnittpunkt liegt in guter Näherung auf der Achse der Komparatorbahn.

Ermittlung der Bezugsrichtung des Scanners für die Kalibrierung Die Schnittpunkte der Geraden an den verschiedenen Stationen bilden näherungsweise eine Linie und stellen die tatsächliche Messrichtung des Scanners in Bezug auf die Komparatorbahn dar (vgl. Abb. 5.2). Die Bildung eines gewichteten Mittelwertes über die Winkel φ_{S_j} aus den Polarkoordinaten der Schnittpunkte an allen Stationen liefert die Messrichtung. Dies ist die Bezugsachse $\varphi_{0,\text{Sensor}}$ für die Sensorkalibrierung (vgl. Tabelle 5.1). $\varphi_{0,\text{Sensor}}$ dient außerdem als Kontrollgröße für die Winkelbestimmung (vgl. Kap. 5.1.5).

Berechnung der Differenzen zu den Sollstrecken Entlang der Achse der Komparatorbahn lassen sich zur Bezugsrichtung $\varphi_{0,\text{Sensor}}$ für jede Messreihe auf eine Zielfläche Strecken interpolieren und mit den Referenzentfernungen $s_{\text{Ref},j,i}$ des Komparators vergleichen. Für die Differenz der Strecke zur Epoche i an einer Station j gilt:

$$\Delta s_{j,i} = s_{\text{Ref},j,i} - s_{j,i} \quad (5.2)$$

Die Differenzen der Streckenmessungen bilden die Grundlage der Sensorkalibrierung zur Kompensation der systematischen Fehler der Entfernungsmessung (siehe Kap. 5.1.6).

Berechnung der Abnahme der Remissionswerte gegenüber dem Ausgangsniveau Die Remissionsmessungen werden ebenfalls betrachtet. Die Intensität des reflektierten Signals verändert sich für unterschiedlich helle Zielflächen abhängig von Entfernung und Einfallswinkel der Messstrahlen. Für die Abnahme der Intensität zur Epoche i an einer Station j gilt:

$$\Delta I_{j,i} = I_{0,\text{Farbe}} - I_{j,i} \quad (5.3)$$

mit: $I_{0,\text{Farbe}}$ Intensität bei senkrecht ausgerichteter Zielfläche in 2 m Entfernung

Die Abnahme der Intensität ist Grundlage der Kalibrierung der Remissionsmessungen (siehe Kap. 5.1.7).

Messreihe	Weiß	Grau	Sand	Schwarz I	Schwarz II	gewichtetes Mittel
Anzahl der Stationen	37	37	37	54	37	
gemessene Zielflächen mit unterschiedlicher Ausrichtung	95	96	95	120	90	
Anzahl der Stationen mit Geradenschnitt	29	30	30	33	27	
mittlere Bezugsrichtung $\varphi_{0,\text{Sensor}}$ [°]	90,049	90,039	90,033	90,039	90,042	90,040 $\sigma_M=0,005$
Standardabweichung $\sigma_{\varphi_{0,\text{Sensor}}}$ [°]	0,023	0,026	0,020	0,011	0,016	0,018

Tabelle 5.1.: Messreihen einer Sensorkalibrierung für einen Laserscanner LMS 200.

5.1.4. Beispiel für eine Laborkalibrierung

Anmerkungen zum Messverfahren Das Messverfahren in diesem Beispiel bezieht sich speziell auf die Kalibrierung der Laserscanner in Bezug auf den Messaufbau im MoSES. Die Zielfläche wird auf jeder Station zunächst senkrecht angemessen und anschließend um den Winkel α_i geschwenkt, der in der jeweiligen Messentfernung als Einfallswinkel bezüglich des Messaufbaus im MoSES tatsächlich vorkommt (vgl. Abb. 4.5). Exemplarische Beispiele für die Abweichungen der auftreffenden Messstrahlen aus der Lotrichtung enthält Tabelle 4.2. Im Entfernungsbereich zwischen 1,5 m und 4 m lag der Stationsabstand bei 0,1 m. In größerer Entfernung wurde die Stationsdichte zur Reduktion des Aufwandes auf 0,2 m reduziert.

Auswertung der Messreihen Tabelle 5.1 enthält statistische Angaben zur Auswertung der Messreihen nach Kap. 5.1.3, wie z.B. die Anzahl der ausgewerteten Geraden, Geradenschnittpunkte und die Bezugsrichtung. Insgesamt liegen 496 interpolierte Streckenmessungen entlang der Bezugsachse vor. Die Differenzen zu den Referenzentfernungen und die Standardabweichung der Streckenmessungen sind in Abb. 5.4 und Abb. 5.5 dargestellt.

Bezugsachse für die Kalibrierung Die verschiedenen Messreihen ergeben eine Bezugsrichtung $\varphi_{0,\text{Sensor}}$ von $90,040^\circ$ für den Messaufbau auf der Komparatorbahn. Die Standardabweichung der ausgeglichenen mittleren Bezugsrichtung $\varphi_{0,\text{Sensor}}$ für die einzelnen Messreihen liegt a posteriori bei $\sigma_{\varphi_{0,\text{Sensor}}} \approx 0,02^\circ$ (siehe Tab. 5.1). Die Unsicherheit der Messrichtung hängt von der Standardabweichung der Geradenschnitte ab, die in die Berechnung eingehen.

Differenzen zu den Sollstrecken Entlang der Bezugsrichtung $\varphi_{0,\text{Sensor}}$ wird aus den Laserscannerdaten zu jeder Messreihe an einer Station die Strecke $s_{j,i}$ interpoliert. Mit Hilfe von (5.2) lässt sich die Differenz zu den Streckenmessungen des Longitudinalkomparators an jeder Station ermitteln. Die Unterschiede zu den Sollstrecken werden für senkrecht auftreffende Messstrahlen (siehe Abb. 5.4) und für schräg einfallende Strahlen (siehe Abb. 5.5) gebildet. Die Auftreffwinkel entsprechen im zweiten Fall den Gegebenheiten in der jeweiligen Messentfernung bezogen auf den Aufbau der Laserscanner im MoSES. Bei der Auswertung zeigt sich, dass geneigte Flächen bei der Sensorkalibrierung lediglich im Entfernungsbereich bis 5,5 m zuverlässig gemessen werden konnten. Für den Einsatz der Laserscanner im MoSES bedeutet dies, dass die Abtastung von Fahrbahnoberflächen auf größere Entfernung keine brauchbaren Ergebnisse mehr liefert. Die ermittelten Differenzen in Abb. 5.4 und Abb. 5.5 enthalten einen Nullpunktfehler von ca. 2 cm. In den Nullpunktfehler geht zu einem Teil ein konstanter Fehler der Streckenmessung ein. Der andere Teil ist darauf zurückzuführen, dass der Bezugspunkt für die Streckenmessung im Scanner, also der Ursprung des Sensorkoordinatensystems, bei der Laborkalibrierung unbekannt ist. Die Bestimmung des Sensornullpunktes findet im Rahmen der geometrischen Kalibrierung statt (siehe Kap. 5.2). Die Differenzen zu den Sollstrecken ändern sich systematisch abhängig von Entfernung, Auftreffwinkel und Helligkeit des Zieles. Die Veränderungen verhalten sich bei der Messung auf senkrechte Ziele für alle Zielhelligkeiten bis zu einer Entfernung von 3,5 m gleichmäßig und zeigen danach Differenzen von bis zu 15 mm zwischen den verschiedenen Messreihen. Die größte Abweichung liegt dabei zwischen den Messreihen auf die weiße und die graue Zieltafel, während die Unterschiede im Messverhalten zwischen der weißen und der schwarzen Zielfläche gering sind. Bei der Messung mit schräg auftreffenden Strahlen verändert sich die Systematik der ermittelten Differenzen deutlich. Bei der Messreihe mit geringen Remissionsintensitäten liegen die ermittelten Differenzen zwischen 15 mm in 2,5 m Entfernung und 40 mm in 5 m

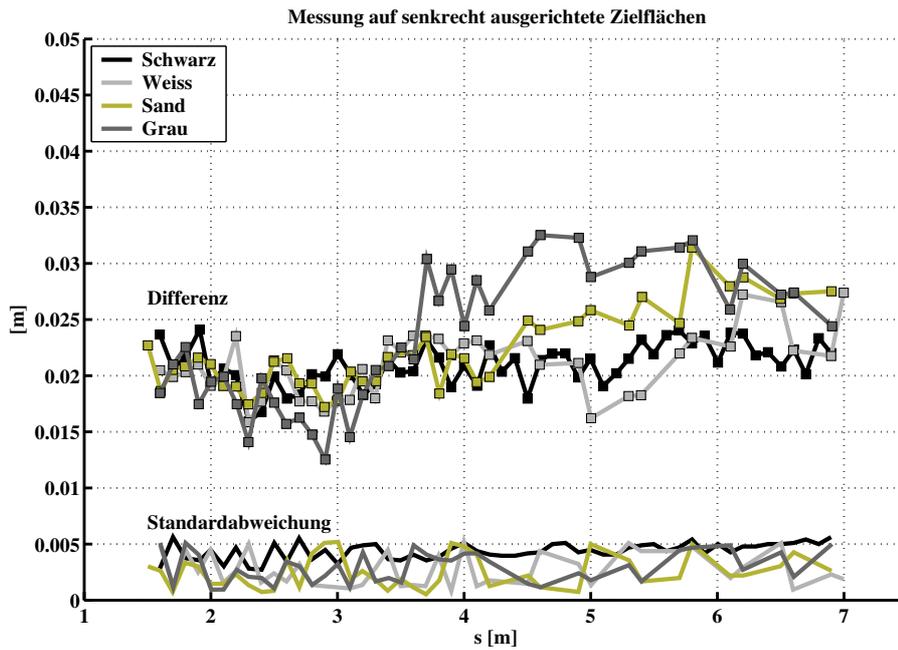


Abbildung 5.4.: Differenzen der Scannermessungen zu den Sollentfernungen bei senkrechten Zielflächen. Dargestellt ist auch die Standardabweichung des Mittelwertes der Streckenmessung.

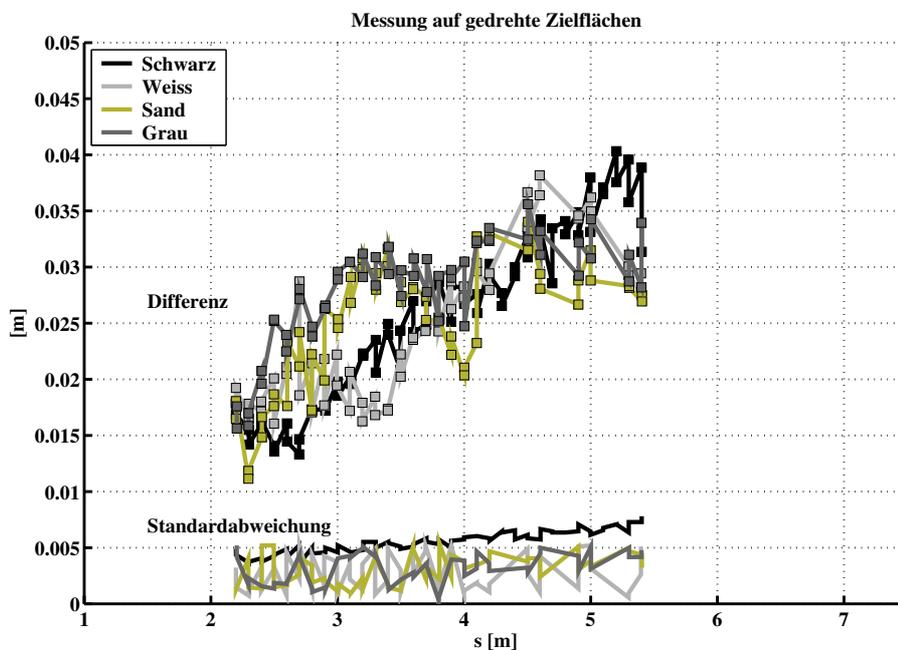


Abbildung 5.5.: Differenzen der Scannermessungen zu den Sollentfernungen bei geneigten Zielflächen. Dargestellt ist auch die Standardabweichung des Mittelwertes der Streckenmessung.

Entfernung. Die Unterschiede im Verhalten der Entfernungsmessung abhängig von der Helligkeit der Zielfläche kommen deutlich heraus (siehe Abb. 5.5). Die Messunsicherheit liegt bei senkrecht zum Scanner ausgerichteten Zielflächen durchweg unter 5 mm. Bei geringeren Remissionsintensitäten zeigt sich generell ein leicht erhöhtes Messrauschen, insbesondere bei der Messung auf schräge Zieltafeln. Es fällt auf, dass die Standardabweichungen bei der Messung auf hellere Zielflächen zwischen 2 und 5 mm schwanken, während sich bei der Messung auf die schwarze Zieltafel ein weitgehend konstanter Verlauf zeigt. Offenbar unterliegen die Entfernungsmessungen des Scanners LMS 200 keinem statistisch gleichmäßig verteilten Messrauschen.

5.1.5. Messunsicherheit der Winkelbestimmung

Die Winkel der Laserscanner-Polarkoordinaten sind beim Laserscanner LMS 200 nicht unmittelbar zugänglich. Die Laborkalibrierung bedient sich zur Kontrolle der Eigenschaften der Winkelmessung eines indirekten Verfahrens. Die Auswertung der Messreihen in Kap. 5.1.3 liefert über die Polarkoordinaten der Geradenschnittpunkte an den jeweiligen Stationen eine Kontrollgröße für die Stabilität der Winkelmessung. Nach Tabelle 5.1 ergeben die Ausgleichsberechnungen unter Berücksichtigung der Standardabweichung aller Eingangsgrößen, dass sich die Schnittwinkel der Geraden im Mittel mit einer Messunsicherheit von $0,018^\circ$ bestimmen lassen. Die Standardabweichung des Mittelwertes für den Bezugswinkel der Sensorkalibrierung liegt mit $0,005^\circ$ noch deutlich darunter. Die Genauigkeit der Winkelmessung für die Polarkoordinaten des Laserscanners LMS 200 lässt sich damit aus der Messanordnung nicht direkt ableiten, wurde aber bei anderen Untersuchungen in ähnlicher Größenordnung ermittelt [Reshetyuk (2006)]. Systematische Abweichungen bei der Winkelmessung ließen sich bei keiner Kalibrierung nachweisen.

5.1.6. Korrektur der Streckenmessungen

Die ermittelten Differenzen zwischen gemessenen Strecken und Sollstrecken ermöglichen eine Korrektur der Entfernungsmessung, die spezifisch auf die tatsächliche Messsituation des Scanners angepasst werden kann. Die Anpassung geschieht, indem für jede Entfernung diejenigen Differenzen verwendet werden, bei denen die Ziele entsprechend dem tatsächlichen Einfallswinkel der Messstrahlen auf die Zieloberfläche geneigt sind. Zusätzlich gehen Messreihen mit Flächen unterschiedlicher Helligkeit oder Oberflächenbeschaffenheit in die Berechnung ein. Die Daten ermöglichen die Interpolation eines zweidimensionalen Rasters mit Verbesserungen. Parameter der Korrekturmatrix \mathbf{K} sind Strecke und Remission. Die einzelnen Werte in der Matrix \mathbf{K} werden mit Hilfe einer ausgleichenden Flächenfunktion ermittelt. Für jeden Rasterpunkt $k_{s,I}$ werden die Parameter der Funktion einzeln geschätzt. Der Ansatz für die Fläche lautet:

$$k_{s,I} = b_1 + b_2 \cdot s + b_3 \cdot I + b_4 \cdot s^2 + b_5 \cdot I^2 \quad (5.4)$$

mit: s Strecke
 I Remissionsintensität
 b_1 bis b_5 Parameter der Flächenfunktion

Als Beobachtungen dienen die Differenzen $\Delta s_{j,i}$ nach (5.2). Zur Bestimmung der Flächenparameter am Rasterpunkt $k_{s,I}$ werden die Beobachtungen im unmittelbaren Umfeld der Koordinaten s und I verwendet. Der Umkreis wird so festgelegt, dass die Parameter der Fläche numerisch stabil geschätzt werden können. Mindestens 6 geometrisch gleichmäßig verteilte

Messpunkte sind erforderlich. Für die Ausgleichung gilt:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}_{s,I} &= (b_1, \dots, b_5)^t \text{ und } \mathbf{x}_{s,I}^0 = (b_{1,0}, \dots, b_{5,0})^t \\
 \mathbf{l}_{s,I} &= (\dots \Delta s_{j,i} \dots)^t, \\
 \mathbf{y}_{s,I} &= \begin{pmatrix} \vdots \\ b_{1,0} + b_{2,0} \cdot (s_{j,i} - s) + b_{3,0} \cdot (I_{j,i} - I) + b_{4,0} \cdot (s_{j,i} - s)^2 + b_{5,0} \cdot (I_{j,i} - I)^2 \\ \vdots \end{pmatrix}, \\
 \mathbf{A}_{s,I} &= \begin{pmatrix} \vdots \\ 1 & (s_{j,i} - s) & (I_{j,i} - I) & (s_{j,i} - s)^2 & (I_{j,i} - I)^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \Bigg|_{\mathbf{x}_{s,I}^0}, \tag{5.5}
 \end{aligned}$$

- mit:
- $\mathbf{x}_{s,I}$ Vektor der unbekannt Parameter
 - $\mathbf{x}_{s,I}^0$ Näherungswerte für die Parameter der Flächenfunktion
 - $\mathbf{l}_{s,I}$ Beobachtungen
 - $\mathbf{y}_{s,I}$ Vektor mit Näherungswerten
 - $\mathbf{A}_{s,I}$ Koeffizientenmatrix
 - j Indizes der umgebenden Stationen für das Matrixelement $k_{s,I}$
 - i Indizes der verwendeten Differenzen auf der Station j

Durch Anwendung der Formeln aus Anlage B.2 ergibt die gleitende Ausgleichung über alle benötigten Rasterpunkte die Korrekturmatrix \mathbf{K} . Diese ermöglicht die Ablesung der Streckenkorrektur für jede einzelne Laserscanner-Messung. Die Kalibrierfunktion in Abbildung 5.6 wurde für das Beispiel aus Abbildung 5.5 berechnet. Nach der Korrektur der dazugehörigen 496 gemessenen Strecken ergibt sich eine Standardabweichung der Entfernungsmessung von $\sigma = 2,3$ mm über alle Messreihen. Die Maxima der verbleibenden Abweichungen gegenüber den Sollstrecken liegen nach der Sensorkalibrierung nur noch bei -6 , bzw. $+8$ mm. Daraus folgt, dass die systematischen Fehler der Streckenmessung mit Hilfe der Kalibrierung soweit reduziert werden, dass die verbleibenden Restfehler innerhalb der Standardabweichung der Einzelmessung des Laserscanners liegen.

5.1.7. Korrektur der Remissionsmessungen

Die Intensität des reflektierten Signals hängt vor allem von zwei Einflussfaktoren ab:

- Geometrie des einfallenden Messsignals
- Beschaffenheit der Oberfläche des Zieles

Die Beschaffenheit der Oberfläche bestimmt im Wesentlichen die allgemeinen Reflexionseigenschaften, zum Beispiel durch die Helligkeit des Materials. Die Geometrie des einfallenden Messsignals dagegen steuert die Intensität der Reflexion abhängig von der Messentfernung

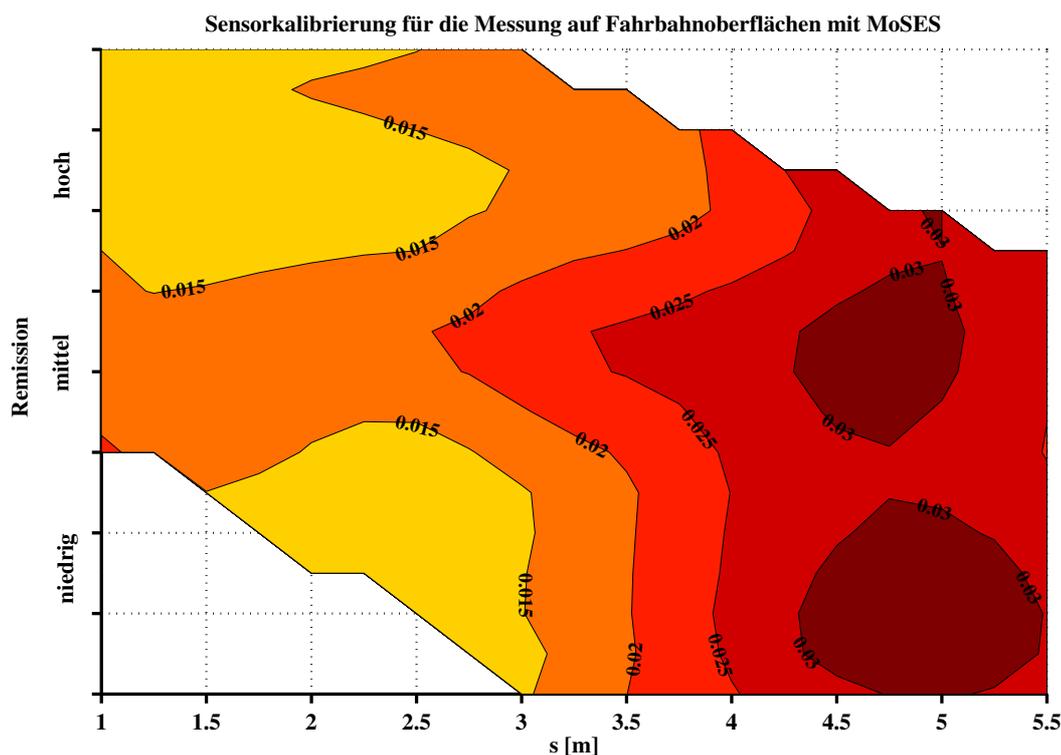


Abbildung 5.6.: Kalibrierungsmatrix für die Streckenmessungen bezogen auf den Messaufbau im MoSES.

und der Abweichung des Strahles aus der Lotrichtung (siehe Abb. 5.7). Die physikalischen Zusammenhänge werden mit Hilfe der Formeln (5.6) und (5.7) beschrieben. Die Beleuchtungsstärke E nimmt nach Formel (5.6) im Vergleich zur Lichtintensität I_S des abgestrahlten Signals abhängig von der Messentfernung und der Abweichung des Messstrahles aus der Lotrichtung ab.

$$E = \frac{I_S \cdot \cos(\alpha)}{s^2} \quad (5.6)$$

mit: E Beleuchtungsstärke
 I_S Lichtintensität des abgestrahlten Signals
 s Messentfernung
 α Abweichung des Messstrahles aus der Lotrichtung

Ergänzend gibt Formel (5.7) die reflektierte Intensität I_R abhängig von der Wellenlänge λ und dem Streukoeffizient der Oberfläche $\kappa(\lambda)$ an [Ingensand et al. (2003)]. Dies gilt für Materialien, die Strahlung richtungsunabhängig bzw. völlig diffus reflektieren. Man spricht auch von einem Lambertschen Strahler.

$$I_R(\lambda) = I_E(\lambda) \cdot \kappa(\lambda) \cos(\alpha) \quad (5.7)$$

mit: $I_R(\lambda)$ reflektierte Intensität
 $I_E(\lambda)$ einfallende Intensität
 $\kappa(\lambda)$ Streukoeffizient der Oberfläche

Zusammengefasst beschreibt (5.8) physikalisch die relative Abnahme der Intensität.

$$\frac{I_R(\lambda)}{I_S(\lambda)} = \frac{\kappa(\lambda) \cdot \cos(\alpha)}{s^2} \quad (5.8)$$

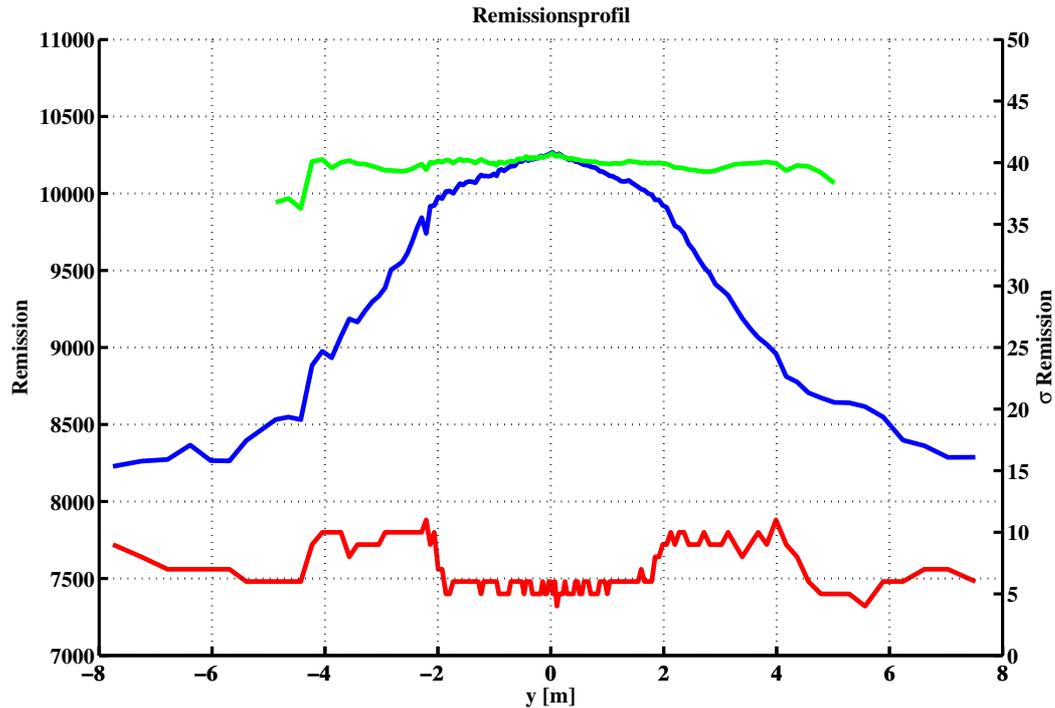


Abbildung 5.7.: Scanprofil mit gemessenen Remissionsintensitäten (blau) und deren Standardabweichungen (rot) sowie dem Ergebnis der Korrektur (grün).

Für die erfolgreiche Interpretation der Remissionsmessungen (siehe Kap. 6) ist es erforderlich, die gemessenen Intensitätswerte so zu korrigieren, dass sich diese auf einheitliche geometrische Messbedingungen beziehen. Das Verhalten der Signalreflexion ist abhängig von den spezifischen Signaleigenschaften des jeweiligen Scanners, insbesondere von der Wellenlänge, und muss anhand von Messreihen auf verschiedene Oberflächen ermittelt werden. Auf der Grundlage der Kalibriermessungen im geodätischen Labor wurde ein Modell zur Beschreibung der relativen Abnahme der Rückstrahlintensität im Vergleich zu definierten Ausgangsbedingungen bestimmt. Die Berechnungen beziehen sich auf die messtechnischen Gegebenheiten im MoSES. Optimale Bedingungen liegen bei einer Messung direkt unter dem Scanner vor, beschreiben also eine Remission in ca. 2 m Entfernung mit senkrecht auftreffendem Messstrahl. Die Korrekturen werden mit den Eingangsgrößen Schrägstrecke und Remission parametrisiert. Die Bestimmung der Korrekturmatri­x ΔR folgt den Grundsätzen der Sensorkalibrierung für die Streckenmessungen in Kapitel 5.1.6. Der Ansatz für die Bestimmung der Matrixelemente $\Delta r_{s,I}$ mit Hilfe einer Flächenfunktion lautet:

$$\Delta r_{s,I} = a_1 + a_2 \cdot s + a_3 \cdot I + a_4 \cdot s^2 + a_5 \cdot I^2 \quad (5.9)$$

mit: s Strecke
 I Remissionsintensität
 a_1 bis a_5 Parameter der Flächenfunktion

Eine gleitende Ausgleichung über die benötigten Rasterpunkte ergibt die Korrekturmatri­x ΔR . Aus dieser lässt sich für jede Remissionsmessung eine Verbesserung ablesen, mit deren Hilfe diejenige Intensität angenähert wird, die unter optimalen Bedingungen gemessen worden wäre. Auf diese Weise können die Intensitätsmessungen im Scanprofil auf identische Messbedingungen bezogen werden (vgl. Abb. 5.7). Dies ist Voraussetzung für die erfolgreiche

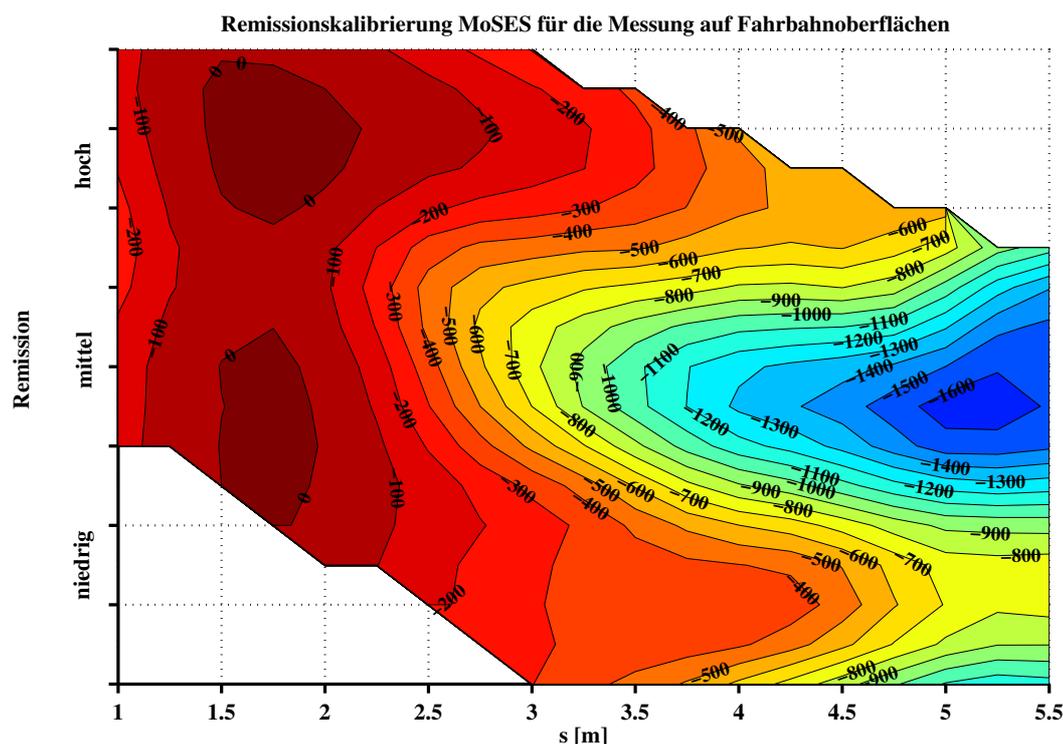


Abbildung 5.8.: Kalibrierungsmatrix für die Abnahme der Remissionsintensitäten bezogen auf den Messaufbau im MoSES.

Interpretation der Remissionsinformationen, die z.B. bei der Extraktion von Fahrbahnmarkierungen notwendig ist (siehe Kap. 6.2). Die Kalibrierungsmatrix in Abbildung 5.8 wurde für die Remissionsmessungen zu den Messreihen in Abbildung 5.5 berechnet.

5.2. Bestimmung der Zentrierparameter

Die Auswertung der kinematischen Laserscanner-Messdaten erfordert die exakte Kenntnis der geometrischen Einbaulage der Laserscanner bezogen auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem des Trägerfahrzeuges. Zur Bestimmung der geometrischen Lage der Sensoren im MoSES und KiSS wird seit Jahren ein spezialisiertes Messverfahren erfolgreich eingesetzt [Gräfe (1996)]. Angelehnt an die vorhandenen Methoden wurde ein neuartiges Verfahren zur Vermessung der Laserscanner entwickelt. Vorarbeiten finden sich in [Schuhmann (2002)]. Das Ziel ist die Bestimmung der Transformationsparameter vom Sensorkoordinatensystem des Scanners in das übergeordnete Fahrzeugkoordinatensystem. Die Messaufgabe entspricht einer Sensorzentrierung, d.h. der Ermittlung der Verschiebungs- und Rotationselemente gegenüber dem fahrzeugfesten Koordinatensystem. Die Lage des Scanners wird durch folgende Parameter beschrieben (siehe auch Kap. 3.8.4):

- $\mathbf{x}_{0,S}^f$ Ursprung des Laserscanner-Koordinatensystems bezogen auf das Koordinatensystem des Fahrzeuges
- \mathbf{R}_S^f Rotationsmatrix vom Sensor-Koordinatensystem in das Koordinatensystem des Messfahrzeuges mit den Rotationen $\gamma_{x,S}^f$, $\gamma_{y,S}^f$ und $\gamma_{z,S}^f$ nach (3.6).

Formel (3.4) beschreibt die Transformation der Koordinaten vom Sensorkoordinatensystem in das Bezugssystem des Fahrzeuges. Die Ergebnisse der Sensorkalibrierung enthalten einen Nullpunktfehler (siehe Abb. 5.5). Dieser ist durch den Messaufbau auf der Komparatorbahn bedingt, bei dem der Sensornullpunkt des Laserscanners unbekannt ist. Aus diesem Grund ist der Offset $d_{0,S}$ als zusätzliche Unbekannte bei der Sensorzentrierung zu ermitteln. Außerdem soll über die Messergebnisse geprüft werden, ob es systematische, winkelabhängige Fehler der Streckenmessung gibt, die durch die Laborkalibrierung nicht in ausreichendem Maße erfasst werden.



Abbildung 5.9.: Messaufbau zur geometrischen Kalibrierung der Laserscanner.

5.2.1. Messverfahren

Die Vermessung der Sensoren im Fahrzeug erfordert ein spezialisiertes Verfahren mit einem entsprechenden Messaufbau (vgl. Abb. 5.9). Ein Teil der Messaufgabe besteht darin, Ursprung und Ausrichtung des fahrzeugfesten Koordinatensystems in Bezug auf ein lokales Festpunktfeld einzumessen (siehe Abb. 5.10). Die Lage des Fahrzeugkoordinatensystems ist physikalisch durch einen definierten Nullpunkt festgelegt. Die Ausrichtung der Achsen lässt sich durch entsprechende Anschlagflächen realisieren. Dabei werden die Lagewinkel φ_x^ℓ und φ_y^ℓ gegenüber der Horizontalen im lokalen Koordinatensystem mit Hilfe eines digitalen Neigungsmessgerätes ermittelt. Die Bestimmung des Richtungswinkels t^ℓ erfolgt mit Autokollimationsverfahren. Alternativ wurde in der jüngeren Vergangenheit auch ein Lasertracker vom Typ Leica LTD 500 eingesetzt. Neben dem Bezugspunkt des Fahrzeugkoordinatensystems werden auch für die einzelnen Sensoren, z.B. die GPS-Antennen oder den Wegsensor, tachymetrisch lokale Koordinaten gemessen. Lage und Ausrichtung der Kameras und Laserscanner lassen sich nur indirekt erfassen. Einzelheiten zur Ermittlung der Transformationsparameter für die Stereokamera paare finden sich in [Klemm et al. (1997)]. Die Kalibrierung der geometrischen Lage der Laserscanner erfordert die Vermessung eines Referenzzieles aus mindestens drei Teilflächen (siehe Abb. 5.9). Die Flächen bilden eine zusammenhängende Form, deren Größe so gewählt wird, dass möglichst der volle Messbereich des Scanners in die Berechnungen eingeht.

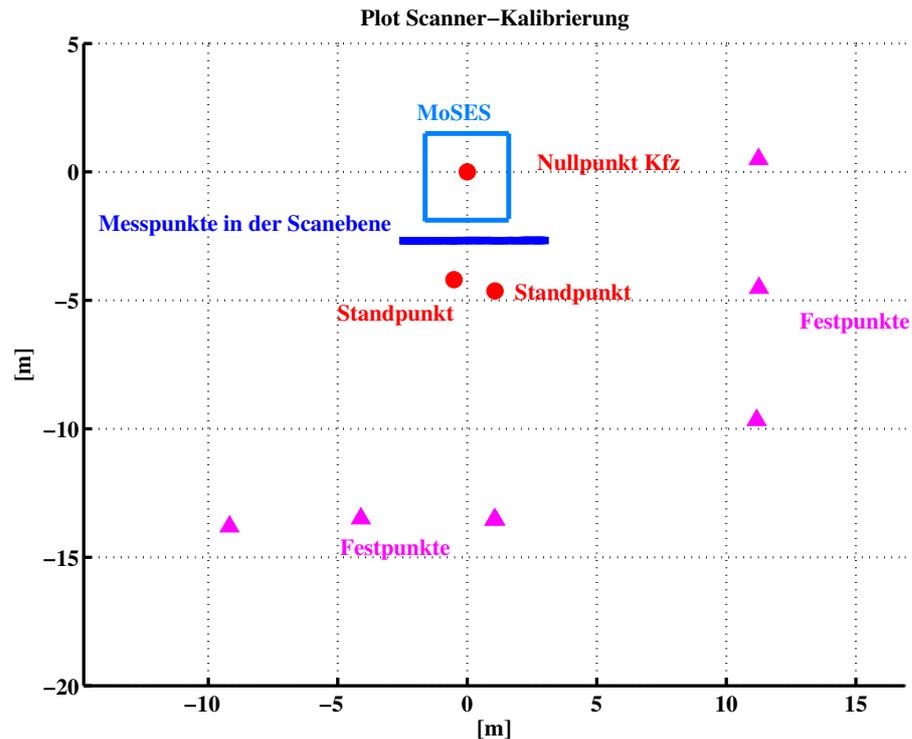


Abbildung 5.10.: Maßstäblicher Grundriss des Messaufbaus für die geometrische Kalibrierung der Laserscanner.

5.2.2. Auswertung der geometrischen Kalibrierung

Das Kalibrierverfahren basiert auf der Verknüpfung der Messebene des Laserscanners mit den Referenzflächen. Abbildung 5.11 enthält eine schematische Darstellung des Auswertungsverfahrens. Die Laserscannermessungen bilden auf den Referenzflächen eine Spur, die sich mit Detektoren, Nachtsichtgeräten oder Kameras feststellen lässt. Einzelne Laserpunkte sind allerdings schwer zu identifizieren. Anstatt der tatsächlichen Messpunkte wird aus diesem Grund der Verlauf des Scanprofils auf den Referenzflächen mit diskreten Punkten gekennzeichnet. Die markierten Referenzpunkte werden in Bezug auf das lokale Festpunktfeld eingemessen. Gleichzeitig erfolgen Profilmessungen mit dem Scanner. Sowohl die Referenz- als auch die Scannerpunkte sind Elemente identischer Geraden auf der jeweiligen Zielfläche. Als Ergebnis liegen für die Schnittgeraden der Messebene des Laserscanners mit den Zielflächen redundante Messungen sowohl im Sensorkoordinatensystem als auch im lokalen Koordinatensystem vor. Anhand der Beobachtungen werden für die Referenzmessungen (R) und die Laserscannermessungen (L) jeweils ausgleichende Geraden g_i berechnet. Grundlage für die Bestimmung der geometrischen Kalibrierparameter ist die Bedingung, dass die Geraden $g_{i,R}$ und die Geraden $g_{i,L}$ deckungsgleich sein müssen. Koordinaten und Lagewinkel der Scanner werden durch eine Ausgleichung ermittelt, die auch die Bestimmung des Nullpunktfehlers $d_{0,S}$ und der Restfehler der Streckenmessung einschließt.

5.2.3. Transformation der Messungen

Transformation der Referenzmessungen in das fahrzeugfeste Koordinatensystem Die gewonnenen lokalen Koordinaten lassen sich über Nullpunkt und Lagewinkel des Fahrzeuges

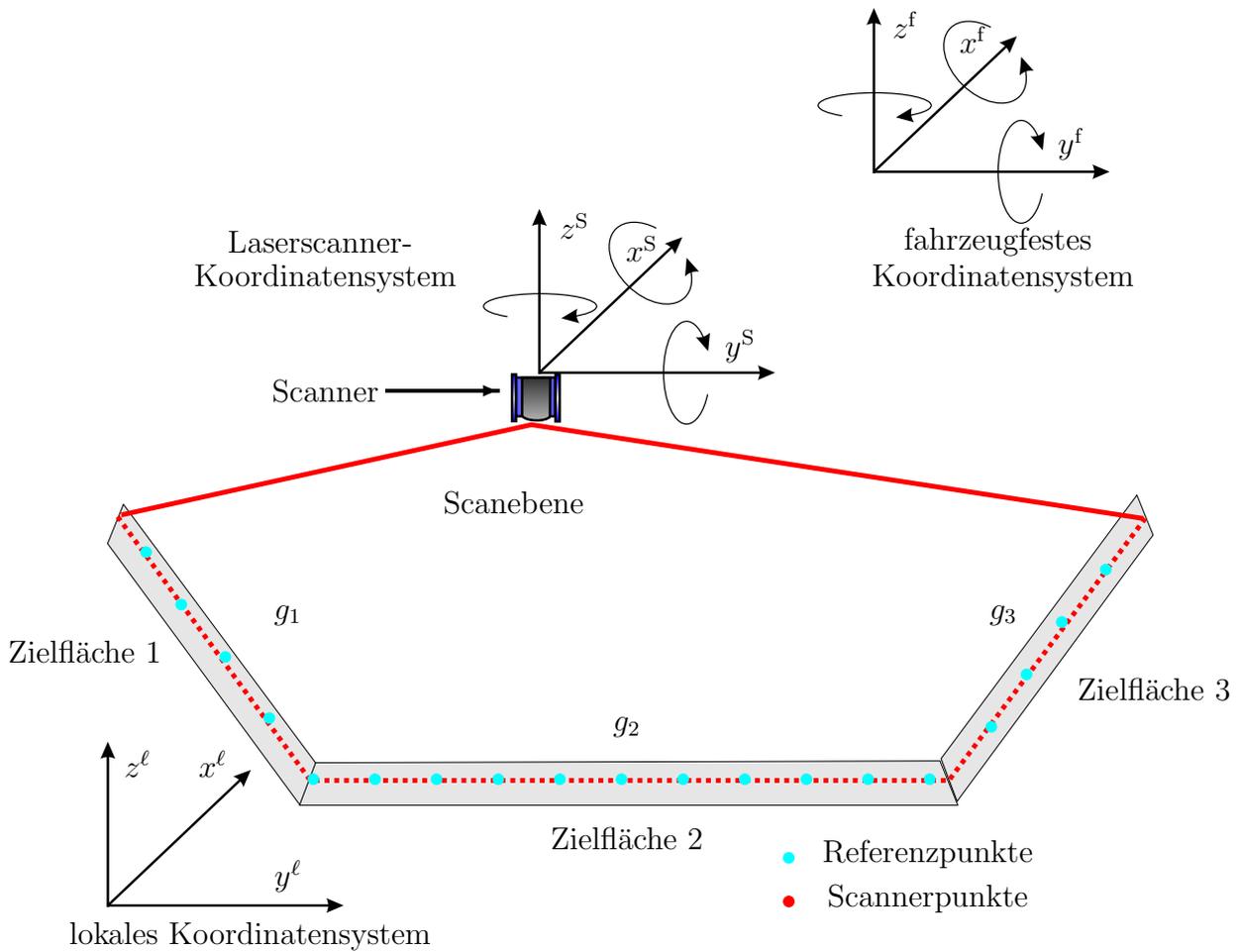


Abbildung 5.11.: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Bestimmung der Zentrierparameter für die Laserscanner (vgl. auch Abb. 5.9).

analog zu (3.7) in Fahrzeugkoordinaten transformieren:

$$\mathbf{x}^f = (\mathbf{R}_f^\ell)^{-1} \cdot (\mathbf{x}^\ell - \mathbf{x}_0^\ell) \quad (5.10)$$

- mit: \mathbf{x}^f Koordinate bezogen auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem
 \mathbf{R}_f^ℓ Rotationsmatrix vom fahrzeugfesten Koordinatensystem in das lokale Koordinatensystem
 \mathbf{x}^ℓ Koordinate bezogen auf das lokale Koordinatensystem
 \mathbf{x}_0^ℓ Ursprung des Fahrzeug-Koordinatensystems bezogen auf das lokale Koordinatensystem

Für die Rotation in das lokale Koordinatensystem gilt:

$$\mathbf{R}_f^\ell = \begin{pmatrix} \cos t^\ell \cos \varphi_y^\ell & \cos \varphi_x^\ell \sin t^\ell + \sin \varphi_y^\ell \sin \varphi_x^\ell \cos t^\ell & & \\ \cos \varphi_y^\ell \sin t^\ell & -\cos \varphi_x^\ell \cos t^\ell + \sin t^\ell \sin \varphi_y^\ell \sin \varphi_x^\ell & \cdots & \\ -\sin \varphi_y^\ell & \cos \varphi_y^\ell \sin \varphi_x^\ell & & \\ & -\sin \varphi_x^\ell \sin t^\ell + \sin \varphi_y^\ell \cos \varphi_x^\ell \cos t^\ell & & \\ & \cos t^\ell \sin \varphi_x^\ell + \sin \varphi_y^\ell \cos \varphi_x^\ell \sin t^\ell & & \\ & \cos \varphi_y^\ell \cos \varphi_x^\ell & & \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

- mit: φ_x^ℓ Rollwinkel
 φ_y^ℓ Nickwinkel
 t^ℓ Richtungswinkel des Fahrzeuges

Nach der Transformation liegen die tachymetrisch gemessenen Referenzpunkte in der Scanebene in Bezug auf das Fahrzeugkoordinatensystem vor.

Transformation der Scannermessungen in das fahrzeugfeste Koordinatensystem Die Messungen des Scanners beziehen sich zunächst auf das Sensorkoordinatensystem. Unter Anwendung von (3.5) lassen sich die Messwerte mit Hilfe von Näherungswerten für Lage und Ausrichtung des Scannerkoordinatensystems in das fahrzeugfeste Koordinatensystem transformieren.

5.2.4. Geradenbestimmung

Das Verfahren zur Bestimmung der Zentrierelemente basiert auf der Berechnung der Scanner-Spurgeraden auf den Zielflächen aus den gemessenen diskreten Punkten (siehe Abb. 5.12). Eine ausführliche Darstellung allgemeiner Verfahren zur Schätzung geometrischer Formen auf der Basis diskreter Messungen findet sich in [Müller (1999)]. Die nachfolgenden Überlegungen beziehen sich auf die Ableitung einer allgemeinen Lösung für die Geradenbestimmung unter den geometrischen Bedingungen bei der Scannerkalibrierung. Die gesuchten Geraden werden dazu in der Punkttrichtungsform definiert:

$$g_i : \mathbf{x} = \mathbf{x}_{0,i} + \lambda \mathbf{r}_i \quad (5.12)$$

mit: \mathbf{x} Ortsvektor zu einem Punkt der Gerade
 $\mathbf{x}_{0,i}$ Ortsvektor zum Bezugspunkt der Gerade i
 \mathbf{r}_i Richtungsvektor der Gerade i
 λ Geradenparameter

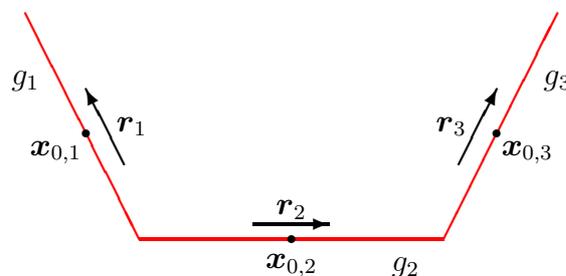


Abbildung 5.12.: Schematische Darstellung der Geraden auf den Referenzflächen bei der Bestimmung der Zentrierparameter.

Die Bestimmung der drei Spurgeraden auf der Referenzfläche erfolgt über eine gemeinsame Ausgleichung nach bedingten Beobachtungen mit Unbekannten. Die von den Messstrahlen des Laserscanners bestrichene Fläche kann in erster Näherung als Ebene betrachtet werden. Daraus ergibt sich zusätzlich die Bedingung, dass alle Geraden in einer Ebene liegen müssen. Die gemeinsame Scanebene wird in der Normalform definiert:

$$E : (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0,E}) \cdot \mathbf{n}_{0,E} = 0 \quad (5.13)$$

mit: \mathbf{x} Ortsvektor zu einem Punkt der Ebene
 $\mathbf{x}_{0,E}$ Ortsvektor zum festen Bezugspunkt der Ebene
 $\mathbf{n}_{0,E}$ Normalenvektor der Ebene

Beobachtungen Als Beobachtungen liegen dreidimensionale, diskrete Messpunkte für die jeweilige Geraden vor:

$$l = (\mathbf{x}_1^t \quad \mathbf{x}_2^t \quad \mathbf{x}_3^t \quad \dots \quad \mathbf{x}_k^t \quad \dots \quad \mathbf{x}_m^t)^t \quad (5.14)$$

mit: \mathbf{x}_k Punkt der Gerade
 m Anzahl der beobachteten Punkte

Die Messpunkte werden bei der terrestrischen Messung redundant bestimmt und die Ergebnisse mit Hilfe einer Netzausgleichung optimal geschätzt. Die resultierenden Varianzen gehen in die Varianz-Kovarianz-Matrix für die Beobachtungen ein. Grobe Fehler in der Messung oder bei der Zuordnung der Beobachtungen zu den Geraden werden mit Hilfe von Ausreißer-tests detektiert und die entsprechenden Punkte in den Berechnungen nicht weiter verwendet (siehe Anlage B.3).

Unbekannte Für jeden Teil der Referenzfläche wird eine Spurgerade gemäß (5.12) definiert. In der Regel setzt sich die Kalibrierform aus drei Teilflächen zusammen.

$$\mathbf{u} = (\mathbf{x}_{0,1}^t \quad \mathbf{r}_1^t \quad \mathbf{x}_{0,2}^t \quad \mathbf{r}_2^t \quad \dots \quad \mathbf{x}_{0,n_g}^t \quad \mathbf{r}_{n_g}^t)^t \quad (5.15)$$

mit: n_g Anzahl der Schnittgeraden; Diese ist identisch mit der Anzahl der Teilflächen der Referenzform.

Bedingungsgleichungen Zur Festlegung der Geraden und der dazugehörigen Messebene des Laserscanners werden 4 verschiedene Arten von Widerspruchsgleichungen kombiniert. Für den Widerspruchsvektor \mathbf{w} gilt:

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \\ \mathbf{w}_3 \\ \mathbf{w}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Bedingungen zur Abstandsminimierung} \\ \text{Bedingungen zur Festlegung der Scanebene} \\ \text{Bedingungen zur Festlegung der Bezugspunkte} \\ \text{Bedingungen zur Normierung der Vektoren} \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

Bedingungen zur Abstandsminimierung Jeder gemessene Punkt wird eindeutig einer Geraden zugeordnet. Aufpunkt und Richtungsvektor einer Gerade ergeben sich durch Minimierung der Abstände aller verwendeten Punkte. Der Ortsvektor zum festen Bezugspunkt $\mathbf{x}_{0,i}$ kann nur dann eindeutig bestimmt werden, wenn zusätzlich mit Restriktionen gearbeitet wird, z.B. durch Festlegung einer Koordinatenkomponente wie $x_{0,2} = 0$ (siehe Abb. 5.12). Bei der Ausgleichung wird das Quadrat des Abstandes minimiert. Für den quadrierten Abstand des Punktes k zur Geraden g_i gilt:

$$h_k^2(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{0,i}, \mathbf{r}_i) = \frac{|(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i|^2}{|\mathbf{r}_i|^2}, \quad i = 1, \dots, n_g, \quad k = 1, \dots, m. \quad (5.17)$$

Für das Kreuzprodukt folgt:

$$\begin{aligned} (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i &= \left(\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{0,i} \\ y_{0,i} \\ z_{0,i} \end{pmatrix} \right) \times \begin{pmatrix} r_{x,i} \\ r_{y,i} \\ r_{z,i} \end{pmatrix} = \\ & \begin{pmatrix} (y_k - y_{0,i}) r_{z,i} - (z_k - z_{0,i}) r_{y,i} \\ (z_k - z_{0,i}) r_{x,i} - (x_k - x_{0,i}) r_{z,i} \\ (x_k - x_{0,i}) r_{y,i} - (y_k - y_{0,i}) r_{x,i} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.18)$$

Das Quadrat des Abstandes beträgt:

$$h_k^2(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{0,i}, \mathbf{r}_i) = \frac{1}{r_{x,i}^2 + r_{y,i}^2 + r_{z,i}^2} \left([(y_k - y_{0,i}) r_{z,i} - (z_k - z_{0,i}) r_{y,i}]^2 + \right. \\ \left. [(z_k - z_{0,i}) r_{x,i} - (x_k - x_{0,i}) r_{z,i}]^2 + [(x_k - x_{0,i}) r_{y,i} - (y_k - y_{0,i}) r_{x,i}]^2 \right) \quad (5.19)$$

Jeder beobachtete Punkt sollte Element der Gerade sein. Der tatsächliche Abstand zur Gerade wird als Widerspruch der Abstandsbedingung aufgefasst:

$$w_{1,k} = h_k^2(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{0,i}, \mathbf{r}_i) \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (5.20)$$

Für die Ableitung nach den Unbekannten der Gerade g_i folgt:

$$\mathbf{A}_{1,k} = \frac{\partial w_{1,k}}{\partial \mathbf{u}_i} = \left(\dots \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_{0,i}} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_{0,i}} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_{0,i}} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{x,i}} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{y,i}} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{z,i}} \quad \dots \right) \quad (5.21)$$

mit

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_{0,i}} &= \frac{2 \cdot [-\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_i]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i]}{|\mathbf{r}_i|^2} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_{0,i}} &= \frac{2 \cdot [-\mathbf{e}_y \times \mathbf{r}_i]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i]}{|\mathbf{r}_i|^2} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_{0,i}} &= \frac{2 \cdot [-\mathbf{e}_z \times \mathbf{r}_i]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i]}{|\mathbf{r}_i|^2} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{x,i}} &= \frac{2 \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{e}_x]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i] \cdot |\mathbf{r}_i|^2 - |(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i|^2 \cdot 2 \cdot \mathbf{e}_x^t \cdot \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|^4} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{y,i}} &= \frac{2 \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{e}_y]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i] \cdot |\mathbf{r}_i|^2 - |(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i|^2 \cdot 2 \cdot \mathbf{e}_y^t \cdot \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|^4} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{z,i}} &= \frac{2 \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{e}_z]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i] \cdot |\mathbf{r}_i|^2 - |(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i|^2 \cdot 2 \cdot \mathbf{e}_z^t \cdot \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|^4} \end{aligned} \quad (5.22)$$

und

$$\mathbf{I} := \begin{pmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \end{pmatrix} \quad \mathbf{e}_x := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_y := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_z := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

Für die Ableitung der Abstandsbedingung nach den Beobachtungen, also den Komponenten des Punktes k , gilt:

$$\mathbf{B}_{1,k} = \frac{\partial w_{1,k}}{\partial \mathbf{x}_k} = \left(\dots \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_k} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_k} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_k} \quad \dots \right) \quad (5.24)$$

mit

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_k} &= \frac{2 \cdot [\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_i]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i]}{|\mathbf{r}_i|^2} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_k} &= \frac{2 \cdot [\mathbf{e}_y \times \mathbf{r}_i]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i]}{|\mathbf{r}_i|^2} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_k} &= \frac{2 \cdot [\mathbf{e}_z \times \mathbf{r}_i]^t \cdot [(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{0,i}) \times \mathbf{r}_i]}{|\mathbf{r}_i|^2} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Bedingungen zur Festlegung der Scanebene Die Spurgeraden auf der Referenzfläche müssen in der Messebene des Scanners liegen. Die Ebene selbst wird nicht explizit parametrisiert, sondern über die entsprechenden Elemente der Geraden formuliert. Unter Anwendung von (5.13) und unter Nutzung der geometrischen Eigenschaften von Ebenen und Geraden ergeben sich die Bedingungsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 w_{2,i-1} &= (\mathbf{x}_{0,i} - \mathbf{x}_{0,1}) \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2) & w_{2,n_g+i-3} &= \mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2) \\
 (i &= 2, \dots, n_g) & (i &= 3, \dots, n_g)
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

mit: $\mathbf{n}'_E = (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2)$ Näherungswert für den Normalenvektor der Scanebene
 $\mathbf{x}_{0,1}$ Näherungswert für den Bezugspunkt der Scanebene
 $\Delta \mathbf{x}' = (\mathbf{x}_{0,i} - \mathbf{x}_{0,1})$ Differenzvektor

Die Ableitung nach den Unbekannten lautet:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{2,n_g+i-3} &= \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial \mathbf{u}} \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{x,1}} & \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{y,1}} & \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{z,1}} & & \\ \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{x,2}} & \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{y,2}} & \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{z,2}} & & \\ \dots & \vdots & & & \dots \\ \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{x,i}} & \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{y,i}} & \frac{\partial w_{2,n_g+i-3}}{\partial r_{z,i}} & & \\ & \vdots & & & \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_2) & \mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{e}_y \times \mathbf{r}_2) & \mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{e}_z \times \mathbf{r}_2) & & \\ \mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_x) & \mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_y) & \mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_z) & & \\ \dots & \vdots & & & \dots \\ & \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{n}'_E & \mathbf{e}_y \cdot \mathbf{n}'_E & \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{n}'_E & \\ & \vdots & & & \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_{2,i-1} &= \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial \mathbf{u}} \\
&= \begin{pmatrix} \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial x_{0,1}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial y_{0,1}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial z_{0,1}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial r_{x,1}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial r_{y,1}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial r_{z,1}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial r_{x,2}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial r_{y,2}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial r_{z,2}} \\ \dots & & \vdots & & & \dots \\ \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial x_{0,i}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial y_{0,i}} & \frac{\partial w_{2,i-1}}{\partial z_{0,i}} & 0 & 0 & 0 \\ & & \vdots & & & \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -\mathbf{e}_x \cdot \mathbf{n}'_E & -\mathbf{e}_y \cdot \mathbf{n}'_E & -\mathbf{e}_z \cdot \mathbf{n}'_E \\ 0 & 0 & 0 \\ \dots & \vdots & \\ \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{n}'_E & \mathbf{e}_y \cdot \mathbf{n}'_E & \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{n}'_E \\ & \vdots & \end{pmatrix} \quad (5.28) \\
&\quad \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x}' \cdot (\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_2) & \Delta \mathbf{x}' \cdot (\mathbf{e}_y \times \mathbf{r}_2) & \Delta \mathbf{x}' \cdot (\mathbf{e}_z \times \mathbf{r}_2) \\ \Delta \mathbf{x}' \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_x) & \Delta \mathbf{x}' \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_y) & \Delta \mathbf{x}' \cdot (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_z) \\ & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Bedingungen zur Festlegung der Bezugspunkte Zur eindeutigen Bestimmung der Geraden ist jeweils die Definition eines Bezugspunktes erforderlich. Dies geschieht durch die Festlegung einer Koordinatenkomponente für jede Gerade (siehe Abb. 5.12). Welche Komponente festgehalten wird, richtet sich nach der Geometrie der Referenzflächen. Sinnvoll für den Fall der Scannerkalibrierung sind folgende Festlegungen:

$$w_{3,i} = y_{0,i} - y_{\text{def}} \quad (i = 1, 2, \dots, n_g) \quad \text{oder} \quad (5.29)$$

$$w_{3,i} = z_{0,i} - z_{\text{def}}$$

mit: $y_{\text{def}}, z_{\text{def}}$ festgelegte Koordinatenkomponente

Bedingungen zur Normierung der Vektoren Die numerische Stabilität der Ausgleichung lässt sich durch die einheitliche Normierung der Länge der Richtungsvektoren weiter verbessern:

$$w_{4,i} = |\mathbf{r}_i| - 1.0 \quad (i = 1, 2, \dots, n_g) \quad (5.30)$$

Ausgleichungsberechnung Die Ausgleichung erfolgt nach bedingten Beobachtungen mit Unbekannten (siehe Anlage B.2 zum Gauß-Helmert-Modell).

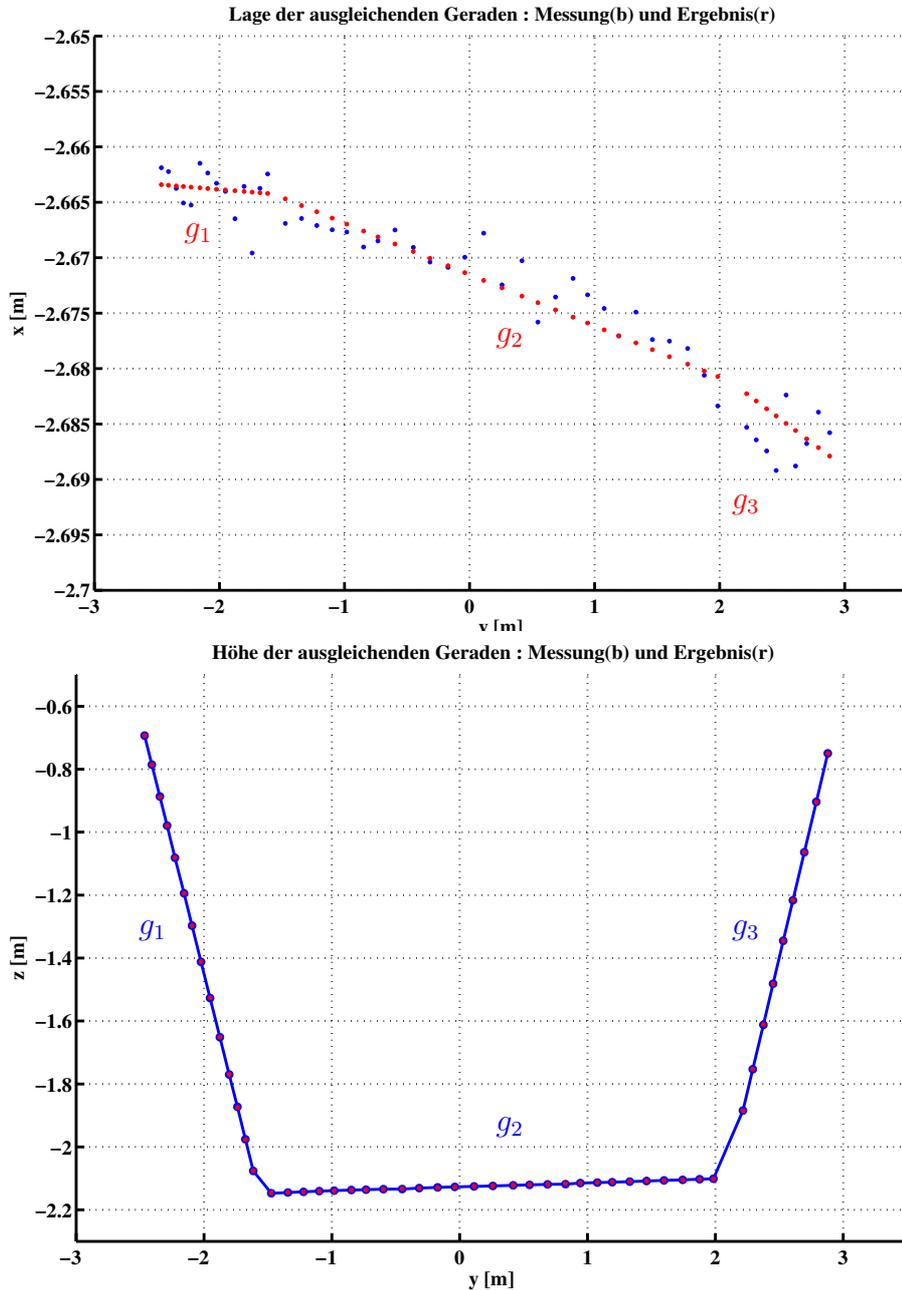


Abbildung 5.13.: Punkte und ausgleichende Geraden (Referenzmessung) in Aufriss und Grundriss.

Beispiel für die Geradenbestimmung Abbildung 5.13 zeigt ein Beispiel für die Bestimmung der Geraden bei einer Sensorzentrierung. Dargestellt sind die gemessenen Referenzpunkte im Fahrzeugkoordinatensystem sowie die daraus errechneten Geraden.

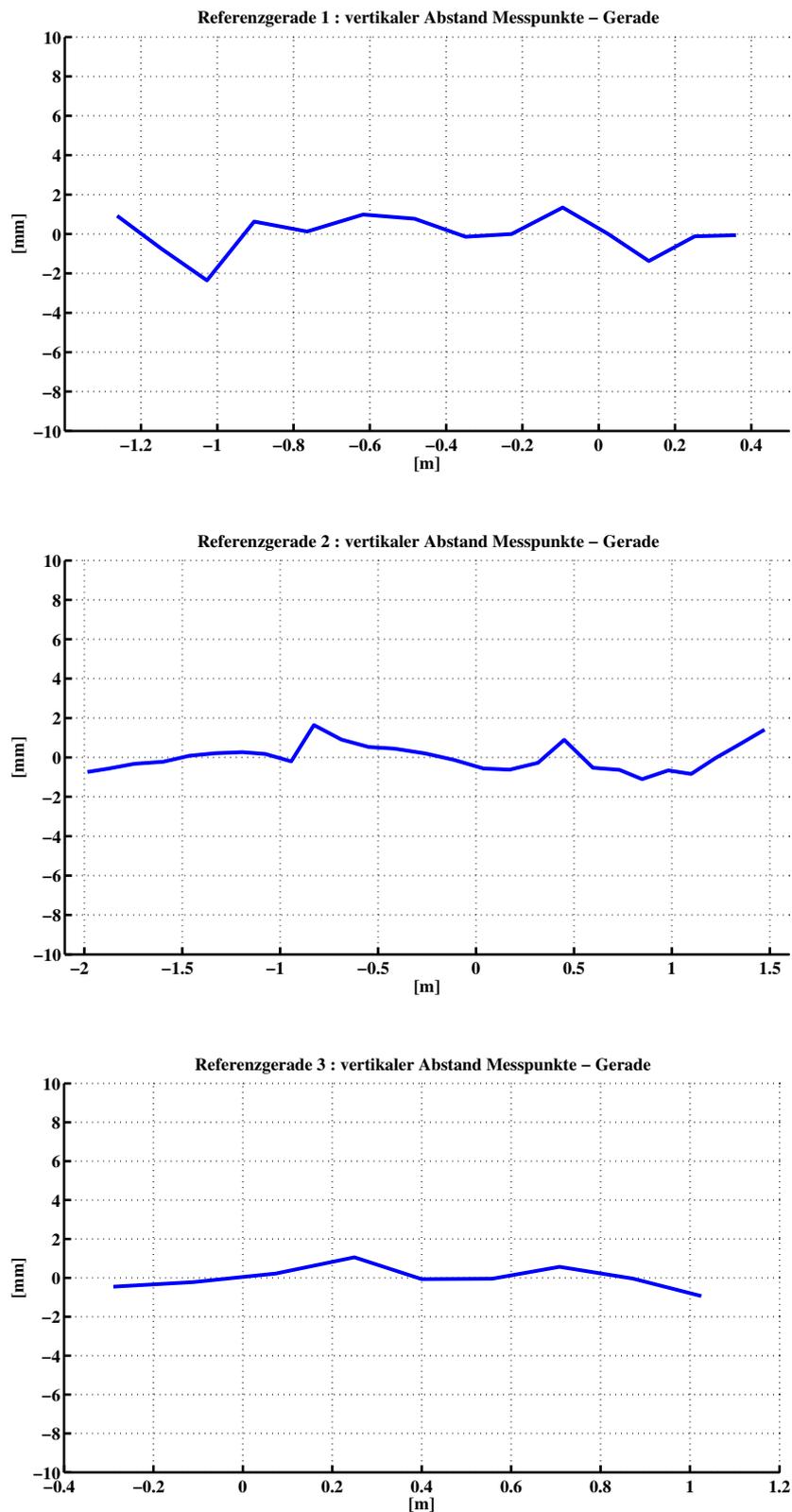


Abbildung 5.14.: Residuen der ausgleichenden Geraden der Referenzmessung in der Höhe.

Anhand des Grundrisses fällt auf, dass die Abtastung der Scanner-Spuren mit Hilfe von Detektoren einer Messunsicherheit von einigen Millimetern in der Lage unterliegt. Die zusätzliche numerische Stabilisierung der Ausgleichung durch Berücksichtigung der gemeinsamen

Messebene erscheint erforderlich. Im Grundriss ist zu erkennen, dass die äußeren, schräg nach oben verlaufenden Geraden g_1 und g_3 von der mittleren, horizontalen Geraden g_2 abweichen. Dies ist auf die Neigung der Messebene der Laserscanner zurückzuführen. Abbildung 5.14 zeigt die Residuen der Referenzpunkte in der Höhe. Systematische Tendenzen weisen darauf hin, dass die Referenzflächen in aller Regel nur näherungsweise eben sind. Eine leichte Krümmung spielt für die Qualität der Kalibrierung keine Rolle, da die Geraden aus Laserscannermessungen in identischer Weise errechnet werden. Die Genauigkeit der Punkthöhe für die Referenzpunkte ergibt sich aus der terrestrischen Messung mit einer Standardabweichung von ca. 1,5 mm. Die Residuen in Abb. 5.14 enthalten zusätzlich die Unzulänglichkeiten im Messaufbau der Referenzflächen. Im dargestellten Beispiel resultiert aus der Geradenbestimmung eine Messunsicherheit in der Höhe von 2,1 mm für Gerade 1, von 2,4 mm für Gerade 2 und von 5,5 mm für Gerade 3.

5.2.5. Bestimmung der Zentrierelemente

Grundlage für die Bestimmung der gesuchten Transformationsparameter ist der direkte Vergleich zwischen den ausgleichenden Geraden aus Referenzmessungen sowie deren Messpunkten und den Laserscanner Polarkoordinaten. Der Vergleich schließt die Prüfung auf systematische, winkelabhängige Restfehler der Streckenmessung ein.

Unbekannte Gesucht sind die Kalibrierparameter $\mathbf{x}_{0,S}^f$ sowie die Rotationen $\gamma_{x,S}^f$, $\gamma_{y,S}^f$ und $\gamma_{z,S}^f$. Zusätzlich ist der Nullpunktfehler der Streckenmessung $d_{0,S}$ als Unbekannte zu ermitteln. Damit lautet der Vektor der unbekannt geometrischen Kalibrierparameter:

$$\mathbf{u} = \left(x_{0,S}^f \quad y_{0,S}^f \quad z_{0,S}^f \quad \gamma_{x,S}^f \quad \gamma_{y,S}^f \quad \gamma_{z,S}^f \quad d_{0,S} \right)^t \quad (5.31)$$

Näherungswerte für die Unbekannten werden im Vektor \mathbf{u}_0 zusammengefasst.

Beobachtungen Der Beobachtungsvektor \mathbf{l} besteht aus 3 Teilen:

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \\ \mathbf{l}_3 \end{pmatrix} \quad (5.32)$$

Der Vektor \mathbf{l}_1 enthält die Ergebnisse der Geradenbestimmung aus Referenzmessungen. Die Geraden $g_{R,i}^f$ liegen im fahrzeugfesten Koordinatensystem vor. Der erste Teil des Beobachtungsvektors lautet somit:

$$\mathbf{l}_1 = \left(\mathbf{x}_{0,R,1}^{f \ t} \quad \mathbf{r}_{R,1}^{f \ t} \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{0,R,n_g}^{f \ t} \quad \mathbf{r}_{R,n_g}^{f \ t} \right)^t \quad (5.33)$$

mit: R tachymetrische Referenzmessung
 n_g Anzahl der Schnittgeraden

Als Beobachtungen für die Ermittlung der Zentrierparameter sowie für die Prüfung auf Restfehler der Streckenmessung dienen die Entfernungsmessungen des Scanners:

$$\mathbf{l}_2 = \left(s_{L,1} \quad s_{L,2} \quad s_{L,3} \quad \cdots \quad s_{L,k} \quad \cdots \quad s_{L,p} \right)^t \quad (5.34)$$

mit: $s_{L,k}$ Streckenmessung des Laserscanners (L) zum Punkt k
 p Anzahl der beobachteten Punkte

Zusätzlich werden die Referenzkoordinaten als Beobachtungen eingeführt:

$$\mathbf{l}_3 = \left(\mathbf{x}_{R,1}^f \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{R,k}^f \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{R,m}^f \right)^t \quad (5.35)$$

mit: $\mathbf{x}_{R,k}^f$ gemessener Referenzpunkt
 m Anzahl der Referenzpunkte

Grobe Messfehler des Scanners werden mit Hilfe von Ausreißertests detektiert und die entsprechenden Punkte in den weiteren Berechnungen nicht weiter verwendet (siehe Anlage B.3).

Bedingungsgleichungen Zur Festlegung der Zentrierparameter werden 2 verschiedene Arten von Widerspruchsgleichungen im Widerspruchsvektor \mathbf{w} kombiniert:

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Bedingungen zur Abstandsminimierung} \\ \text{Bedingungen zur Anpassung der Streckenmessung} \end{pmatrix} \quad (5.36)$$

Bedingungen zur Abstandsminimierung Die Geraden $g_{R,i}^f$ entlang der Spur des Scanners müssen sich in identischer Weise aus den Messwerten der Laserscanner ergeben. Die Formeln und Zusammenhänge aus Kapitel 5.2.4 finden in modifizierter Weise Anwendung. Eine notwendige Anpassung besteht darin, dass die direkten Beobachtungsgrößen nicht Koordinaten sind, sondern die Streckenmessungen des Laserscanners. Formel (5.14) wird modifiziert zu Gleichung (5.34). Aus den Polarkoordinaten für einen Punkt k ergeben sich nach (5.37) unter Anwendung von Formel (4.3) kartesische Sensorkoordinaten.

$$\mathbf{x}_{L,k}^S = \begin{pmatrix} 0 & -\cos \varphi_{L,k} & -\sin \varphi_{L,k} \end{pmatrix}^t \cdot (s_{L,k} + d_{0,S}) \quad (5.37)$$

Diese werden nach Formel (5.38) unter Verwendung von (3.5) in das fahrzeugfeste Bezugssystem überführt.

$$\mathbf{x}_{L,k}^f = \mathbf{x}_{0,S}^f + \mathbf{R}_s^f \cdot \mathbf{x}_{L,k}^S \quad (5.38)$$

Die Formeln (5.12) ff. im Kapitel 5.2.4 finden entsprechend Anwendung. Für jeden Scannerpunkt $\mathbf{x}_{L,k}^f$ abgebildet auf die jeweilige Gerade $g_{R,i}^f$ lautet der Widerspruch aus der Abstandsbedingung nach Formel (5.20):

$$w_{1,k} = h_k^2 \left(\mathbf{x}_{L,k}^f, \mathbf{x}_{0R,i}^f, \mathbf{r}_{R,i}^f \right) \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad (5.39)$$

Für die Ableitung der Abstandsbedingung nach den Transformationsparametern gilt:

$$\mathbf{A}_{1,k} = \frac{\partial w_{1,k}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\partial w_{1,k}}{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_{L,k}^f} & \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_{L,k}^f} & \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_{L,k}^f} \end{pmatrix} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \mathbf{u}} \quad (5.40)$$

mit:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_{L,k}^f} &= \frac{2 \cdot [\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{R,i}^f]^t \cdot [(\mathbf{x}_{L,k}^f - \mathbf{x}_{0R,i}^f) \times \mathbf{r}_{R,i}^f]}{|\mathbf{r}_{R,i}^f|^2} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_{L,k}^f} &= \frac{2 \cdot [\mathbf{e}_y \times \mathbf{r}_{R,i}^f]^t \cdot [(\mathbf{x}_{L,k}^f - \mathbf{x}_{0R,i}^f) \times \mathbf{r}_{R,i}^f]}{|\mathbf{r}_{R,i}^f|^2} \\ \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_{L,k}^f} &= \frac{2 \cdot [\mathbf{e}_z \times \mathbf{r}_{R,i}^f]^t \cdot [(\mathbf{x}_{L,k}^f - \mathbf{x}_{0R,i}^f) \times \mathbf{r}_{R,i}^f]}{|\mathbf{r}_{R,i}^f|^2} \end{aligned} \quad (5.41)$$

Die inneren Ableitungen der Koordinaten $\mathbf{x}_{L,k}^f$ nach den Unbekannten lauten:

$$\frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \mathbf{u}} = \left(\frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial x_{0,S}^f} \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial y_{0,S}^f} \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial z_{0,S}^f} \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \gamma_{x,S}^f} \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \gamma_{y,S}^f} \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \gamma_{z,S}^f} \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial d_{0,S}} \right) \quad (5.42)$$

mit:

$$\frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial x_{0,S}^f} = \mathbf{e}_x \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial y_{0,S}^f} = \mathbf{e}_y \quad \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial z_{0,S}^f} = \mathbf{e}_z \quad (5.43)$$

Nach Formel (3.6) für die Rotationsmatrix \mathbf{R}_S^f ergibt sich für die Ableitung nach den Winkeln:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \gamma_{x,S}^f} &= \frac{\partial \mathbf{R}_S^f}{\partial \gamma_{x,S}^f} \mathbf{x}_{L,k}^S = \mathbf{R}_{z,S}^f \mathbf{R}_{y,S}^f \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \gamma_{x,S}^f & -\cos \gamma_{x,S}^f \\ 0 & \cos \gamma_{x,S}^f & -\sin \gamma_{x,S}^f \end{pmatrix} \mathbf{x}_{L,k}^S \\ \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \gamma_{y,S}^f} &= \frac{\partial \mathbf{R}_S^f}{\partial \gamma_{y,S}^f} \mathbf{x}_{L,k}^S = \mathbf{R}_{z,S}^f \begin{pmatrix} -\sin \gamma_{y,S}^f & 0 & \cos \gamma_{y,S}^f \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos \gamma_{y,S}^f & 0 & -\sin \gamma_{y,S}^f \end{pmatrix} \mathbf{R}_{x,S}^f \mathbf{x}_{L,k}^S \\ \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial \gamma_{z,S}^f} &= \frac{\partial \mathbf{R}_S^f}{\partial \gamma_{z,S}^f} \mathbf{x}_{L,k}^S = \begin{pmatrix} -\sin \gamma_{z,S}^f & -\cos \gamma_{z,S}^f & 0 \\ \cos \gamma_{z,S}^f & -\sin \gamma_{z,S}^f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{R}_{y,S}^f \mathbf{R}_{x,S}^f \mathbf{x}_{L,k}^S \end{aligned} \quad (5.44)$$

Für die Ableitung nach dem Nullpunktfehler gilt:

$$\frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial d_{0,S}} = \mathbf{R}_S^f \cdot \begin{pmatrix} 0 & -\cos \varphi_{L,k} & -\sin \varphi_{L,k} \end{pmatrix}^t \quad (5.45)$$

Abgeleitet nach den Parametern der Referenzgerade folgt für die entsprechende Zeile der Beobachtungsmatrix $\mathbf{B}_{1,k}$:

$$\mathbf{B}_{1,k}(\mathbf{l}_1) = \frac{\partial w_{1,k}}{\partial \mathbf{l}_1} = \left(\cdots \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_{0R,i}^f} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_{0R,i}^f} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_{0R,i}^f} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{xR,i}^f} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{yR,i}^f} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial r_{zR,i}^f} \quad \cdots \right) \quad (5.46)$$

Für die einzelnen Elemente der Matrix $\mathbf{B}_{1,k}(\mathbf{l}_1)$ gilt Formel (5.22) entsprechend. Als weitere Beobachtungen treten im Vektor \mathbf{l}_2 die gemessenen Strecken der Laserscanner auf. Die Ableitung nach der Strecke zum Punkt k lautet:

$$\mathbf{B}_{1,k}(\mathbf{l}_2) = \frac{\partial w_{1,k}}{\partial \mathbf{l}_2} = \frac{\partial w_{1,k}}{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial s_{L,k}} = \left(\frac{\partial w_{1,k}}{\partial x_{L,k}^f} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial y_{L,k}^f} \quad \frac{\partial w_{1,k}}{\partial z_{L,k}^f} \right) \cdot \frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial s_{L,k}} \quad (5.47)$$

mit:

$$\frac{\partial \mathbf{x}_{L,k}^f}{\partial s_{L,k}} = \mathbf{R}_S^f \cdot \begin{pmatrix} 0 & -\cos \varphi_{L,k} & -\sin \varphi_{L,k} \end{pmatrix}^t \quad (5.48)$$

Bedingungen der Streckenmessung Im Zuge der Ausgleichung werden zusätzlich die Residuen der Streckenmessung minimiert. Ziel der Zusatzbedingungen ist die zuverlässige Schätzung des Nullpunktfehlers sowie die Prüfung der Strecken auf eventuelle winkelabhängige Restfehler. Die beobachteten Referenzpunkte entlang der Spur des Scanners werden in das Sensorkoordinatensystem des Laserscanners transformiert und dienen als Referenz für die Streckenmessung. Da die Punkte mit den Messungen des Laserscanners nicht zusammenfallen, wird die korrespondierende Strecke aus Laserscannerbeobachtungen interpoliert.

Für die Bedingungsgleichungen gilt:

$$w_{2,k} = |\mathbf{x}_{R,k}^S| - (s'_{L,k} + d_{0,S}) \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (5.49)$$

mit: $\mathbf{x}_{R,k}^S$ transformierter Referenzpunkt
 $s'_{L,k}$ interpolierte Strecke zum Referenzpunkt
 m Anzahl der beobachteten Punkte

Die Referenzpunkte $\mathbf{x}_{R,k}^f$ werden durch Umkehrung der Transformation (5.38) in das Scanner-Koordinatensystem überführt.

$$\mathbf{x}_{R,k}^S = (\mathbf{R}_S^f)^{-1} \cdot (\mathbf{x}_{R,k}^f - \mathbf{x}_{0,S}^f) \quad (5.50)$$

Die entsprechenden Polarkoordinaten ergeben sich nach den Formeln

$$s_{R,k} = |\mathbf{x}_{R,k}^S| \quad \text{und} \quad \varphi_{R,k} = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y_{R,k}^S}{z_{R,k}^S}\right). \quad (5.51)$$

Aus den umgebenden Laserscannermesspunkten wird die korrespondierende Strecke $s'_{L,k}$ interpoliert:

$$s'_{L,k} = f(\varphi_{R,k}, \varphi_L, \mathbf{s}_L) \quad (5.52)$$

mit: φ_L, \mathbf{s}_L Vektor mit den Laserscanner-Polarkoordinaten für den Bereich um den Referenzpunkt von Punkt $k - 2$ bis $k + 2$ aus Vektor \mathbf{l}_2

Die Ableitung nach den Koordinaten der transformierten Referenzpunkte im Laserscanner-Koordinatensystem lautet:

$$\frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^S} = \left[\frac{1}{s_{R,k}} (\mathbf{x}_{R,k}^S)^t - f'(\varphi_{R,k}, \varphi_L, \mathbf{s}_L) \left(\frac{-1}{(z_{R,k}^S)^2 + (y_{R,k}^S)^2} \right) \begin{pmatrix} 0 \\ z_{R,k}^S \\ -y_{R,k}^S \end{pmatrix}^t \right] \quad (5.53)$$

Für die Ableitung nach den Unbekannten ergibt sich damit:

$$\mathbf{A}_{2,k} = \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial w_{2,k}}{\partial x_{0,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial y_{0,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial z_{0,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \gamma_{x,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \gamma_{y,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \gamma_{z,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial d_{0,S}} \end{pmatrix} \quad (5.54)$$

mit:

$$\frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{0,S}^f} = \begin{pmatrix} \frac{\partial w_{2,k}}{\partial x_{0,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial y_{0,S}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial z_{0,S}^f} \end{pmatrix} = \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^S} (\mathbf{R}_S^f)^{-1} \cdot (-\mathbf{I}) \quad (5.55)$$

Für die übrigen Ableitungen nach den gesuchten geometrischen Parametern gilt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \gamma_{x,S}^f} &= \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^S} \frac{\partial (\mathbf{R}_{x,S}^f)^{-1}}{\partial \gamma_{x,S}^f} (\mathbf{R}_{y,S}^f)^{-1} (\mathbf{R}_{z,S}^f)^{-1} (\mathbf{x}_{R,k}^f - \mathbf{x}_{0,S}^f) \\ \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \gamma_{y,S}^f} &= \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^S} (\mathbf{R}_{x,S}^f)^{-1} \frac{\partial (\mathbf{R}_{y,S}^f)^{-1}}{\partial \gamma_{y,S}^f} (\mathbf{R}_{z,S}^f)^{-1} (\mathbf{x}_{R,k}^f - \mathbf{x}_{0,S}^f) \\ \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \gamma_{z,S}^f} &= \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^S} (\mathbf{R}_{x,S}^f)^{-1} (\mathbf{R}_{y,S}^f)^{-1} \frac{\partial (\mathbf{R}_{z,S}^f)^{-1}}{\partial \gamma_{z,S}^f} (\mathbf{x}_{R,k}^f - \mathbf{x}_{0,S}^f) \\ \frac{\partial w_{2,k}}{\partial d_{0,S}} &= -1 \end{aligned} \quad (5.56)$$

Die Ableitungen nach den Beobachtungen lauten:

$$\mathbf{B}_{2,k} = \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{l}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^f} & \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{s}_L} \end{pmatrix} \quad (5.57)$$

mit:

$$\frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^f} = \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{x}_{R,k}^S} (\mathbf{R}_S^f)^{-1} \mathbf{I} \quad \text{und} \quad \frac{\partial w_{2,k}}{\partial \mathbf{s}_L} = -\frac{\partial f(\varphi_{R,k}, \varphi_L, \mathbf{s}_L)}{\partial \mathbf{s}_L} \quad (5.58)$$

Ausgleichsberechnung Die Ausgleichung zur Bestimmung der gesuchten geometrischen Parameter für den Laserscanner erfolgt nach bedingten Beobachtungen mit Unbekannten (siehe Gauß-Helmert-Modell in Anlage B.2). Tabelle 5.2 enthält als Beispiel das Ergebnis für eine Kalibrierung. Die dargestellten Standardabweichungen repräsentieren die innere Genauigkeit

Bezeichnung	Parameter	σ
$x_{0,S}^f$	-2,6571 m	0,0003 m
$y_{0,S}^f$	-0,4925 m	0,0003 m
$z_{0,S}^f$	-0,1259 m	0,0004 m
$\gamma_{x,S}^f$	0,1039 °	0,0082 °
$\gamma_{y,S}^f$	-0,0556 °	0,0103 °
$\gamma_{z,S}^f$	0,0610 °	0,0037 °
$d_{0,S}$	-0,0344 m	0,0003 m

Tabelle 5.2.: Ergebnis der geometrischen Kalibrierung für einen Scanner.

der Berechnungen. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Koordinaten des Sensornullpunktes und der Offset der Streckenmessungen des Scanners aufgrund der hohen Redundanz mit einer Standardabweichung von unter 1 mm geschätzt werden können. Die Standardabweichung der Lagewinkel des Scanners gegenüber dem Fahrzeugkoordinatensystem hängt direkt von den Abmessungen und der geometrischen Konstellation der Referenzflächen ab. Für die praktische Auswertung von Fahrbahnoberflächenmessungen hat die Drehung um den Winkel $\gamma_{x,S}^f$ die größte Bedeutung. Eine Winkelabweichung von 0,01° bezogen auf $\gamma_{x,S}^f$ entspricht in einer Entfernung von 5 m einer Höhenabweichung von 0,0009 m. Die Größenordnung der Standardabweichungen für die geschätzten Lagewinkel entspricht also bezogen auf die Aufnahmegeometrie des Scanners der Genauigkeit des Sensornullpunktes und ist verglichen mit der Wiederholgenauigkeit der Scannermessungen von 3 bis 4 mm bedeutungslos. Die Rotation um die z-Achse $\gamma_{z,S}^f$ kann aufgrund der Länge der Referenzbasis von mindestens 5 m und der Identität von Referenzebene und Scannerebene mit einer Standardabweichung von 0,0037° relativ exakt bestimmt werden. Die Festlegung der Rotation um die y-Achse $\gamma_{y,S}^f$ hängt von der Höhe der seitlichen Referenzflächen ab. Da diese in der Regel 1,5 m bis 2 m nicht überschreitet, ist die Genauigkeit der Schätzung begrenzt. Die Kontrolle der äußeren Genauigkeit der geschätzten Zentrierparameter erfolgt über den direkten Vergleich zwischen den kalibrierten Streckenmessungen des Laserscanners und den Strecken zu den Referenzkoordinaten (siehe Abschnitt Bedingungen der Streckenmessung). Die a posteriori Residuen geben außerdem Aufschluss darüber, ob systematische, winkelabhängige Fehler in der Streckenmessung verbleiben, die durch die Laborkalibrierung nicht erfasst werden. Abbildung 5.15 zeigt die a posteriori Residuen der Streckenmessung. Es ergibt sich eine Standardabweichung von 0.0019 mm. Systematische Restfehler sind nicht erkennbar.

Fazit Das vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der Zentrierparameter für kinematisch eingesetzte Laserscanner liefert zuverlässige Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit. Das Kalibrierverfahren wurde vielfach für unterschiedliche Laserscanner-Ausrichtungen und verschiedene Scanner angewendet und hat sich bewährt.

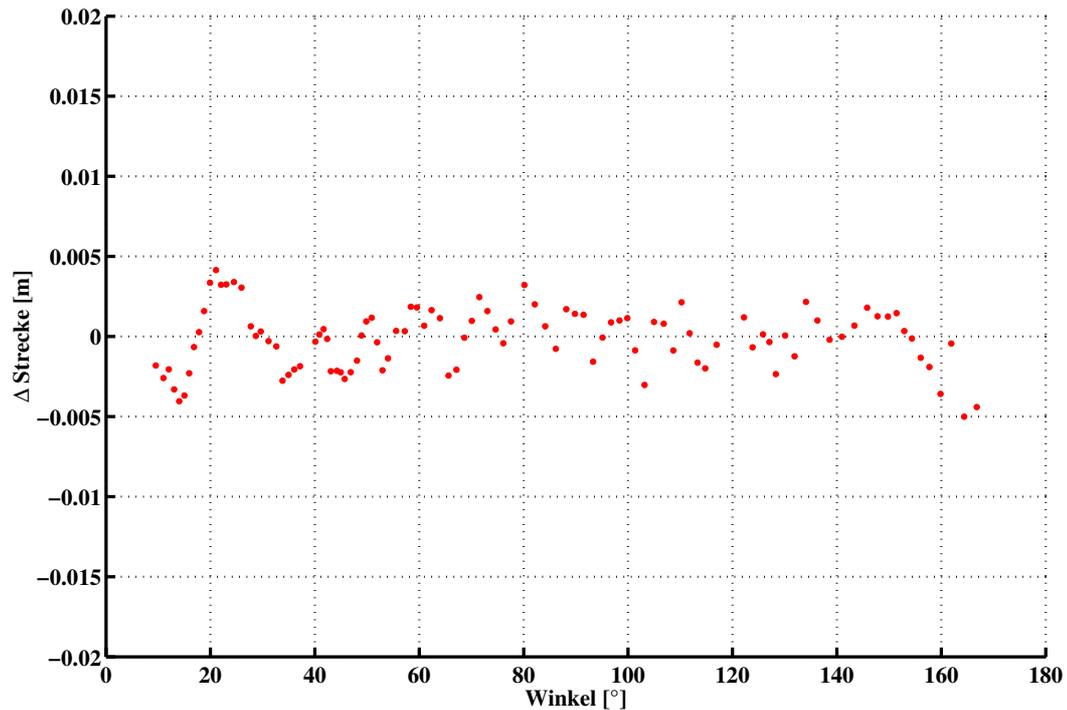


Abbildung 5.15.: A posteriori Residuen der Laserscanner-Streckenmessung zu den Referenzpunkten.

5.3. Verifikation der Laserscanner-Kalibrierung

Die äußere Genauigkeit kinematischer Laserscannermessungen lässt sich aus dem Vergleich mit Referenzkoordinaten ableiten. Das Verfahren zur Verifikation der Messergebnisse sollte möglichst dem typischen Ablauf einer Vermessung entsprechen und mit geringem Aufwand durchgeführt werden können. Ideal ist die Vermessung eines Referenzpunktfeldes im öffentlichen Straßenraum mit möglichst wenig störendem Verkehr und guten GPS - Empfangsbedingungen. Es bietet sich an, ein Referenzpunktfeld bestehend aus mehreren möglichst ebenen Flächen zu wählen, so dass die Messgenauigkeit in allen drei Dimensionen für verschiedene Scannerausrichtungen geprüft werden kann. In der Praxis finden Referenzmessungen zum Zweck der Qualitätssicherung im Zusammenhang mit Messkampagnen regelmäßig statt. Zur Verifikation der Kalibrierung für die kinematische Vermessung mit MoSES dient eine Autobahnunterführung (siehe Abbildung 5.16). In der Mitte des Bauwerks wurden in einem ca. 2 m langen Abschnitt der befestigte Teil der Fahrbahn, die Seitenwände und die Decke eingemessen und mit 1200 Kontrollpunkten dokumentiert. Auf diese Weise lässt sich die Kalibrierung für jede Konstellation von Laserscannern auf dem Trägerfahrzeug im praktischen Messeinsatz kontrollieren. Da die GPS-Empfangsbedingungen vor und hinter der Unterführung optimal sind, bleiben die systematischen Abweichungen gegenüber dem Referenzpunktfeld aufgrund der Messunsicherheit der Trajektorie gering. Durch Verschiebungen im Bereich weniger Zentimeter lassen sich die Messergebnisse auf das Passpunktfeld transformieren. Die Anpassung ist allerdings auf Verschiebungen quer zur Fahrtrichtung und in der Höhe begrenzt. Fehler in Längsrichtung lassen sich mit diesem Punktfeld nicht prüfen. Abbildung 5.17 zeigt ein Beispiel für die Abweichung der Messdaten gegenüber den Kontrollpunkten bei einer Aufnahme mit nach unten ausgerichteten Laserscanner. In dem abgebildeten Beispiel wurden 510 Referenzpunkte mit Laserscanner-Koordinaten verglichen. Insgesamt ergibt sich eine Standardabweichung von 3,7 mm für die Streckenmessung. Diese leitet sich ab aus Messungen

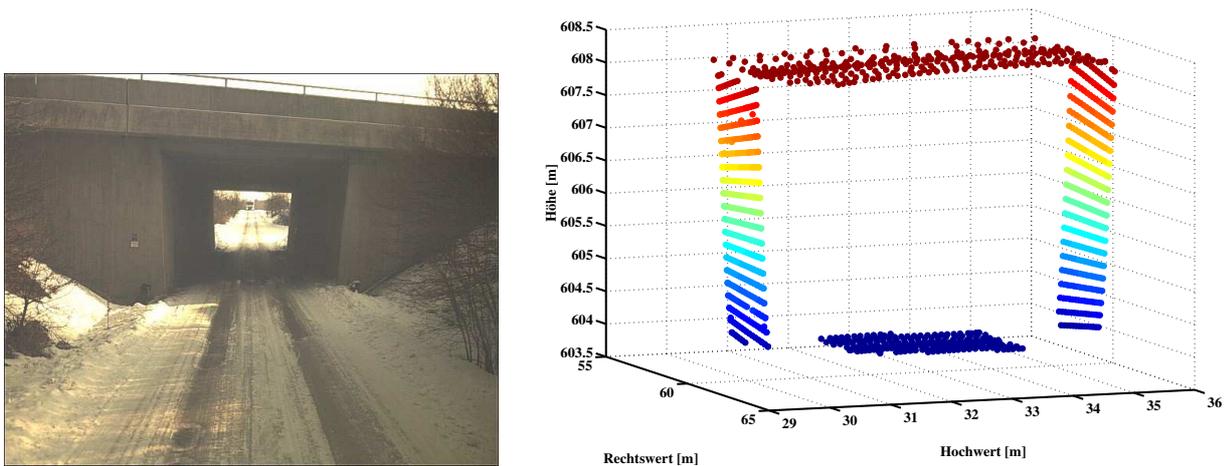


Abbildung 5.16.: Referenzpunktfeld zur Prüfung der Laserscanner-Kalibrierung an einer Unterführung.

auf die Fahrbahnoberfläche und zu den Seitenwänden. Die Verifikation der Laserscanner-Kalibrierung ist besonders sensitiv für Ungenauigkeiten der Zentrierparameter $\gamma_{x,S}^f$ und $d_{0,S}$. Diese spielen für die erreichbare Genauigkeit bei praktische Vermessungen auch mit Abstand die größte Rolle. Mit dieser Testanordnung können alle Einflüsse nicht geprüft werden, die einen Längsfehler verursachen, d.h. insbesondere $\gamma_{y,S}^f$ oder $x_{0,S}^f$. Die abschließende Prüfung der Messgenauigkeit mit Hilfe eines Referenzpunktfeldes schließt grundsätzlich die Kontrolle über einen großen Teil der Prozessierungsschritte aus Kap. 3.8 ein, d.h. Synchronisation, Sensorkalibrierung und Zentrierung. Die resultierende Standardabweichung liegt im Bereich der Messgenauigkeit aus Wiederholungsmessungen und ist damit absolut zufriedenstellend.

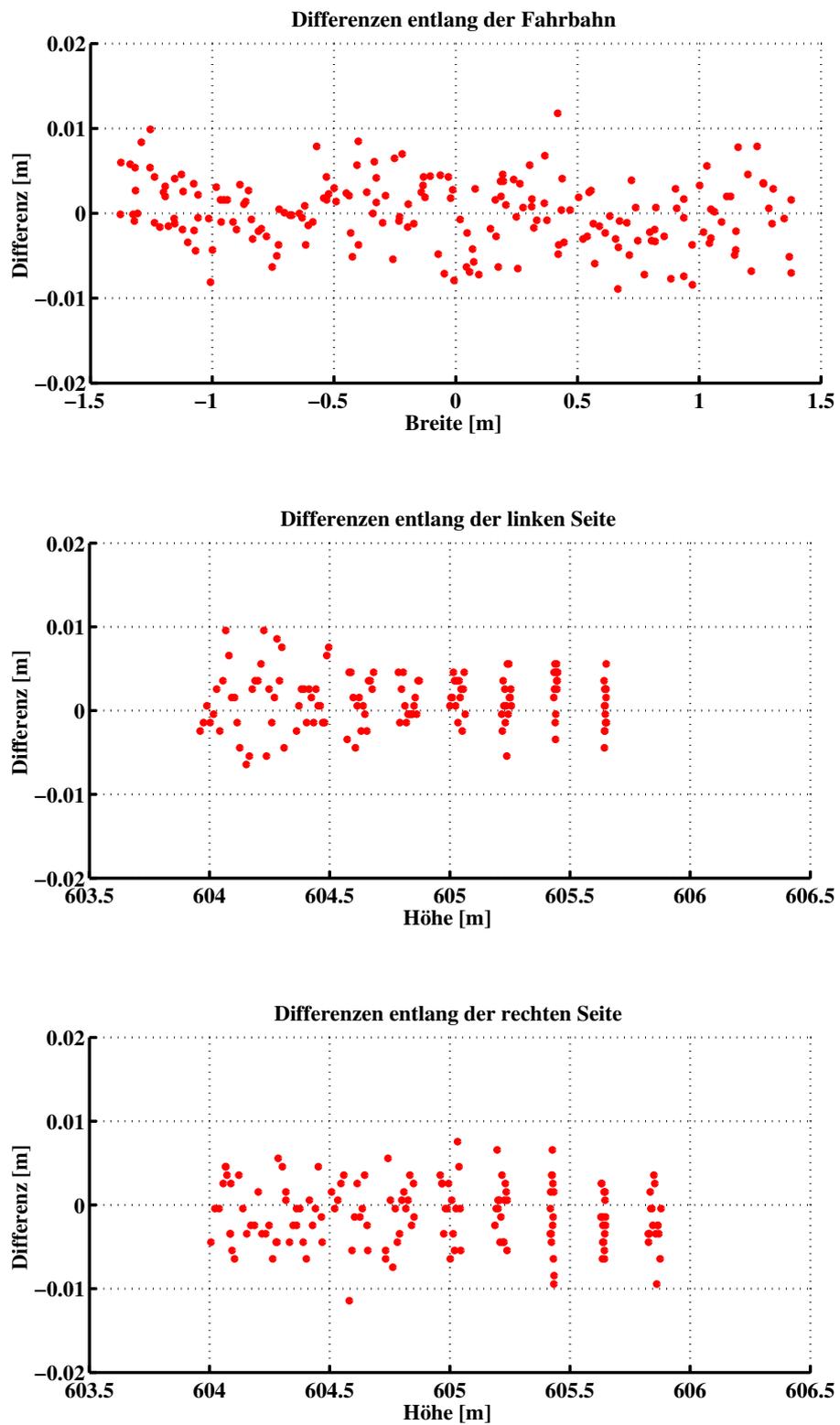


Abbildung 5.17.: Differenzen zwischen Laserscanner-Messungen und den Kontrollpunkten.

6. Merkmalsextraktion aus Laserscannermessungen

Das Ergebnis der kinematischen Abtastung des Straßenraumes mit Laserscannern sind diskrete Punkte hoher Dichte. Bei einer Messgeschwindigkeit von 50 km/h werden beim LMS 200 pro Scanner ca. 900 Punkte pro Meter aufgenommen. Bei Annahme eines durchschnittlichen Abtastbereiches von 10 m Breite entspricht dies im Schnitt ca. 90 Punkten pro Quadratmeter (siehe Kapitel 4.2.2 und vergleiche Abb. 4.5). Zusätzlich zu den dreidimensionalen Koordinaten liegt für jeden Punkt die Intensität des reflektierten Signals vor (siehe Kapitel 4.2.1). Das wesentliche Merkmal der Aufnahme des Straßenraumes mit Laserscannern ist die umfassende digitale Abtastung aller Strukturen. Das Ergebnis der Auswertung ist zunächst eine

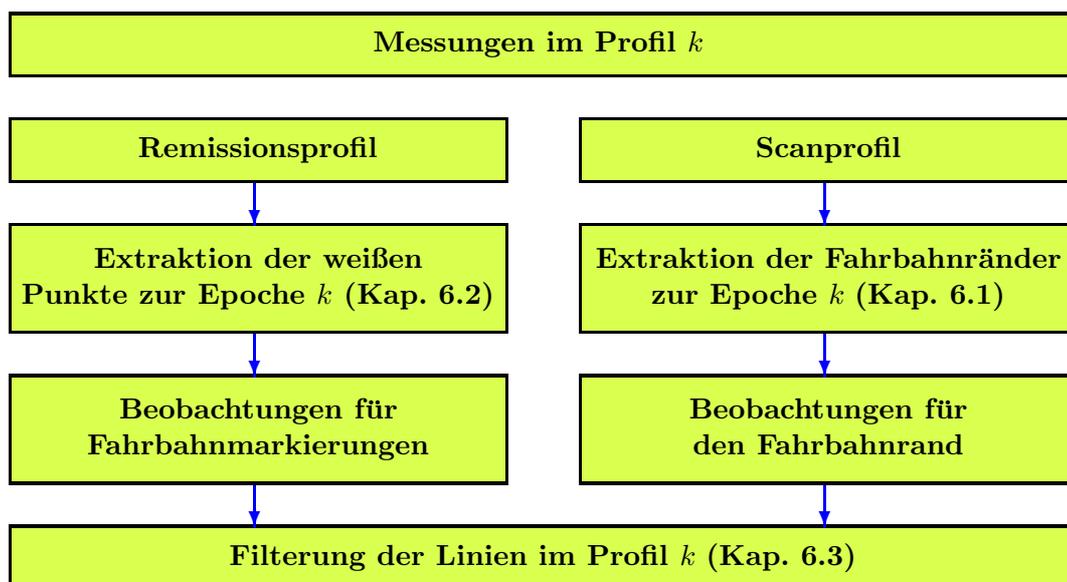


Abbildung 6.1.: Ablauf der Merkmalsextraktion mit anschließender Objektbildung.

Punktwolke ohne attributive Information. Für die weitere Verarbeitung ist eine möglichst automatisierte Interpretation der Punkte erforderlich. Unter den Koordinaten finden sich aber neben Messungen zu gewünschten Objekten, z.B. der Fahrbahnoberfläche, auch nicht sinnvolle Messungen zu Hindernissen im Aufnahmekorridor oder zu beweglichen Zielen, wie zum Beispiel anderen Fahrzeugen, Radfahrern oder Fußgängern (siehe Abbildung 6.2). Die Trennung der eigentlichen Aufnahmedaten von Störungen ist für die Weiterverarbeitung der Daten zwingend geboten. Für den Fall der kinematischen Erfassung des Straßenraumes werden im Folgenden zwei mögliche Verfahren zur Analyse der Aufnahmeprofile vorgestellt:

- geometrische Extraktion der Fahrbahnoberfläche aus den Aufnahmeprofilen und Beseitigung von Messungen zu Hindernissen (siehe Kapitel 6.1)

- Analyse der Intensität des reflektierten Signals zur Detektion von Fahrbahnmarkierungen (siehe Kapitel 6.2)

Die Verarbeitung der aufgenommenen Laserscanner-Profile im Rahmen der Datenauswertung erfolgt sequentiell. Nach Abschluss der Analyse der Messungen im Profil k werden die extrahierten Punkte, bzw. Kanten im nächsten Schritt profilübergreifend zu linienhaften Objekten zusammengefasst (siehe Kap. 6.3) und bilden damit die Grundlage für weitere Anwendungen, z.B. in Kapitel 7 und 8. Der Ablauf ist schematisch in Abb. 6.1 dargestellt. Beispiele für die Analyse von Scanprofilen finden sich auch in [Gräfe (2003)] und [Gräfe und Heister (2004)].

6.1. Geometrische Analyse der Scanprofile

Die folgende Analyse beschränkt sich auf den Fall der kinematischen Vermessung von Fahrbahnoberflächen als Anwendungsschwerpunkt für das MoSES (vgl. Kapitel 2.5). Das analytische Vorgehen lässt sich aber auf andere Anwendungsgebiete, wie zum Beispiel die Messung von Tunnelwänden oder Brücken erweitern. Bei der Vermessung mit MoSES bestreichen die Messstrahlen bei nach unten ausgerichtetem Scanner die befestigte Fahrbahn inklusive aller darauf befindlichen Objekte, den Randstreifen sowie die angrenzende Vegetation oder Bebauung. Abbildung 6.2 enthält eine typische Messsituation bei der Aufnahme von Verkehrswegen mit Laserscannern, in diesem Fall einen innerörtlichen Bereich. Das Dokumentationsbild auf der linken Seite zeigt Fahrzeuge auf der Gegenfahrbahn, die im farbcodierten Höhenbild als Lücken auftreten. Die von Bordsteinkanten eingefasste Einmündung auf der rechten Fahrbahnseite sowie die rechte Fahrbahnbegrenzung sind deutlich erkennbar. In der Ausschnittsvergrößerung in Abbildung 6.3 treten noch weitere Details zu Tage, z.B. ein Wassereinlauf oder Bäume. Die Aufgabe bei der geometrischen Analyse besteht nun darin, alle Messwerte zu identifizieren, die nicht zur eigentlichen Fahrbahn gehören und die Punktwolke entsprechend aufzuteilen. Die Laserscannermessungen liegen im MoSES aufgrund der Messanordnung der Scanner näherungsweise als Querprofile entlang der Trajektorie vor (siehe Abbildung 4.6). Die geometrische Analyse der Profile basiert auf einer sequentiellen Analyse der einzelnen Messwerte. Die Ziele der Auswertung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- **Detektion der Fahrbahnränder** Fahrbahnränder sind die geometrisch definierbaren Grenzen der Fahrbahnoberfläche, z.B. Bordstein- oder Asphaltkanten. Die Detektion der Fahrbahnränder ermöglicht die Eingrenzung des Fahrbahnbereiches und damit die Extraktion der Messungen zur befestigten Fahrbahndecke aus der Gesamtheit der Aufnahmepunkte.
- **Beseitigung von Störungen** Ein wesentliches Merkmal für eine Fahrbahnoberfläche unabhängig vom Baumaterial ist die relative Stetigkeit der Fläche. Selbst eine sehr unruhige Fahrbahnoberfläche, z.B. Asphalt mit Schlaglöchern oder Kopfsteinpflaster, weist insgesamt einen glatten Verlauf mit geringen Höhendifferenzen auf. Unstetigkeitsstellen gegenüber einem Modell der stetigen Fläche lassen sich identifizieren und extrahieren.

Die bereinigten Messwerte zur Straßendecke werden für die weitere Auswertung bereitgestellt (siehe Kap. 8).

6.1.1. Filtermodell

Die Analyse der Scanprofile stützt sich auf die Modellierung einer Sollgeometrie innerhalb jedes Profils. Der Grundgedanke besteht darin, dass die Laserscannermessungen auf den

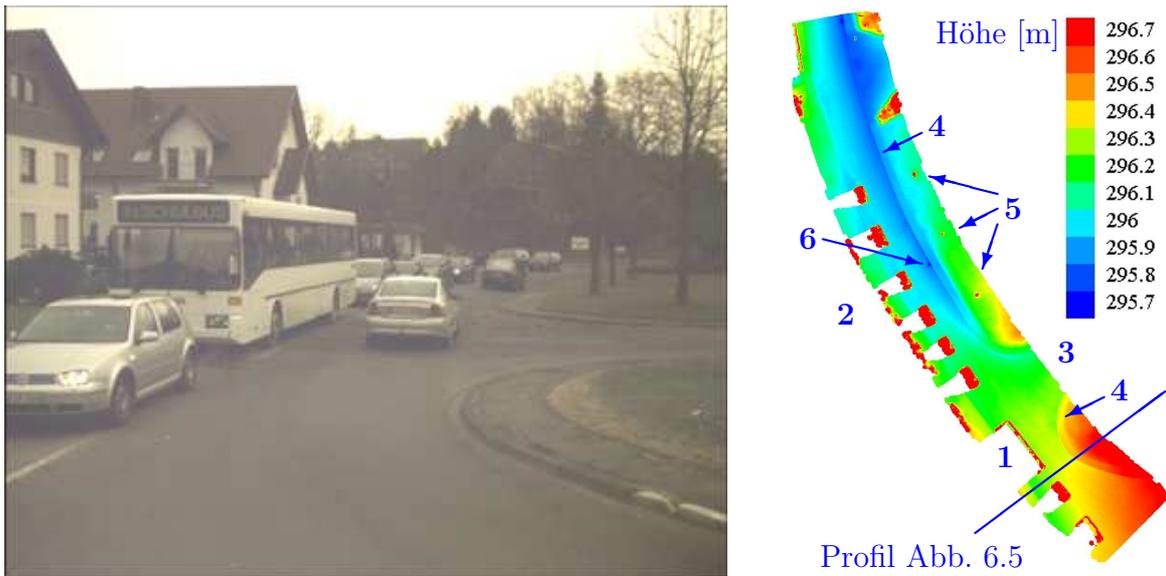


Abbildung 6.2.: Beispiel für eine typische Situation bei der Vermessung mit Laserscannern im innerstädtischen Bereich mit einem Dokumentationsbild (linke Seite) und den zugehörigen Laserscanner-Messpunkten für die ersten ca. 90 m der Straße in farbcodierter Darstellung (rechte Seite) (vgl. Vergrößerung in Abb. 6.3). Zur Orientierung wurden folgende Objekte gekennzeichnet: 1 = Bus; 2 = haltende Fahrzeuge; 3 = Einmündung; 4 = Bordsteinkante mit benachbartem Bürgersteig; 5 = Bäume; 6 = Wassereinlauf

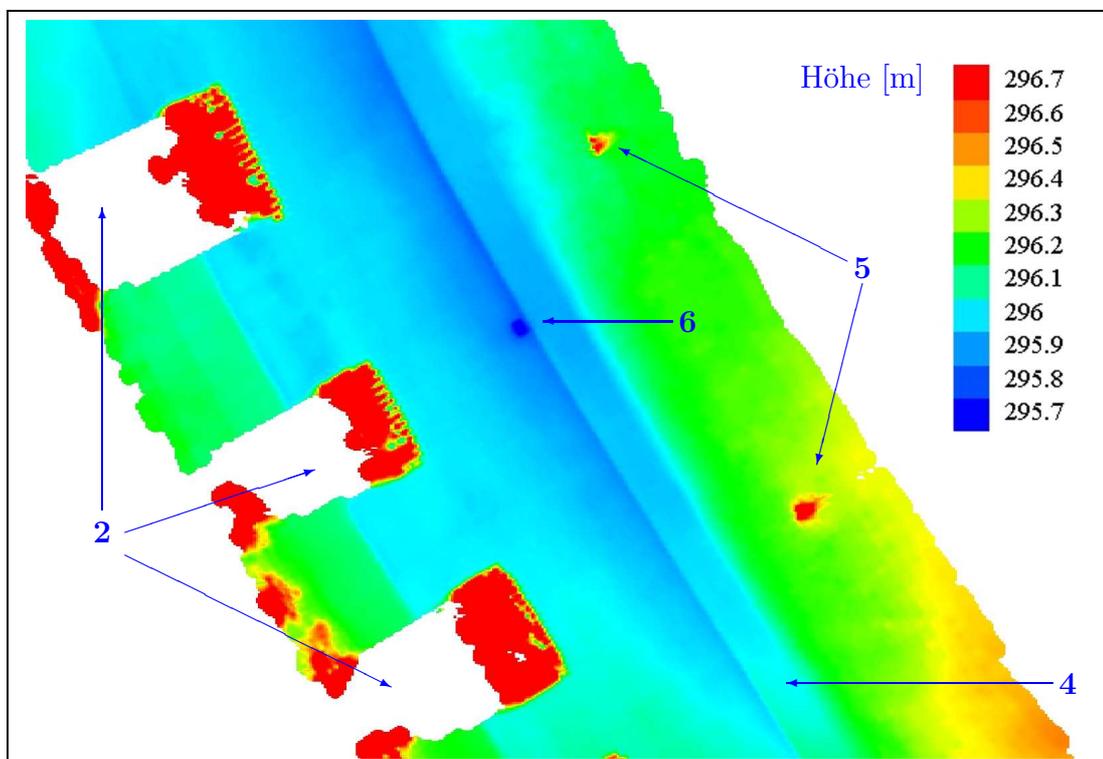


Abbildung 6.3.: Detailvergrößerung zu Abbildung 6.2.

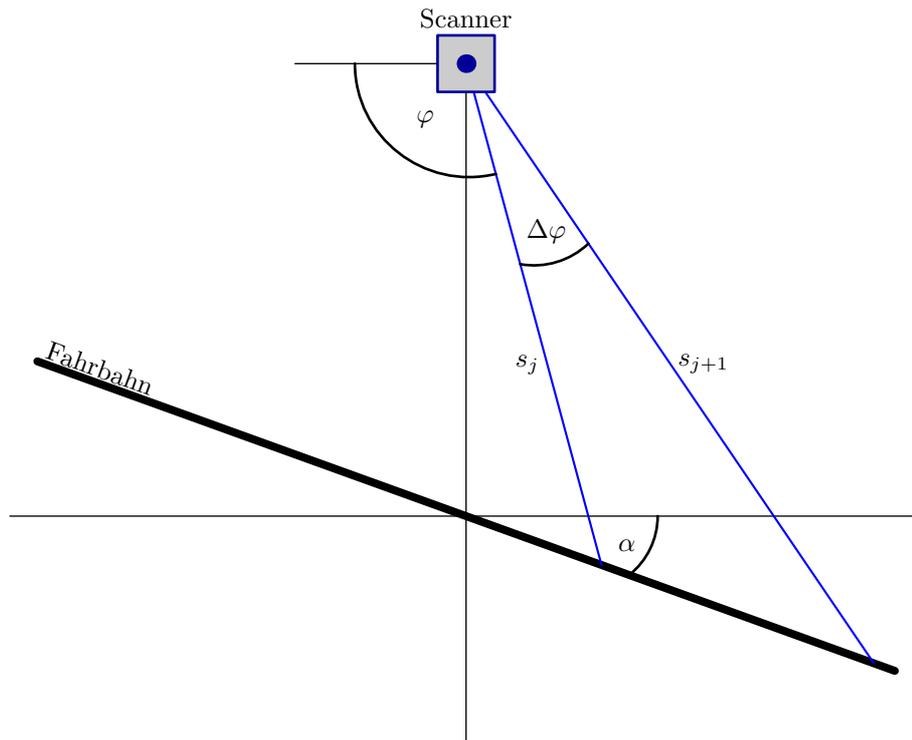


Abbildung 6.4.: Modell für eine geneigte Fahrbahn.

aufgenommenen, stetigen Flächen ebenfalls stetige Schnittlinien bilden. Abweichungen vom gleichmäßigem Verlauf, wie z.B. Messungen zu Steinen auf der Fahrbahn, Fahrzeugen, Wassereinläufen oder Bordsteinen, fallen als statistische Ausreißer im Höhenverlauf auf und können mit Hilfe statistischer Tests detektiert werden (siehe Abbildung 6.7). Die Herausforderung bei der Auslegung des Filters besteht darin, dass auf der einen Seite große Unstetigkeiten, wie z.B. Messungen zu Fahrzeugen oder Fußgängern, detektiert werden sollen und auf der anderen Seite der Filter empfindlich genug sein muss, um relativ flache Kanten zu erkennen, wie z.B. den Rand der asphaltierten Fläche oder den Rand eines Wassereinlaufes. Die Analyse der Scanprofile kann entweder durch Filterung des Höhenverlaufes oder über eine Filterung der Laserscanner-Polarkoordinaten erfolgen. Die ideale Fahrbahnfläche lässt sich mathematisch als geneigte Ebene beschreiben. Ein Querprofil kann als stetige Funktion innerhalb dieser Fläche modelliert werden. Erste Ansätze zur Filterung des Höhenverlaufes mit dem Ziel der Detektion von Straßenrändern finden sich in [Sebald (2000)]. Spätere Vergleichsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Filterung in Polarkoordinaten generell eine deutlich größere Sensitivität zur Detektion statistischer Ausreißer bietet als die reine Analyse der Höhen im Profil. Abbildung 6.4 stellt einen möglichen Ansatz zur Modellbildung in Polarkoordinaten dar. Das Modell beschreibt ein ebenes, geneigtes Straßenprofil, mit dessen Hilfe sich die Strecke zum Scanpunkt $j + 1$ in Abhängigkeit vom Punkt j ausdrücken lässt:

$$s_{j+1}(s_j, \alpha) = s_j \cdot \frac{\sin(\alpha + \varphi_j)}{\sin(\alpha + \varphi_{j+1})} \quad (6.1)$$

mit: s_j, s_{j+1} Strecken für Punkt j und $j + 1$
 φ_j, φ_{j+1} Scanwinkel für Punkt j und $j + 1$
 α Querneigung der Fahrbahn

Ein mögliches Verfahren zur rekursiven Schätzung der Parameter des ebenen Fahrbahnprofils ist ein Kalman-Filter (siehe Kap. A.1). Typischerweise wird ein Kalman-Filter für Schätz-aufgaben in diskreter Zeit eingesetzt. Im vorliegenden Fall erfolgt die Filterung in Bezug auf eine geometrisch diskretisierte Messreihe (vgl. Kap. 3.4.2). Die Filterschritte werden durch

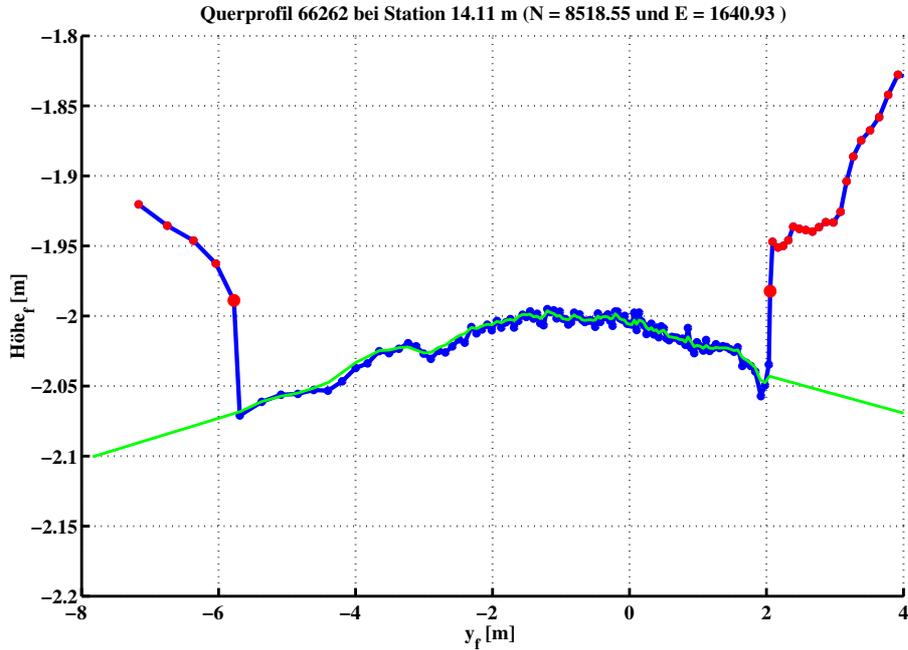


Abbildung 6.5.: Querprofil einer asphaltierten Fahrbahn in vergleichsweise schlechtem Zustand begrenzt von Bordsteinen links und rechts (vgl. Abb. 6.2). Die geschätzte Fahrbahnfläche ist in grün, die bei der Filterung detektierten Ausreißer sind in rot dargestellt.

das Winkelinkrement $\Delta\varphi$ der Scannerpunkte vorgegeben und lassen sich daher äquivalent zu einer diskreten zeitlichen Abfolge der Messwerte behandeln. Die Prädiktion von einem Messpunkt zum nächsten beginnt mit den Punkten senkrecht unter dem Scanner und wird in zwei nachfolgenden Schritten nach außen fortgeführt. Mit den Bezeichnungen aus Formel (6.1) setzt sich der Zustandsvektor wie folgt zusammen:

$$\mathbf{x}_j = \begin{pmatrix} s_j \\ \alpha_j \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Die Prädiktion vom Punkt j zum Scanpunkt $j + 1$ erfolgt nach Formel (A.1). Für die Transitionsmatrix \mathbf{T}_j gilt dabei:

$$\mathbf{T}_j = \begin{pmatrix} \frac{\sin(\alpha + \varphi_j)}{\sin(\alpha + \varphi_{j+1})} & s_j \cdot \frac{\cos(\alpha + \varphi_j) \cdot \sin(\alpha + \varphi_{j+1}) - \sin(\alpha + \varphi_j) \cdot \cos(\alpha + \varphi_{j+1})}{\sin(\alpha + \varphi_{j+1})^2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Die prädizierte Varianz $\bar{\mathbf{S}}_{j+1}$ ergibt sich aus (A.2) unter Verwendung der Systemrauschmatrix $\mathbf{B} = \mathbf{I}$. Die Varianz-Kovarianz-Matrix des Systemrauschens \mathbf{Q}_j lässt sich erst anhand von

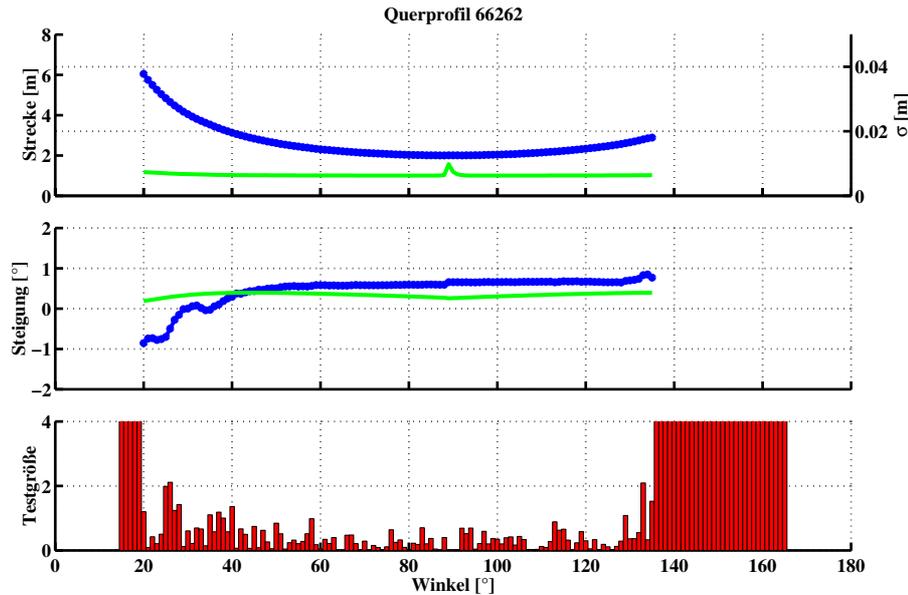


Abbildung 6.6.: Zustandsgrößen zum Querprofil in Abb. 6.5 sowie die Testgröße zu jedem Messpunkt nach Formel (A.11). Die Zustandsgrößen sind in blau und die zugehörigen Standardabweichungen in grün dargestellt.

Testreihen mit praktischen Daten festlegen. Als Beobachtung l_{j+1} geht zu jeder neuen Epoche die beobachtete Strecke s_{j+1} in die Filterung ein. Das funktionale Modell verwendet die prädizierte Zustandsgröße zur Prädiktion der Beobachtung, so dass sich der Zusammenhang $\bar{l}_{j+1} = \bar{s}_{j+1}$ ergibt. Damit gilt für die linearisierte Beobachtungsmatrix \mathbf{A}_{j+1} :

$$\mathbf{A}_{j+1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Die Varianz der Beobachtungen \mathbf{R}_{j+1} wird in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Kapitels 5.1.6 festgesetzt. Die Innovation δl_{j+1} ergibt sich anhand von Formel (A.4) durch Vergleich der prädizierten Beobachtung mit der tatsächlichen Beobachtung. Als Resultat ermöglichen die Residuen δl_{j+1} die Detektion von Ausreißern gegenüber der stetigen Fahrbahnfläche (vgl. Kapitel A.2 und siehe Abb. 6.5). Der statistische Test wird nach Formel (A.11) durchgeführt.

6.1.2. Beispiel für die geometrische Analyse eines Querprofils

Abbildung 6.5 zeigt als Beispiel ein Profil der asphaltierten Fahrbahn aus Abbildung 6.2. Die Oberfläche dieser innerörtlichen Straße wird links und rechts von Bordsteinen begrenzt und befindet sich in vergleichsweise schlechtem Zustand. Die Fahrbahn wird bei der Filterung modelliert (siehe Abb. 6.6). Der Filterprozess beginnt auf der Fahrbahnfläche unter dem Fahrzeug. Diese ist frei von größeren Hindernissen, so dass sich der Prozess stabil einschwingen kann bis die ersten signifikanten Störstellen auftreten. Die Detektion statistischer Ausreißer erlaubt die qualitative Unterscheidung zwischen Punkten auf der Fahrbahnfläche und Punkten außerhalb bzw. Störungen. Die jeweils ersten abgelehnten Messungen sind in Abb. 6.5 vergrößert eingezeichnet. Sie markieren den Übergang von der Fahrbahnfläche zum Bordstein. Abbildung 6.6 zeigt die zu Abb. 6.5 gehörigen Zustandsgrößen sowie die Testgröße für jeden Messpunkt. Die Zustandsgrößen Abstand und Querneigung lassen sich aus

den gemessenen Punkten der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe der Kalman-Filterung stabil ermitteln. Mit Hilfe der Beobachtungsresiduen der Streckenbeobachtung zu jeder Epoche wird beurteilt, ob eine Messung zur Fahrbahnfläche gehören kann oder nicht. Abbildung 6.7 stellt

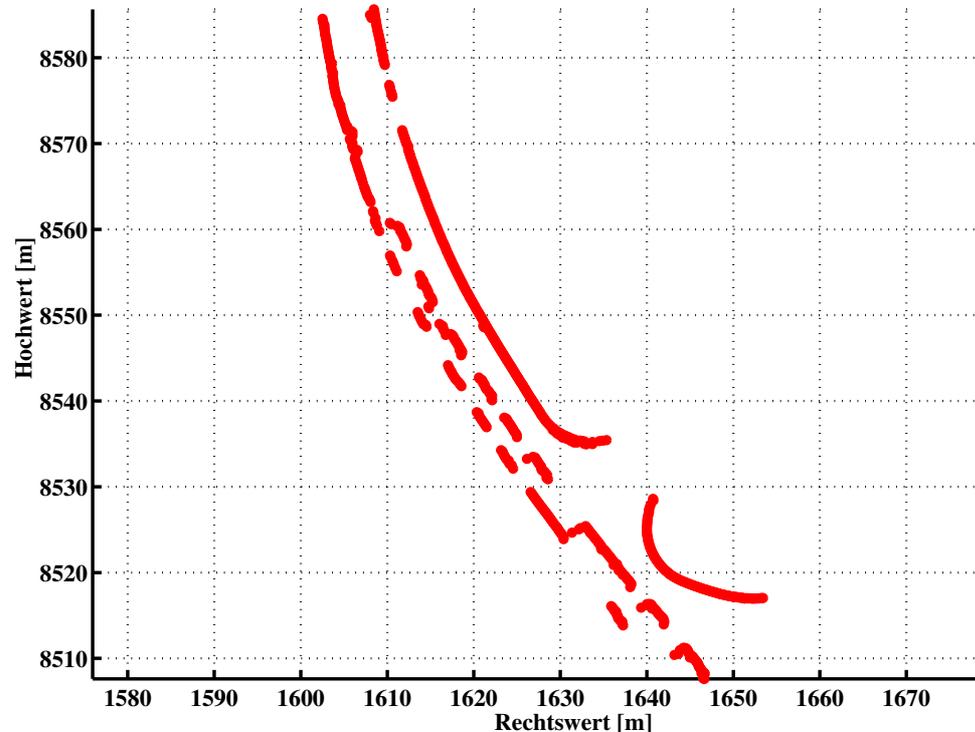


Abbildung 6.7.: Ergebnis der Filterung der Querprofile für das Beispiel aus Abb. 6.2. Dargestellt sind die jeweils ersten Punkte mit besonders hohen Residuen aus jedem Profil.

das Ergebnis der geometrischen Analyse des Straßenabschnittes in Abb. 6.2 dar. Zur besseren Übersicht wurden nur die jeweils ersten detektierten Ausreißer aus jedem Profil eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die Übergänge von der modellierten Fahrbahnfläche zum Fahrbahnrand mit Hilfe der Beobachtungsresiduen zuverlässig festgelegt werden können. Außerdem werden Störungen auf der Fahrbahnfläche, wie z.B. Messungen zu Fahrzeugen, sicher detektiert. Übrig bleibt die Menge der Messpunkte auf der Fahrbahnoberfläche, die als Grundlage für die Modellierung der Fahrbahn in Kapitel 8 dient. Die extrahierten Punkte, die den Übergang zwischen der Fahrbahn und dem Randbereich der Straße markieren, eignen sich zur automatischen Bestimmung des Fahrbahnrandes (siehe Kap. 6.3).

6.2. Analyse der Remissionsprofile

Die Laserscanner LMS 200 liefern neben den Entfernungsmessungen auch die Intensitäten des Rückstrahlsignals. Die nachfolgende Transformation in Grauwerte ermöglicht die Darstellung der Laserscannermessungen als Grauwertbild der Straßenoberfläche (siehe Abb. 6.8). Unterschiede in der Helligkeit der Asphaltdecke und die Fahrbahnmarkierungen lassen sich klar erkennen. Aus diesem Grund werden die Laserscanner zur Detektion von Fahrbahnmarkierungen eingesetzt (siehe Abb. 6.10). Die korrekte Interpretation der Intensität ist von der

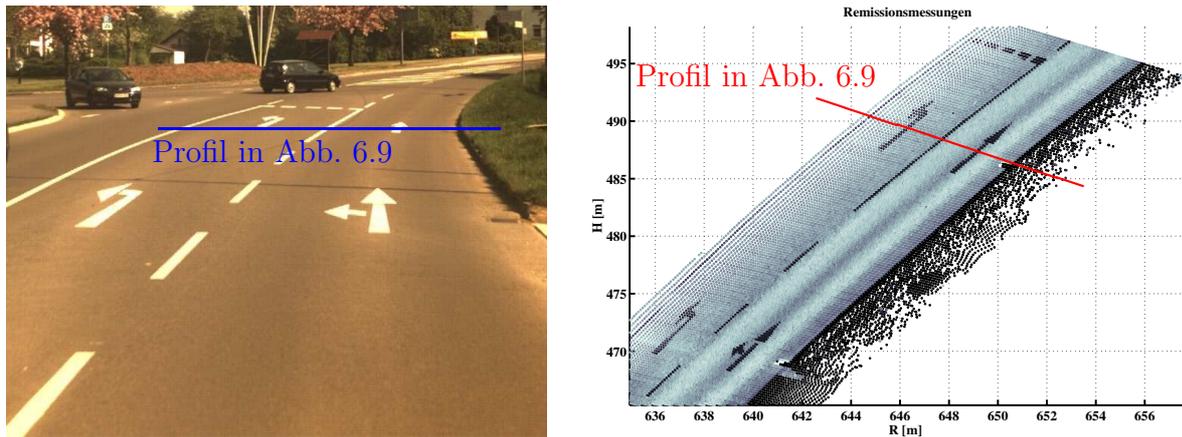


Abbildung 6.8.: Beispiel für Fahrbahnmarkierungen und die zugehörigen Remissionsmessungen. Die aus den Remissionen abgeleiteten Grauwerte sind invers dargestellt, so dass weiße Bereiche dunkel erscheinen.

zuverlässigen Kalibrierung der Remissionswerte abhängig. Die Parameter für das Intensitätsverhalten sind abhängig von Entfernung und Auftreffwinkel für jeden Scanner detailliert bekannt (siehe Kap. 5.1.7). Ein Beispiel für die Extraktion von Markierungen aus einem Remissionsprofil zeigt Abbildung 6.9. Die extrahierten Punkte für den Straßenabschnitt enthält Abb. 6.10. Die Analyse der kalibrierten Remissionsmessungen basiert auf der Bildung eines gleitenden Durchschnittes. Aus der Mitte des Remissionsprofils heraus werden die Intensitäten über ein Fenster von jeweils 15 Messwerten schrittweise nach außen gemittelt. Besonders hohe Messwerte werden mit Hilfe eines statistischen Tests gegenüber dem Durchschnittswert als Ausreißer identifiziert. Die Erkennung der Fahrbahnmarkierungen anhand der Intensitätsinformation der Scannermessungen hat sich bisher als ausgesprochen robust erwiesen. Störungen wurden nur bei besonders hoher Intensität der Sonneneinstrahlung beobachtet, deren Infrarotanteil die absoluten Werte der gemessenen Intensität verändern kann.

6.3. Bildung linienhafter Objekte

Als Ergebnis der geometrischen Analyse der Scanprofile (siehe Kap. 6.1) und der Helligkeitsanalyse der Intensitätsmessungen (siehe Kap. 6.2) erhält man zwei Arten von extrahierten Messpunkten. Zum einen handelt es sich um signifikante geometrische Unstetigkeiten, die insbesondere den Straßenrand zeigen, und zum anderen ergeben sich Punkte mit relativ hoher reflektierter Intensität, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Fahrbahnmarkierungen darstellen. Fahrbahnrand und Fahrbahnmarkierungen sind zwei wichtige linienhafte Objekte im Straßenraum. Für die weitere Verwendung der detektierten Informationen werden die extrahierten Punkte mit Hilfe eines speziellen, robusten Kalman-Filters zu Objekten zusammengefasst (siehe Kap. 6.3.1). Die Filterung folgt dabei direkt auf die Punktextraktion. Der Ablauf der Berechnungen zur Bestimmung der Fahrbahnmarkierungen ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Vorhandene Markierungen werden als Bestand verwaltet und in das neue Scanprofil prädiiziert (vergleiche auch Abb. 6.12). Zu jeder Epoche lassen sich die extrahierten hellen Punkte zu Beobachtungen zusammenfassen und den bestehenden Linien zuordnen. Ein Kalman-Filter dient zur Berechnung der aktuell beobachteten Linien. Die Ergebnisse der Filterung sowie neu gebildete Markierungen werden im Anschluss einem Qualitätsmanagement unterworfen.

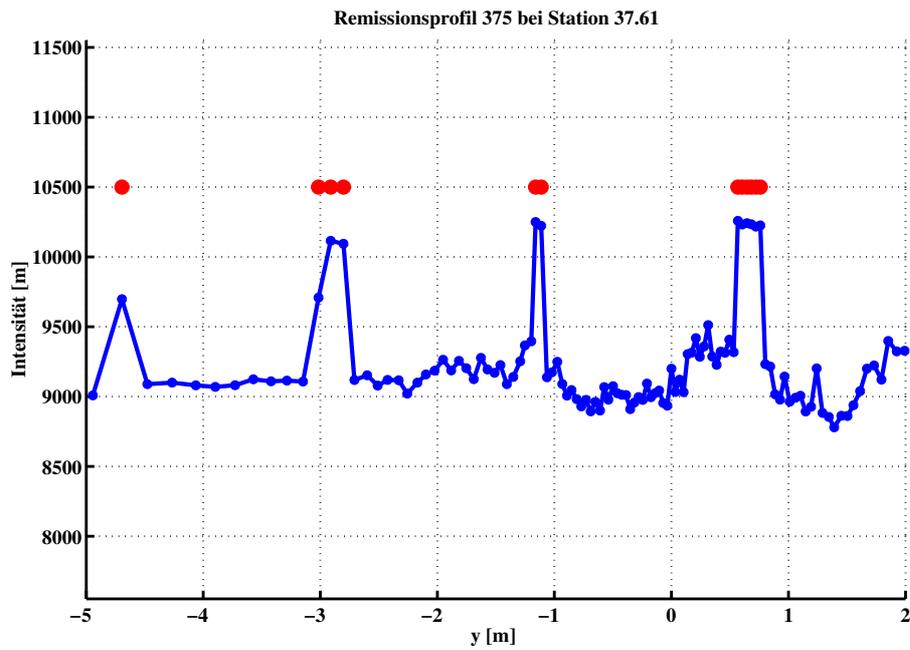


Abbildung 6.9.: Ergebnis der Filterung der Querprofile für das Beispiel aus Abb. 6.8. Dargestellt sind das Profil aus kalibrierten Remissionsmessungen (blau) und die extrahierten Punkte im Profil (rot)

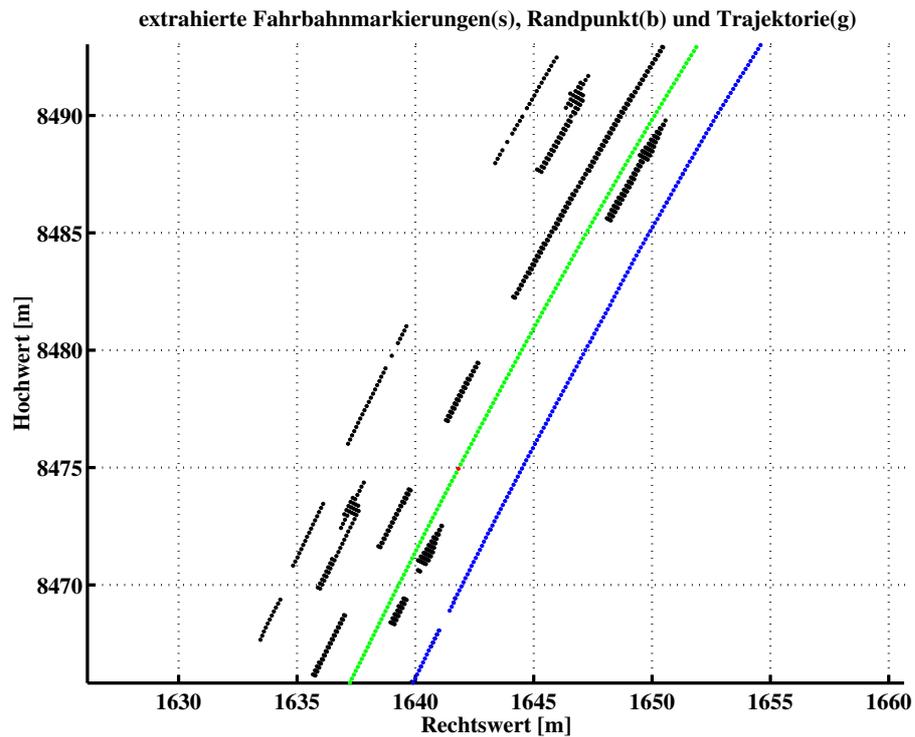


Abbildung 6.10.: Beispiel für die extrahierten Punkte zu den weißen Fahrbahnmarkierungen (schwarz). Die Trajektorie ist in grün eingezeichnet. Die blauen Punkte sind das Ergebnis der Extraktion der Fahrbahnkante (vgl. Kap. 6.1).

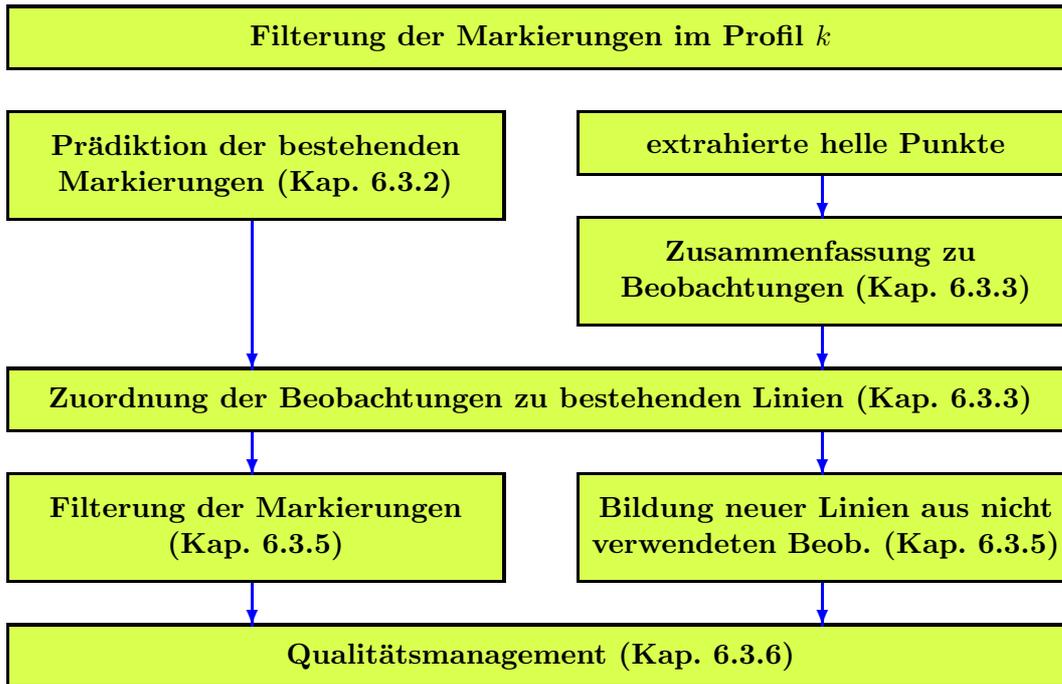


Abbildung 6.11.: Ablauf der Kalman-Filterung zur Bildung linienhafter Objekte am Beispiel der Fahrbahnmarkierungen.

6.3.1. Filtermodell

Das Kalman-Filter zur Linienverfolgung basiert auf der geometrischen Annahme, dass der Fahrbahnrand und der überwiegende Teil der Fahrbahnmarkierungen unmittelbar dem Straßenverlauf folgen. Linien, die quer zur Straßenachse verlaufen, können mit diesem Filter nicht zu Objekten zusammengefasst werden. Das Filter lässt sich unmittelbar im Anschluss an die Punktextraktion im Profil zur Epoche k ausführen. Jede Linie in Fahrbahnlängsrichtung lässt sich in allgemeiner Form durch die Zustandsgrößen (6.5) beschreiben. Die Änderung des Richtungswinkels $\Delta\theta$ dient der Modellbildung für Linien entlang von Kurven. Die Längsneigung der Straße wird als Zustandsgröße nicht berücksichtigt, da der Linienverlauf aufgrund der dichten Folge von Beobachtungen auch ohne Steigungsparameter stabil bestimmt werden kann.

$$\mathbf{x}_{L,k} = \begin{pmatrix} N_k \\ R_k \\ h_k \\ b_k \\ \theta_k \\ \Delta\theta_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Nordwert [m]} \\ \text{Rechtswert [m]} \\ \text{Höhe [m]} \\ \text{Linienbreite [m]} \\ \text{Richtungswinkel der Linie [°]} \\ \text{Änderung des Richtungswinkels [°/m]} \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Der Unterschied in der Modellierung der Objekte Fahrbahnrand und Fahrbahnmarkierung besteht darin, dass für Fahrbahnränder keine Breite geschätzt wird. In den folgenden Abschnitten wird das Modell für die Fahrbahnmarkierungen dargestellt.

6.3.2. Prädiktion

Die vorhandenen Linien werden vom Profil $k-1$ in das Profil k nach Formel (A.1) prädiziert. Für die Fortschreibung der einzelnen Zustandsgrößen gilt Formel (6.6).

$$\begin{aligned}
 N_k &= N_{k-1} + \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta_{k-1}\Delta s)\Delta s \\
 R_k &= R_{k-1} + \sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta_{k-1}\Delta s)\Delta s \\
 h_k &= h_{k-1} \\
 b_k &= b_{k-1} \\
 \theta_k &= \theta_{k-1} + \Delta\theta_{k-1}\Delta s \\
 \Delta\theta_k &= \Delta\theta_{k-1}
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

Im Gegensatz zum Filter in Kapitel 6.1 lässt sich das Filterinkrement Δs für die Prädiktion nicht in einfacher Weise festlegen. Die Ursachen liegen darin, dass der Scanabstand $\Delta s_{k-1,k}$ sich abhängig von der Geschwindigkeit verändert und zudem die Lage der Scanprofile zueinander in Kurven abhängig von der Krümmung ist (siehe Abb. 6.12). Jede vorhandene Linie

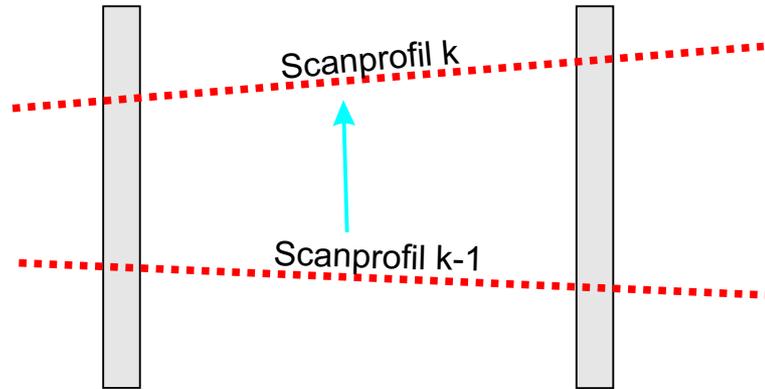


Abbildung 6.12.: Schematische Darstellung zum Prinzip der Prädiktion: Eine Linie wird so lange prädiziert, bis diese das aktuelle Scanprofil schneidet.

wird aus diesem Grund mit Hilfe eines einheitlichen, festen Filterinkrements Δs so lange prädiziert, bis die prädizierte Linie das aktuelle Scanprofil schneidet. Das Inkrement Δs wird so gewählt, dass die Länge im Verhältnis zur Linie vernachlässigbar klein ist, z.B. 0,005 m. Unter dieser Voraussetzung kann das Kalman-Filter in geometrischer Diskretisierung angewendet werden. Für die Transitionsmatrix \mathbf{T}_{k-1} gilt dabei (6.7).

$$\mathbf{T}_{k-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta_{k-1}\Delta s)\Delta s & -\sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta_{k-1}\Delta s)\Delta s^2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta_{k-1}\Delta s)\Delta s & \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta_{k-1}\Delta s)\Delta s^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{6.7}$$

Die prädizierte Varianz $\bar{\mathbf{S}}_k$ ergibt sich aus (A.2) unter Verwendung der Systemrauschmatrix $\mathbf{B} = \mathbf{I}$. Die Varianz-Kovarianz-Matrix des Systemrauschens \mathbf{Q}_{k-1} wird auf der Basis umfangreicher Testreihen definiert.

6.3.3. Beobachtungen

Auf einer Fahrbahnmarkierung liegen in der Regel mehrere Messpunkte des Scanners. Wenn diese im Zusammenhang extrahiert worden sind, lassen sie sich nach (6.8) zusammenfassen.

Dabei wird der Mittelwert vom ersten Punkt j bis zum letzten detektierten Punkt $j + n$ gebildet, wobei $n + 1$ die Anzahl der zusammenhängenden Punkte ist. Der Schwerpunkt der gemessenen Punkte stellt die eigentliche Beobachtung dar. Aus der Breite des Abschnitts, der von den Punkten eingenommen wird, lässt sich die Linienbreite ableiten. Dabei wird der Abstand $\Delta s_{m, m+1}$ der Scanpunkte aufsummiert zuzüglich des halben Abstandes zu den nächsten Punkten $j - 1$ und $n + 1$ (siehe auch Abb. 6.14). Jede Beobachtung einer Markierung \mathbf{l}_i nach Formel (6.8) umfasst vier Elemente.

$$\mathbf{l}_i = \begin{pmatrix} N_i \\ R_i \\ h_i \\ b_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{m=j}^{j+n} N_m \\ \sum_{m=j}^{j+n} R_m \\ \sum_{m=j}^{j+n} h_m \\ \sum_{m=j}^{j+n-1} \Delta s_{m, m+1} + \frac{\Delta s_{j-1, j}}{2} + \frac{\Delta s_{n, n+1}}{2} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

Das funktionale Modell besteht aus den prädizierten Zustandsgrößen:

$$\bar{\mathbf{l}}_i = (\bar{N}_i \quad \bar{R}_i \quad \bar{h}_i \quad \bar{b}_i)^t. \quad (6.9)$$

Die linearisierte Beobachtungsmatrix \mathbf{A}_i lautet:

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

Die gleichen Zusammenhänge lassen sich für Beobachtungen der Fahrbahnränder formulieren. Allerdings werden die Ergebnisse der geometrischen Analyse als Einzelpunkte ohne Linienbreite verarbeitet (siehe Abb. 6.7). Aus den einzelnen Beobachtungen für die verschiedenen Linien werden der Beobachtungsvektor $\mathbf{l}_k = (\mathbf{l}_1 \dots \mathbf{l}_i \dots \mathbf{l}_p)^t$ sowie die linearisierte Matrix \mathbf{A}_k zusammengesetzt. p ist dabei die Gesamtzahl der beobachteten Linien. Die Varianz der Beobachtungen \mathbf{R}_k wird anhand des Varianzenfortpflanzungsgesetzes aus der Varianz der Einzelpunkte abgeleitet, die in die Beobachtungen eingehen. Nach Formel (A.4) ergibt sich die Innovation $\delta \mathbf{l}_k$ durch Vergleich der prädizierten mit der tatsächlichen Beobachtung. Die Beobachtungsresiduen $\delta \mathbf{l}_k$ werden vor der eigentlichen Filterung zur Zuordnung der Beobachtungen zu den bereits vorhandenen Linien eingesetzt. Der Rechenschritt entspricht der Suche nach groben Beobachtungsfehlern. Jede Beobachtung in der Nähe einer bereits vorhandenen Linie wird statistisch im Vergleich mit dem Ergebnis der Prädiktion getestet. Der Test wird für die Linienhöhe und -breite nach (A.11) durchgeführt. Für die Lagekoordinate der Linienmitte kommt ein Test nach (A.19) in Frage. Wenn die geprüfte Beobachtung statistisch akzeptiert wird, geht diese als Beobachtung zu der entsprechenden Linie in die Filterung ein. Aus allen übrigen Beobachtungen, bei denen eine Zuordnung nicht möglich ist, werden neue Linien definiert. Die Koordinaten sowie die Breite der Beobachtung werden dabei direkt als Zustandsgrößen für die neue Linie übernommen. Als Anfangsrichtung $\theta_{k,0}$ einer neuen Linie zur Epoche k wird nach (6.11) der Richtungswinkel des Fahrzeuges α_k verwendet.

$$\theta_{k,0} = \alpha_k + \beta_k \quad (6.11)$$

Die erforderliche Korrektur um den Schwimmwinkel β_k ergibt sich aus (6.12). Die Richtungsänderung $\Delta \theta_k$ lässt sich am Beginn einer Linie nicht festlegen und wird mit dem Wert 0 initialisiert.

6.3.4. Berücksichtigung des Schwimmwinkels

Der Schwimmwinkel ist definiert als der Winkel zwischen der fahrzeugfesten Längsachse und der momentanen Bewegungsrichtung des Fahrzeuges (siehe Abbildung 6.13). Das Inertialsystem zur Bestimmung der äußeren Orientierung ist fahrzeugfest montiert und liefert damit lediglich den Richtungswinkel der Fahrzeugachse. Bei Kurvenfahrten weichen die tatsächliche Bewegungsrichtung und die Richtung der Längsachse voneinander ab. Für langsame

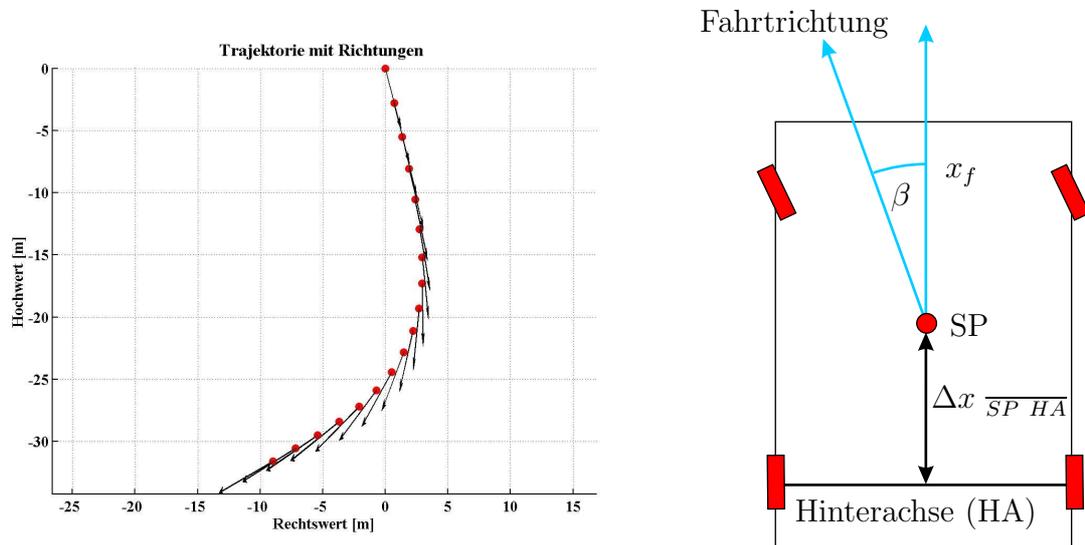


Abbildung 6.13.: Darstellung der Abweichung zwischen Bewegungsrichtung und Richtung des Fahrzeuges (links) und schematische Darstellung des Schwimmwinkels bei langsamen Kurvenfahrten (rechts)

Kurvenfahrten gilt (6.12) unter der Voraussetzung, dass schlupffrei rollende Räder und vernachlässigbar kleine Seitenkräfte angenommen werden [Sternberg und Caspary (2002)].

$$\beta = \frac{\omega_z}{v_t} \Delta x_{\overline{SP HA}} \quad (6.12)$$

mit: ω_z Winkelgeschwindigkeit bezogen auf die Fahrzeughochachse
 v_t Geschwindigkeit des Fahrzeuges in Richtung der Fahrzeuglängsachse
 $\Delta x_{\overline{SP HA}}$ Abstand der Hinterachse zum Schwerpunkt des Fahrzeuges

Bei einer Geschwindigkeit von 3m/s, einer Winkelgeschwindigkeit von 30°/s sowie einem Abstand $\Delta x_{\overline{SP HA}} = 2$ m ergibt sich zum Beispiel ein Schwimmwinkel von 20°. Der Abstand der Hinterachse vom Schwerpunkt des Fahrzeuges kann mit Hilfe von Testfahrten auf engen, kurvenreichen Strecken mit bekannten Radien ermittelt werden. Für alle Anwendungen, bei denen die tatsächliche Fahrtrichtung des Fahrzeuges als Beobachtung Verwendung findet, ist die Berücksichtigung des Schwimmwinkels als Korrektur erforderlich.

6.3.5. Filterung und Ergebnisse

Die Filterung für die aktuell beobachteten Markierungen und Fahrbahnränder erfolgt nach den Zusammenhängen (A.4) bis (A.7). Die Abbildungen 6.14, 6.15 und 6.16 zeigen ausschnittsweise Beispiele für die Ergebnisse der Objektbildung entlang eines kurzen Autobahnabschnittes mit einer Abbiegespur. Befahren wurde dabei der Hauptfahrstreifen einer Autobahn in Richtung Nordosten. Die Auswertung erfolgte im vorliegenden Beispiel für den linken

Scanner. Die Trajektorie des Scanners ist in Abbildung 6.14 als grüne Linie dargestellt. Aus Abbildung 6.14 lässt sich ablesen, dass die Markierungen des befahrenen Fahrstreifens sicher erkannt und in ihrem geometrischen Verlauf korrekt modelliert werden.

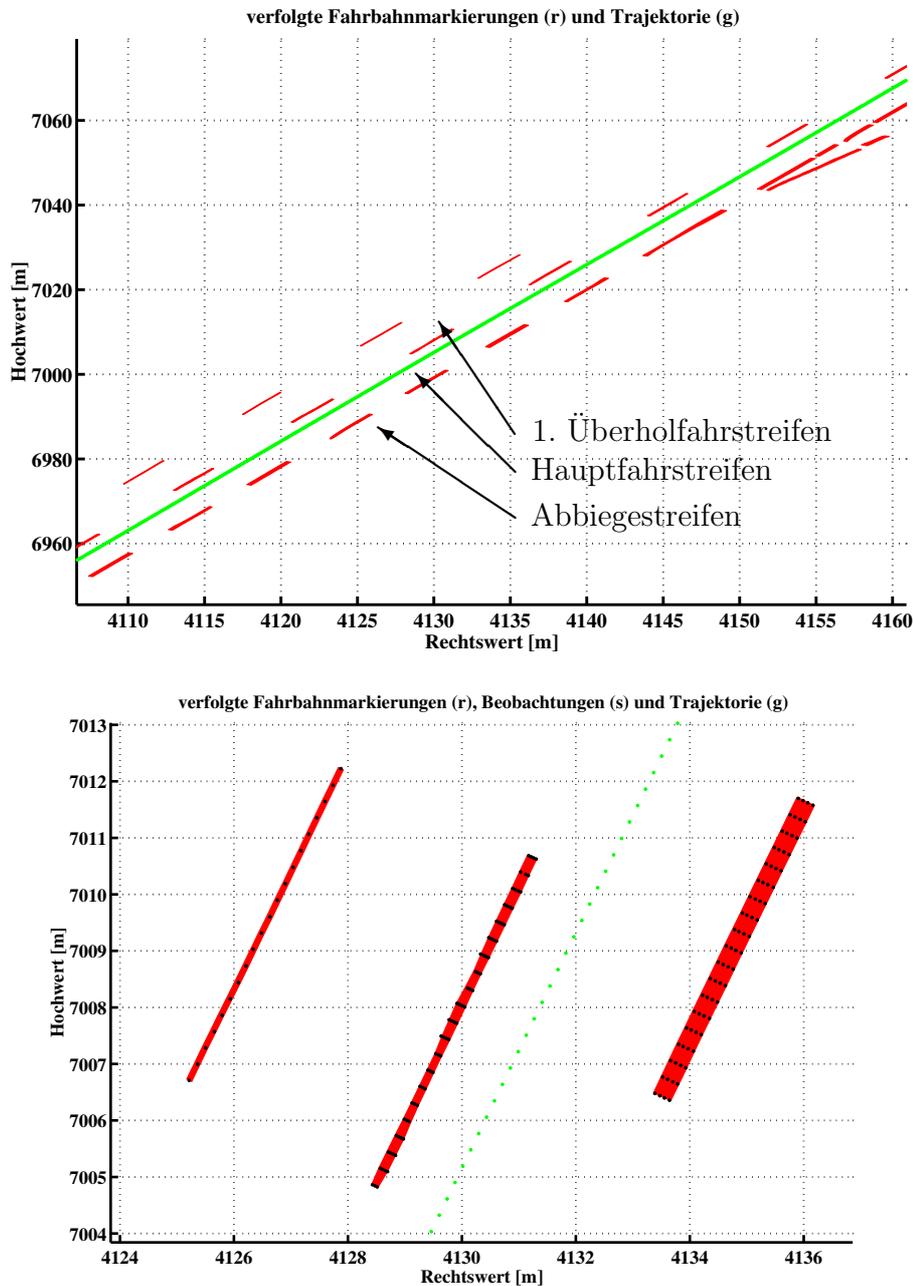


Abbildung 6.14.: Beispiel für verfolgte Markierungen auf einer Autobahn mit Abbiegespur. Die untere Abbildung zeigt einen Ausschnitt mit gebildeten Markierungen und den zugrundeliegenden extrahierten Punkten aus den Laserscanner-Messungen.

Aus den Ergebnissen gehen auch charakteristische Unterschiede hervor. Beispielsweise stellen sich die Markierungen entlang der Abbiegespur rechts vom Fahrzeug deutlich breiter dar als die Fahrstreifenmarkierungen links vom Fahrzeug, die den Übergang zum ersten Überholfahrstreifen darstellen. Die Markierungen zu den benachbarten Fahrstreifen sind teilweise

ebenfalls noch zu identifizieren, während weiter rechts keine Ergebnisse mehr erzielt werden. Die Ursache liegt darin, dass für den linken Scanner die horizontale Entfernung zu den linken Markierungen des ersten Überholfahrstreifens ca. 5 m beträgt, so dass auch diese teilweise detektiert werden können. Die rechte Außenmarkierung der Abbiegespur aber liegt in einer Entfernung von mindestens 7 m zum Scanner und damit außerhalb des zuverlässigen Messbereichs. Der detaillierte Ausschnitt in Abbildung 6.14 unten zeigt die extrahierten Messpunkte des Scanners als schwarze Punkte. Diese werden nach (6.8) zu Beobachtungen zusammengefasst und bilden die Grundlage für die rot dargestellten Markierungen, die das Ergebnis der Filterung darstellen. Die Zuverlässigkeit, mit der die Linienbreite beobachtet werden kann, hängt direkt von der Dichte der Punkte im Profil und damit vom Abstand des Scanners zur Markierung ab. Besonders deutlich wird dies durch den Vergleich zwischen der linken Fahrstreifenmarkierung des ersten Überholfahrstreifens, die nur jeweils einen extrahierten Punkt pro Scan aufweist, und der rechten Fahrstreifenmarkierung sowie der breiten Markierung entlang des Abbiegestreifens, die aus jeweils 4 detektierten hellen Punkten aufgebaut werden können. Die Markierungen für den Überholfahrstreifen auf einer Autobahn sind gemäß der Richtlinie für die Markierung von Straßen 0,15 m breit [FGSV (1993)]. Für die Fahrstreifenmarkierungen in größerer Entfernung zum Scanner wird aus den Beobachtungen eine Breite von 0,10 m geschätzt. Bei Linien in unmittelbarer Nähe zum Fahrzeug liegen die ermittelten Breiten bei 0,12 m. Die Markierungen entlang der Ausfahrt sind ca. 0,31 m breit, wobei ein Maß von 0,30 m vorgeschrieben ist. An den Ergebnissen zeigt sich, dass die Scanner vom Typ LMS 200 zwar die korrekte Bestimmung des Markierungsverlaufs, nicht aber eine vollständig zuverlässige Schätzung der Breite ermöglichen. Aufgrund der geringen Punktauflösung im Querprofil wird die Markierungsbreite tendenziell zu schmal bestimmt. Die Schätzung der Linienbreite sollte bei Bedarf durch photogrammetrische Messungen kontrolliert werden. Allerdings sind die Breiten abhängig von der Klassifizierung der Straße standardisiert, so dass anhand der Laserscanner-Ergebnisse alternativ auch eine Zuweisung des Sollmaßes in Frage kommt. Abbildung 6.15 enthält den geschätzten Höhenverlauf der Markierungen für den Ausschnitt der Autobahn in Abbildung 6.14. An den unterschiedlichen Höhen der Markierungen lässt sich die Querneigung der Fahrbahn zuverlässig ablesen. Der Höhenverlauf der Markierungen gibt bereits die tatsächlichen Gegebenheiten der Fahrbahnoberfläche entlang der Fahrbahnmarkierungen wieder (siehe auch Kap. 8). Abbildung 6.16 enthält die Standardabweichungen der Zustandsgrößen für die Markierungen entlang eines übersichtlichen, 50 m langen Abschnittes der Autobahn aus Abbildung 6.14. Die Zustandsgrößen für die dreidimensionale Position der Linien konvergieren bereits nach wenigen Beobachtungen. Insbesondere die Höhe erweist sich aufgrund der Stetigkeit der Fahrbahnfläche als stabile Zustandsgröße (siehe auch Abb. 6.15). Linienbreite, Richtungswinkel und die Änderung des Richtungswinkels der Linie unterliegen einer zufriedenstellenden Konvergenz. Die Standardabweichung der Koordinaten für die Linienmitte hängt im Detail von den geometrischen Gegebenheiten ab. Die Beobachtungen für die Linien werden aus Profilen quer zur Fahrtrichtung extrahiert. Überwiegend quer zu Befahrungsrichtung liegt im vorliegenden Beispiel der Rechtswert. Dieser kann umso genauer geschätzt werden, desto näher die Markierung dem Scanner liegt und desto mehr Messpunkte in die Beobachtungen eingehen. Längs zur Befahrungsrichtung verläuft im vorliegenden Beispiel der Hochwert, der bei allen Markierungen gleichmäßiger konvergiert als der Rechtswert. Bei der Filterung der Linien ist also aus offensichtlichen geometrischen Gründen die Querrichtung besonders zu beachten. Die Zuverlässigkeit der Schätzung in Längsrichtung, also der Linienlänge, hängt allerdings tatsächlich nicht von der ermittelten Standardabweichung, sondern vom Abstand der Laserscannerprofile in Befahrungsrichtung $\Delta s_{k-1,k}$ ab (vergleiche Kap. 4.2.2). Anfangs- und Endpunkt einer Markierung liegen immer zwischen zwei Profilen und können daher nicht beobachtet werden. Die geschätzte Länge einer

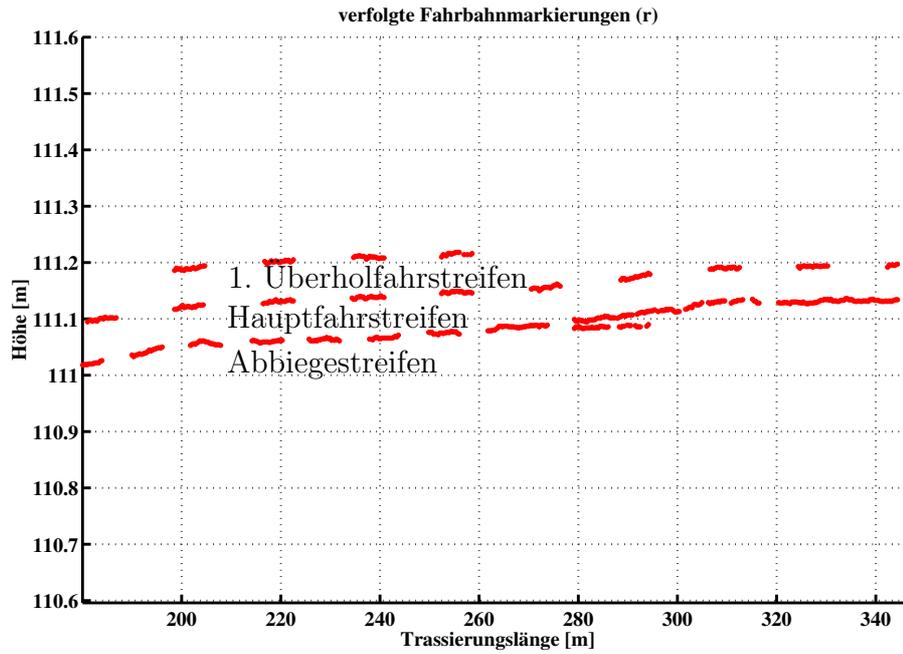


Abbildung 6.15.: Höhenverlauf der Fahrbahnmarkierungen für den Ausschnitt entlang der Autobahn in Abbildung 6.14.

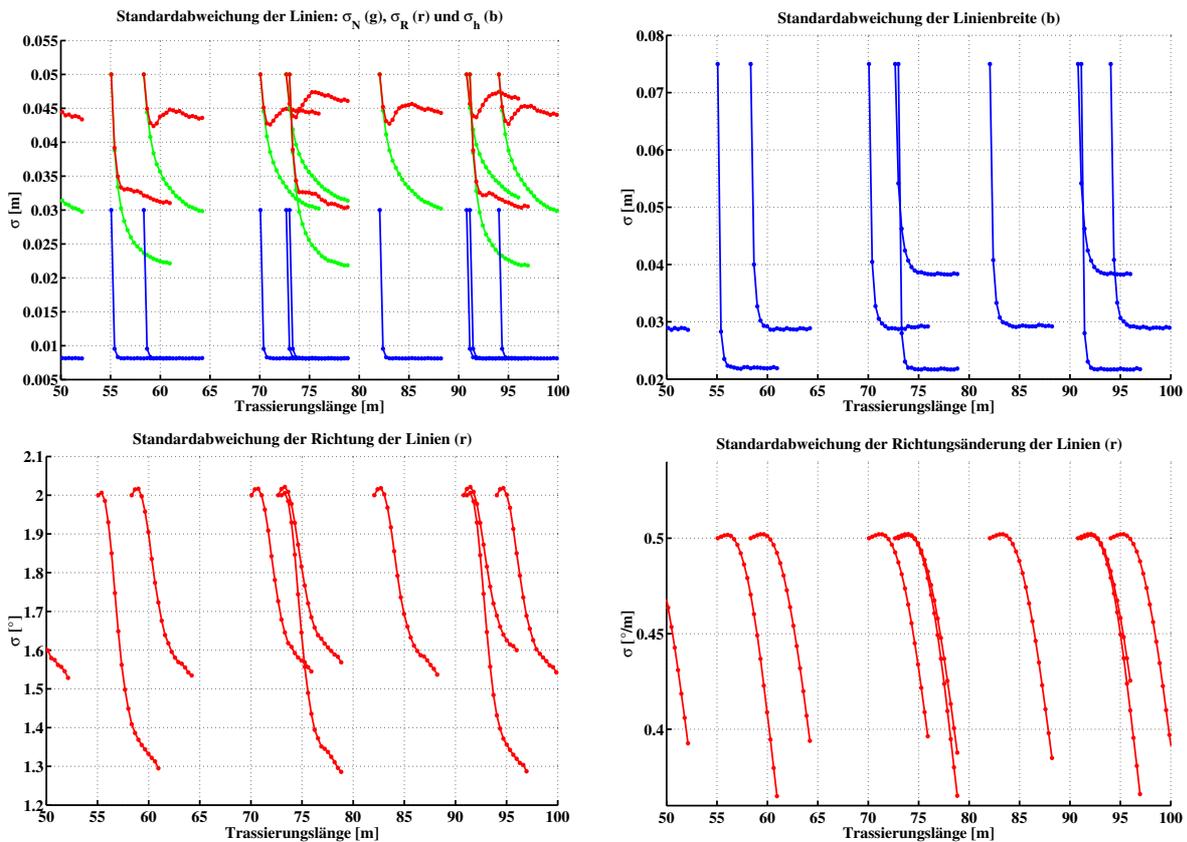


Abbildung 6.16.: Geschätzte Standardabweichungen für die Zustandsgrößen der verschiedenen Markierungen entlang eines Ausschnittes der Autobahnbefahrung in Abb. 6.14 von 50 m Länge.

Linie ist daher meist zu kurz. Auch hier ist bei Bedarf für höhere Genauigkeiten eine photogrammetrische Ergänzung sinnvoll. Ebenso wie die Breite ist die Linienlänge abhängig von der Klassifizierung der Straße standardisiert [FGSV (1993)], so dass anhand der Laserscanner-Ergebnisse alternativ wiederum eine Zuweisung des Sollmaßes anhand der vorgeschriebenen Festlegungen in Frage kommt.

6.3.6. Qualitätsmanagement

Die resultierenden Linien stellen entweder die Kanten der asphaltierten Fläche (siehe Abb. 6.7) oder Fahrbahnmarkierungen (siehe Abb. 6.14) dar. Das in den vorangegangenen Kapiteln behandelte Verfahren beschreibt das automatisierte Vorgehen zur Bildung linienhafter Objekte auf der Fahrbahnoberfläche. Aufgrund der Vielfalt der Strukturen, die in der Praxis im Straßenraum angetroffen werden, sind bereits bei der Berechnung umfangreiche Maßnahmen zur Qualitätssicherung erforderlich. Mögliche Ursachen für fehlerhaft gebildete Fahrbahnmarkierungen sind:

- helle Stellen auf der Fahrbahnoberfläche, z.B. Ablagerungen in der Fahrstreifenmitte oder helles Material in Längsrichtung der Fahrbahn, z.B. Sand oder Laub
- schlechte Qualität der Fahrbahnmarkierungen, insbesondere auf hellen Betonfahrbahnen
- komplexe Markierungen quer oder teilweise quer zur Fahrtrichtung, deren Messpunkte die stabile Schätzung der Objekte in Längsrichtung stören können, z.B. Fußgängerüberwege oder Sperrflächen

Mögliche Ursachen für fehlerhaft gebildete, geometrische Fahrbahnrande sind:

- Geometrische Kanten in Längsrichtung der Fahrbahn, z.B. Sand, Gras oder Laub
- Schlechte Qualität der Fahrbahnoberfläche, z.B. Fräskanten oder besonders tiefe Spurrinnen ab ca. 2 cm Tiefe

Das Qualitätsmanagement für die Linien ist häufig projektspezifisch, da die Umgebungsbedingungen entlang einer Landes- oder Bundesstraße andere Parameter erfordern als die Objektbildung entlang einer Autobahn. Für das Qualitätsmanagement kommen folgende Maßnahmen zum Einsatz:

- Linien, die für eine bestimmte Strecke, z.B. 1 m, oder über mehrere Epochen nicht zu beobachten sind, werden in der zuletzt beobachteten Epoche beendet.
- Linien, bei denen die Standardabweichung der Zustandsgrößen einen divergenten Verlauf der Schätzung über mehrere Epochen anzeigt, werden beendet.
- Linien unterhalb einer definierten minimalen Gesamtlänge, z.B. 2 m, werden gelöscht.
- Linien, die gemessen an der Änderung des Richtungswinkels $\Delta\theta_k$ eine oder mehrere un stetige Richtungsänderungen aufweisen, werden gelöscht.
- Linien, die sich unter Einbeziehung der Linienbreite überlappen, werden zusammengefasst.

Die automatisierte Merkmalsextraktion ist entlang aller markierten Straßen möglich. Die resultierenden Kanten der Fahrbahnfläche und die Fahrbahnmarkierungen sind die Grundlage für eine Reihe von weiteren Auswertungen. Insbesondere werden die gebildeten linienhaften Objekte für die Verknüpfung unabhängiger Befahrungen eingesetzt (siehe Kap. 7). Andere Anwendungen sind die Verwendung bei der Bestimmung von Fahrbahnachsen (siehe Kap. 8.2.2) oder die Bildung von Objekten für die SIB oder Fahrerassistenzsysteme (siehe Kap. 7.8).

7. Homogenisierung unabhängiger Befahrungen und Netzbildung

Bei praktischen Messprojekten werden Straßenabschnitte in der Regel mehrfach befahren. Die Datenakquisition erfolgt mindestens im Hin- und Rückweg. Bei manchen Projekten wird aber auch jede einzelne Fahrspur erfasst. Bei der Vermessung von Verkehrswegen für die Straßeninformationsbank zum Beispiel sind mehrfache Befahrungen allein schon wegen der Breite des Aufnahmebereiches geboten (vergleiche Kap. 2.2). Außerdem sind viele Objekte gerade im Randbereich der Straße nur in Fahrtrichtung gut messbar. Ein weiteres Beispiel für mehrfache Messfahrten ist die kinematische Vermessung digitaler Oberflächenmodelle für Autobahnabschnitte (siehe Kap. 8). Dabei wird nacheinander mindestens jede zweite Fahrspur befahren. Die Mehrfachbefahrung bewirkt, dass im ganzen Aufnahmekorridor einheitliche geometrische Messbedingungen für die Auswertung von Photogrammetrie- oder Laserscannerdaten herrschen. Der Nachteil besteht darin, dass die Messunsicherheit der Trajektorien der einzelnen Befahrungen zu systematischen Differenzen zwischen den Messergebnissen der jeweiligen Fahrten führt. Als Voraussetzung für die gleichmäßig präzise Abbildung des gesamten Straßenraumes muss eine Homogenisierung der Befahrungen entlang jedes Straßenabschnittes stattfinden.

7.1. Differenzen zwischen Trajektorien unabhängiger Befahrungen

Die verschiedenen Befahrungen sind statistisch als unabhängige Messungen zu betrachten. Die Spezifikationen des Systems zur Trajektorienbestimmung (siehe Kap. 3.5.2) und die Ergebnisse der Untersuchungen in Kapitel 3.6 zeigen, dass bei durchschnittlichen Messbedingungen eine Standardabweichung von 0,30 m für die horizontalen Lage und für die Höhe zu erwarten ist. Als Standardabweichung der Differenz zwischen zwei unabhängigen Trajektorien-schätzungen, z.B. bei der photogrammetrischen Objektbestimmung aus zwei verschiedenen Fahrten, ergibt sich demnach eine Größenordnung von 0,42 m für die horizontalen Koordinaten. Bei einem Toleranzbereich von 3σ wären damit Unterschiede von ca. 1,2 m in der Lage innerhalb der Toleranz der Trajektorienbestimmung. Entsprechende Aussagen gelten für die Höhe. Verglichen mit den Genauigkeitsforderungen der Anwendungsgebiete übersteigen die zu erwartenden Differenzen die vertretbare Größenordnung bei weitem. Für die SIB wird eine Standardabweichung von 0,05 m für Abmessungen relativ zur Fahrbahnachse gefordert (siehe Tab. 2.1). Bei der Erstellung eines Oberflächenmodells der Fahrbahn ist sogar tachymetrische Messgenauigkeit einzuhalten (siehe Kap. 8). Aus diesem Grund müssen die systematischen Unterschiede zwischen den Trajektorien unabhängiger Befahrungen vor der weiterführenden Auswertung beseitigt werden. Abbildung 7.1 zeigt das Ergebnis der Linienverfolgung aus drei Fahrten entlang des Autobahnabschnittes aus Abb. 6.14. Ergänzt werden die Markierungen durch photogrammetrisch bestimmte Verknüpfungspunkte, z.B. in verschiedenen Fahrten gemessene Eckpunkte der Markierungen. Die dargestellten Objekte zeigen Unterschiede in Längs- und Querrichtung sowie in der Höhe, die direkt auf Differenzen zwischen

den Trajektorien zurückzuführen sind. Deutlich ist zu erkennen, dass Merkmalsextraktion und Linienbildung (siehe Kap. 6.3) aus den einzelnen Fahrten in den Überlappungsbereichen der Laserscanner-Messdaten zu identischen Strukturen führen, die allerdings deutliche Lagedifferenzen aufweisen.

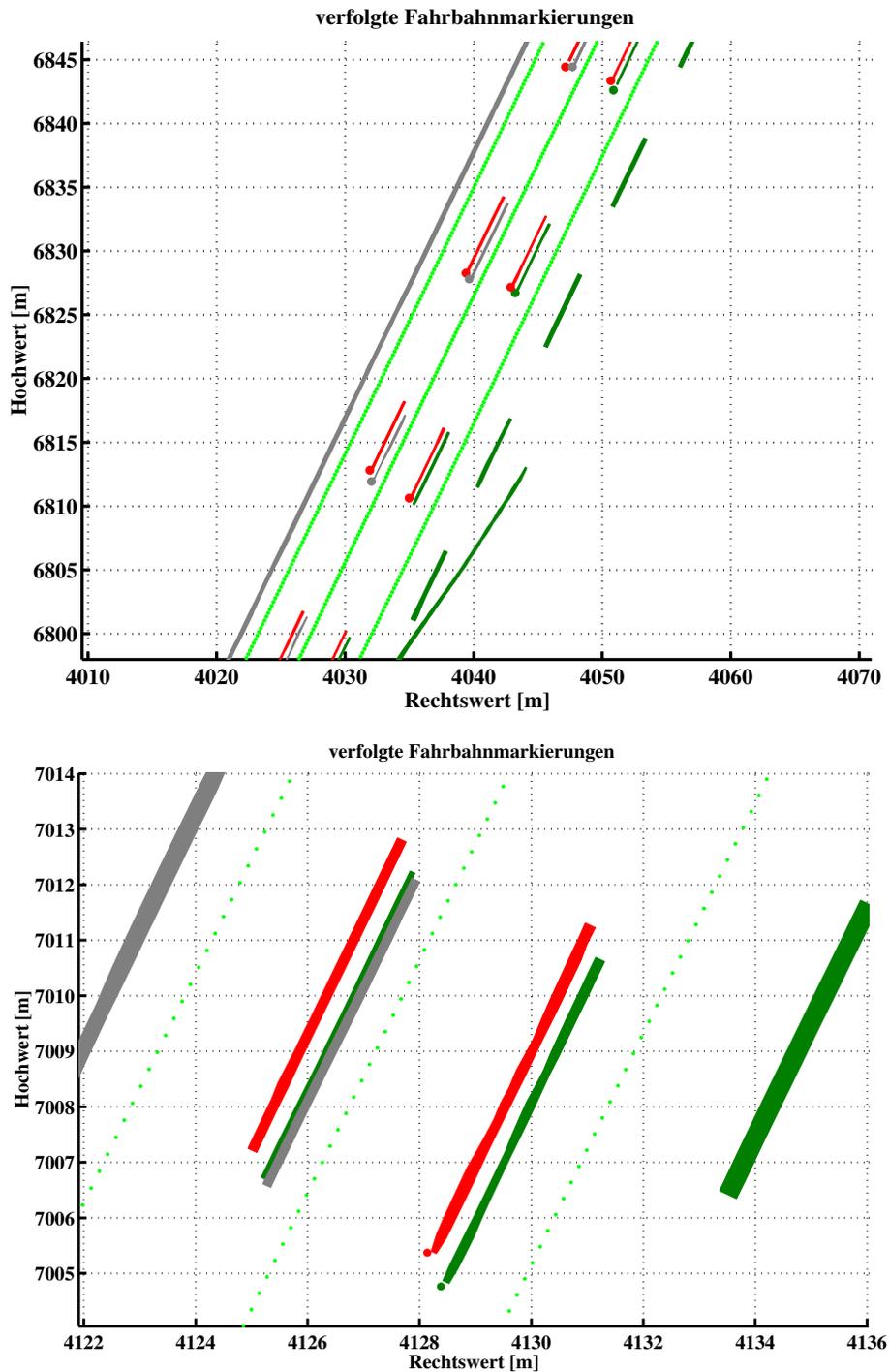


Abbildung 7.1.: Beispiel für verfolgte Markierungen und photogrammetrisch bestimmte Verknüpfungspunkte entlang einer Autobahn mit Abbiegespur (siehe auch Abb. 6.14) für drei verschiedene Befahrungen: Fahrt 1 (grün), Fahrt 2 (rot) und Fahrt 3 (grau).

Die extrahierten Linien, also die Markierungen und auch die Fahrbahnränder, lassen sich

demnach zur Bestimmung der Verschiebungen zwischen den Trajektorien einsetzen. Die photogrammetrisch gemessenen Verknüpfungspunkte dienen vor allem zur Schätzung der Verschiebung in Längsrichtung und zur Qualitätskontrolle.

7.2. Grundprinzip und Ablauf

7.2.1. Verfahren zur Homogenisierung

Das Verfahren zur Homogenisierung der Ergebnisse unabhängiger Befahrungen basiert auf folgenden charakteristischen Eigenschaften der Unterschiede zwischen den einzelnen Trajektorien:

- Die einzelnen Trajektorien werden mit Hilfe der Kalman-Filterung berechnet. Dabei wird sichergestellt, dass die Trajektorien die Kriterien des Qualitätsmanagements nach Kap. 3.6 erfüllen. Die Trajektorien sind frei von Sprüngen und in sich nachbarschaftsgenau. Die Differenzen zwischen den Trajektorien müssen damit ebenfalls stetig sein.
- Die Lagewinkel φ_x , φ_y und α weisen nach Tabelle 3.2 für GPS-Ausfälle unter 3 Minuten Länge eine Genauigkeit von 0.005° für φ_x und φ_y und von 0.02° für α auf. In einer Messentfernung von 20 m entspricht dies einer Abweichung von 0,0017 m für φ_x und φ_y und von 0,007 m für α . Die Fehlerbeträge sind so klein, dass systematische Unterschiede in den Lagewinkeln für die Homogenisierung der Befahrungsergebnisse keine Rolle spielen. Die gesuchte Größenordnung der Differenzen lässt sich aufgrund von Sensormessungen mit den Laserscannern oder der photogrammetrischen Bildauswertung nicht nachweisen.
- Als Differenzen zwischen den Trajektorien treten damit für jede Messepoche systematische Koordinatenverschiebungen ΔR , ΔH und Δh auf. Diese sind auf die Standardabweichung der Trajektorienbestimmung zurückzuführen (vgl. Kap. 3.6).

Zur Ermittlung der systematischen Differenzen zwischen den Trajektorien werden Ergebnisse der Merkmalsextraktion aus Laserscannerdaten und photogrammetrisch bestimmte Verknüpfungspunkte kombiniert. Das Verfahren macht sich deren komplementären Eigenschaften in vollem Umfang zunutze. Ziel der Homogenisierung ist die vollständige Beseitigung der systematischen Unterschiede zwischen den einzelnen Befahrungen, so dass die relative Genauigkeit der gewonnenen Daten im Straßenraum der relativen Messgenauigkeit der Aufnahmesensoren entspricht und unabhängig von der ursprünglichen Befahrung ist. Die absolute Genauigkeit der digitalisierten Straße soll der statistisch besten Schätzung aus den zugrundeliegenden Trajektorien entsprechen.

7.2.2. Ablauf der Homogenisierung

Ein Messprojekt zur kinematischen Erfassung von Verkehrswegen bezieht sich in aller Regel auf ein Straßennetz. Nach den Vorschriften der Straßeninformationsbank sind die einzelnen Straßen in Abschnitte unterteilt, die jeweils von Netzknoten begrenzt werden (siehe Kap. 2.2.2). Es bietet sich an, für die Homogenisierung von Befahrungsergebnissen zusammenhängende Bereiche zu bilden. Im einfachsten Fall werden mehrere Straßenabschnitte des Netzknoten-Stationierungssystems zusammengefasst. Zu jedem Berechnungsabschnitt liegen m Trajektorien vor. Zunächst wird aus allen Befahrungen eine vorläufige Straßenachse berechnet, die den Bezug für sämtliche Beobachtungen bildet. Der folgende Schritt umfasst die

Bestimmung einer Näherungslösung aus allen Beobachtungen zur Sicherstellung der numerischen Stabilität. Die Näherungslösung ermöglicht ein robustes Beobachtungsmanagement für die eigentliche Berechnung der Unterschiede zwischen den Befahrungen. Im letzten Schritt werden die geschätzten Differenzen in Korrekturen für alle Trajektorien umgewandelt und angebracht.

7.3. Bestimmung der Rechenachse

Zur Bestimmung der Differenzen zwischen den einzelnen Befahrungen muss zunächst ein geometrischer Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Befahrungen hergestellt werden. Zu diesem Zweck wird eine Achse für den Streckenabschnitt gebildet. Diese Achse soll den tatsächlichen Straßenverlauf in Lage und Krümmung möglichst genau annähern und im gesamten Berechnungsabschnitt unbedingt stetig sein. Um dies zu erreichen werden die detektierten Markierungen und Fahrbahnränder aus allen Befahrungen als Beobachtungen verwendet.

7.3.1. Das Kalman-Filter zur Bestimmung der Rechenachse

Das Filter zur Verfolgung der Linien ist auf die Erzeugung von Markierungen und Rändern parallel zur Befahrungsrichtung ausgelegt. Aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit zum Straßenverlauf erscheint die Zusammenfassung aller Linien besonders sinnvoll zur Bildung einer Rechenachse. Die Achse beginnt am ersten und endet am letzten Netzknoten des Straßenabschnittes. Da für die Differenzen zwischen den Trajektorien ein stetiger Verlauf vorausgesetzt werden kann, genügt eine geometrische Diskretisierung mit einem Intervall von $\Delta s = 1$ m zur Berechnung. Der Verlauf der Achse lässt sich zu jeder Epoche i mit Hilfe folgender Zustandsgrößen beschreiben.

$$\mathbf{x}_{A,i} = \begin{pmatrix} N_i \\ R_i \\ h_i \\ \tau_i \\ \theta_i \\ \Delta\theta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Nordwert [m]} \\ \text{Rechtswert [m]} \\ \text{Höhe [m]} \\ \text{Steigung [}^\circ\text{]} \\ \text{Richtungswinkel der Achse [}^\circ\text{]} \\ \text{Änderung des Richtungswinkels [}^\circ\text{/m]} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

Die Änderung des Richtungswinkels $\Delta\theta_i$ dient der Modellbildung entlang von Kurven. Beginnend mit dem ersten Netzknoten erfolgt die Prädiktion der Zustandsgrößen von Epoche $i - 1$ zur Epoche i mit Hilfe der Gleichungen (7.2).

$$\begin{aligned} N_i &= N_{i-1} + \cos(\theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}\Delta s)\Delta s \\ R_i &= R_{i-1} + \sin(\theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}\Delta s)\Delta s \\ h_i &= h_{i-1} + \tan(\tau_{i-1})\Delta s \\ \tau_i &= \tau_{i-1} \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}\Delta s \\ \Delta\theta_i &= \Delta\theta_{i-1} \end{aligned} \quad (7.2)$$

Die Transitionsmatrix \mathbf{T}_{i-1} (7.3) ergibt sich als Ableitung aus (7.2).

$$\mathbf{T}_{i-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\sin(\theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}\Delta s)\Delta s & -\sin(\theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}\Delta s)\Delta s^2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cos(\theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}\Delta s)\Delta s & \cos(\theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}\Delta s)\Delta s^2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{\cos(\tau_{i-1})^2}\Delta s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

Die Prädiktion der Zustandsgrößen bei der Kalman-Filterung erfolgt nach Formel (A.1). Für die prädizierte Varianz $\bar{\mathbf{S}}_i$ gilt Formel (A.2), wobei für die Störmatrix mit $\mathbf{B} = \mathbf{I}$ angesetzt wird. Die Varianz-Kovarianz-Matrix des Systemrauschens \mathbf{Q}_{i-1} wird anhand der zu erwartenden Dynamik der Trassierung festgelegt. Die Beobachtungen für die Achse ergeben sich aus den detektierten Markierungen und Fahrbahnrandern. Zur Schätzung der Fahrbahnachse reicht ein einfaches Beobachtungsmodell aus. Für jede Linie im Bereich der aktuellen Filterepoche i wird der Schnittpunkt mit dem fiktiven Querprofil zur aktuellen Achse errechnet. Die entstehende Korrelation der Beobachtungen mit den Zustandsgrößen ist vernachlässigbar. Die eigentliche Beobachtung für die Zustandsgrößen der Achse bildet der Schwerpunkt aller vorhandenen Linien sowie der Mittelwert aus deren Richtungen (vergleiche auch Abb. 7.1). Ergänzend wird nach (7.4) der Schwerpunkt der Trajektorien der Befahrungen sowie der Mittelwert aus deren Richtungswinkeln gebildet. Die Richtungen von Fahrten gegen die Stationierungsrichtung des Netzknoten-Stationierungssystems werden um 180° gedreht. Außerdem sind die Richtungswinkel der Trajektorien nach (6.11) und (6.12) um den Einfluss des Schwimmwinkels zu korrigieren. Wenn n die Anzahl der Linien ist und p als Anzahl der Trajektorien definiert wird, besteht der Beobachtungsvektor $\mathbf{l}_i = (\mathbf{l}_i^L \quad \mathbf{l}_i^T)^t$ nach Formel (7.4) aus einem Subvektor \mathbf{l}_i^L für die Linien und einem Subvektor \mathbf{l}_i^T für die Trajektorien.

$$\begin{aligned} \mathbf{l}_i &= \left(N_i^L \quad R_i^L \quad h_i^L \quad \theta_i^L \quad N_i^T \quad R_i^T \quad h_i^T \quad \alpha_i^T \right)^t \\ &= \left(\sum_{m=1}^n N_m^L \quad \sum_{m=1}^n R_m^L \quad \sum_{m=1}^n h_m^L \quad \sum_{m=1}^n \theta_m^L \quad \sum_{m=1}^p N_m^T \quad \sum_{m=1}^p R_m^T \quad \sum_{m=1}^p h_m^T \quad \sum_{m=1}^p \alpha_m^T \right) \end{aligned} \quad (7.4)$$

Für das funktionale Modell gilt:

$$\bar{\mathbf{l}}_i = \left(\bar{N}_i \quad \bar{R}_i \quad \bar{h}_i \quad \bar{\theta}_i \quad \bar{N}_i \quad \bar{R}_i \quad \bar{h}_i \quad \bar{\theta}_i \right)^t. \quad (7.5)$$

Die Beobachtungsmatrix \mathbf{A}_i lautet:

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7.6)$$

Bei praktischen Projekten hat sich gezeigt, dass Trajektorien teilweise systematisch vom Fahrbahnverlauf abweichen. Ursachen sind das Fahrverhalten in Kurven oder Überholvorgänge auf

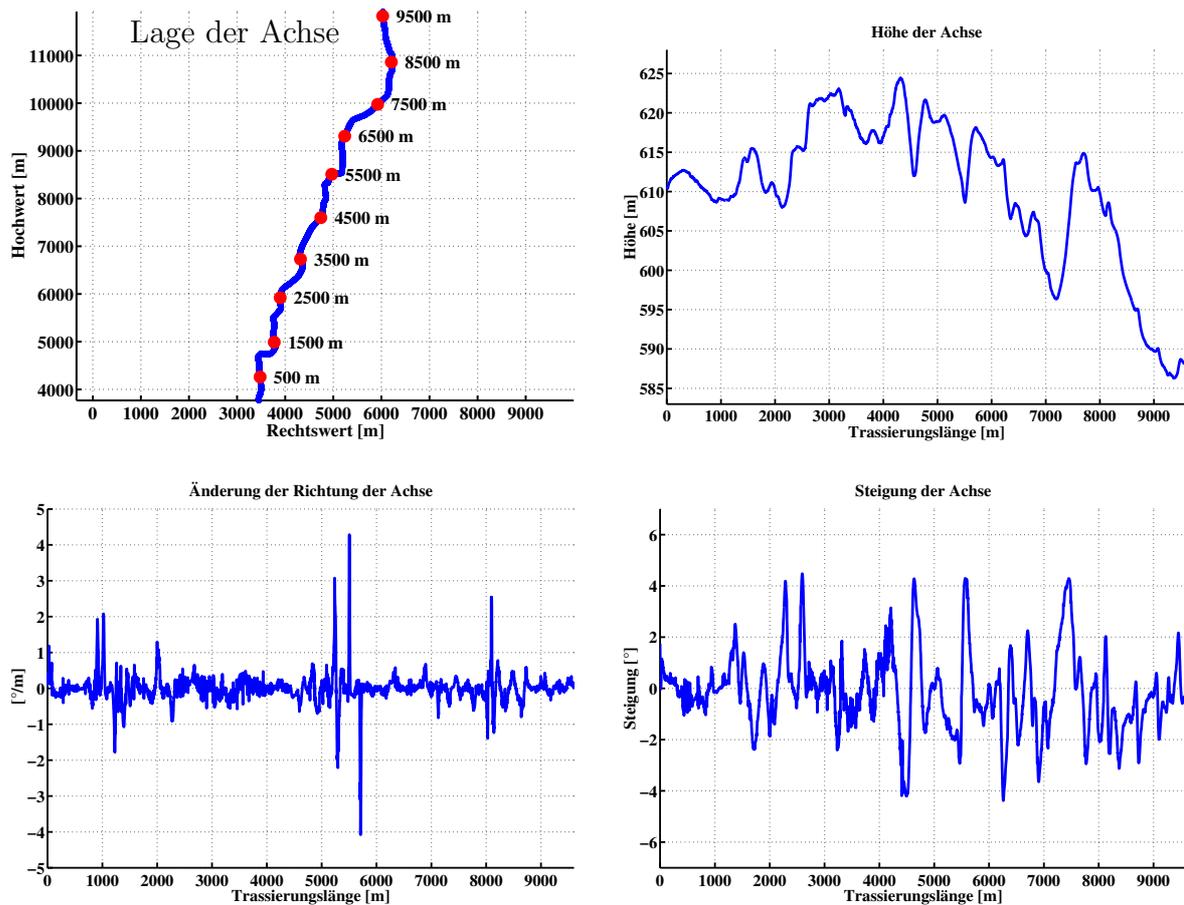


Abbildung 7.2.: Zustandsgrößen für die automatisch erzeugte Rechenachse einer Teilstrecke des Projektes aus Abb. 7.11.

fast 10 km Länge handelt, die enge Kurven und einen Höhenunterschied von ca. 40 m einschließt. Die Kurven führen zu Richtungsänderungen im Bereich von $\pm 4^\circ/\text{m}$. Der bewegte Höhenverlauf weist Steigungen von $\pm 4,5\%$ auf. Die Standardabweichungen der geglätteten Zustandsgrößen zeigen, dass die Filterung zu einer stabilen Schätzung der Fahrbahnachse führt (siehe Tab. 7.1). Bei der Interpretation der absoluten Werte für die Standardabweichungen ist zu beachten, dass diese vor allem die Gewichtung der Filterparameter und der Beobachtungen widerspiegeln, nicht aber einer äußeren Genauigkeit entsprechen. Die Rechenachse dient als geometrische Leitlinie für die weiteren Schritte zur Homogenisierung der Befahrungsergebnisse (siehe Kapitel 7.4 bis 7.6). Die automatisch bestimmten Fahrbahnachsen sind weniger exakt als die Straßenbestandsachsen, die in Kapitel 8.2.1 näher beschrieben werden. Die Rechenachsen entsprechen außerdem nicht zwangsläufig den Definitionen des Straßenwesens. Für vereinfachte Anwendungen mit verringerten Anforderungen kommen die Achsen jedoch in Frage, zum Beispiel in Teilbereichen der Straßeninformationsbank oder für Fahrerassistenzsysteme.

7.4. Zuordnung der Beobachtungen zur Rechenachse

Insgesamt liegen in einem Homogenisierungsabschnitt p Befahrungen vor. Zu jeder Befahrung wurden im Zuge der Merkmalsextraktion n Linien erzeugt, die als Beobachtungen verwendet

werden. Die Qualität der Linien ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und dem Erfolg der Linienverfolgung. Daher weisen die Markierungen und Fahrbahnränder jeweils unterschiedliche Auflösungen auf, so dass der Abstand der Stützpunkte sowie Anfang und Ende der Linien bei jeder Befahrung voneinander abweichen. Um die Differenzen zwischen den Trajektorien über eine Filterung ermitteln zu können, ist zunächst die Erzeugung eines einheitlichen Rasters für die Beobachtungen erforderlich. Die Leitlinie für das Beobachtungsraster bildet die Rechenachse (siehe auch Abb. 7.5).

7.4.1. Abbildung auf die Rechenachse

Im ersten Schritt zur Homogenisierung der Befahrungen werden die Eingangsdaten für die Berechnungen, d.h. also Linien und photogrammetrische Verknüpfungspunkte, der Achse zugeordnet. Dies geschieht für jeden Punkt P durch Berechnung des senkrechten Abstandes zur Achse nach Formel (7.8). Für die Berechnung des kürzesten Abstandes wird jeweils der am nächsten liegende Achspunkt zur Epoche i mit den Zustandsgrößen nach Formel (7.1) verwendet (siehe Abb. 7.3).

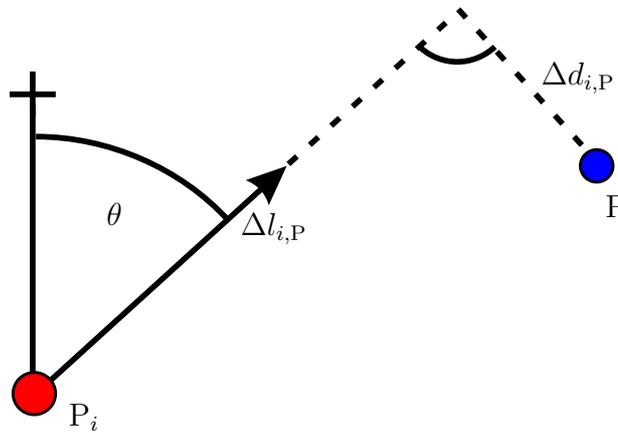


Abbildung 7.3.: Senkrechte Abbildung eines Punktes auf eine Achse.

$$\Delta l_{i,P} = \cos(\theta_i)(N_P - N_i) + \sin(\theta_i)(R_P - R_i) \quad (7.8)$$

$$\Delta d_{i,P} = -\sin(\theta_i)(N_P - N_i) + \cos(\theta_i)(R_P - R_i)$$

mit: i Epoche der Rechenachse
 $\Delta l_{i,P}$ Abstand in Längsrichtung vom Achspunkt i zum Fußpunkt
 $\Delta d_{i,P}$ seitlicher Abstand zum Punkt P

Die Varianz-Kovarianz-Matrix \mathbf{S}_P des abgebildeten Punktes wird mit Hilfe der Varianzenfortpflanzung in Formel (7.9) übertragen. Die Rechenachse wird dabei als fehlerfrei angenommen.

$$\mathbf{S}'_P = \mathbf{B}_i \mathbf{S}_P \mathbf{B}_i^t \quad (7.9)$$

mit: $\mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & \sin(\theta_i) & 0 \\ -\sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

7.4.2. Bildung der Beobachtungen

Nach der Zuordnung werden für jede Epoche i der Rechenachse die Zustandsgrößen der betreffenden Linien nach Formel (7.10) interpoliert. Die Interpolation erfolgt über die Abstände in Längsrichtung für den zugeordneten Linienpunkt $\mathbf{x}_{k,j,r}^L$ und den vorausgehenden Linienpunkt $\mathbf{x}_{k-1,j,r}^L$.

$$\mathbf{x}_{i,j,r}^L = \begin{pmatrix} N_{i,j,r} \\ R_{i,j,r} \\ h_{i,j,r} \\ b_{i,j,r} \\ \theta_{i,j,r} \\ \Delta\theta_{i,j,r} \end{pmatrix} = \mathbf{x}_{k,j,r}^L + (\mathbf{x}_{k-1,j,r}^L - \mathbf{x}_{k,j,r}^L) \frac{\Delta l_{i,(k,j,r)}^L}{\Delta l_{(k-1,k),j,r}^L} \quad (7.10)$$

- mit: i Epoche der Rechenachse, der die Beobachtung zugeordnet wurde.
 j Index der Befahrung, zu der die Beobachtung gehört, $j = 1 \dots p$
 r Index der Linie innerhalb der Befahrung j mit $r = 1 \dots n_j$. n_j ist die aktuelle Anzahl der Linien aus der Befahrung j , die der Epoche i zugeordnet worden sind.
 $k, k-1$ Epochen der Linie innerhalb der Befahrung j .

Für Befahrungen entgegen der Richtung der Achse wird zwischen den Linienpunkten $\mathbf{x}_{k,j,r}^L$ und $\mathbf{x}_{k+1,j,r}^L$ interpoliert. In entsprechender Weise werden auch die Epochen der Trajektorie der Rechenachse zugeordnet und der Zustandsvektor inklusive der Standardabweichungen interpoliert. Das Ergebnis sind Zustandsgrößen $\mathbf{x}_{i,j}^T$, die bei der Verteilung der Differenzen an die Trajektorien und die Anbringung der Korrekturen benötigt werden (siehe Kap. 7.7). Photogrammetrische Messungen zu Einzelpunkten werden der nächstliegenden Epoche der Rechenachse zugeordnet. Eine Interpolation ist nicht möglich. Das Ergebnis sind punktuelle Beobachtungen $\mathbf{x}_{i,j,r}^P$.

7.5. Bestimmung der Näherungslösung

Die Extraktion von Markierungen und Fahrbahnrandern aus mehreren Befahrungen liefert in den meisten Fällen eine hohe Zahl von Beobachtungen. Tatsächlich nutzbar sind aber nur redundant beobachtete Linien. Die in Frage kommenden Bereiche werden vor Beginn der Filterung für jede Epoche i entlang der Rechenachse über eine Häufigkeitsverteilung ermittelt. Zu diesem Zweck wird in den Profilen quer zur Rechenachse ein gleichmäßiges Raster gebildet, z.B. mit einer Maschenweite $\Delta d = 0,1$ m. Jede Linienbeobachtung $\mathbf{x}_{i,j,r}^L$ fällt in ein bestimmtes Raster und liefert einen zählbaren Index. Über ein Fenster der Länge f mit z.B. 1 m Breite lassen sich die belegten Rasterintervalle aus den verschiedenen Befahrungen zählen. Das Ergebnis ist eine Häufigkeitsverteilung für jedes Profil, wie in Abb. 7.4. Der Maximalwert der Häufigkeitsverteilung entspricht der Anzahl der Befahrungen, wenn eine Linie in allen Fahrten beobachtet wurde. Die Situation in Abbildung 7.5 enthält Daten aus drei Messfahrten. Daher zeigt Abb. 7.4 maximal den Zählwert 3. Der Achsabstand des Maximums für jede Markierung stellt einen guten Näherungswert für den Achsabstand der zusammengefassten Linie aus allen Befahrungen dar. Abbildung 7.5 enthält die Näherungswerte, die im Histogramm redundant in mindestens zwei Fahrten gezählt werden können. Nur diese Beobachtungen gehen in die nachfolgende Filterung in Kapitel 7.6 ein. Die Vorverarbeitung der Linien über das Histogramm erhöht die Zuverlässigkeit und Robustheit der Berechnung

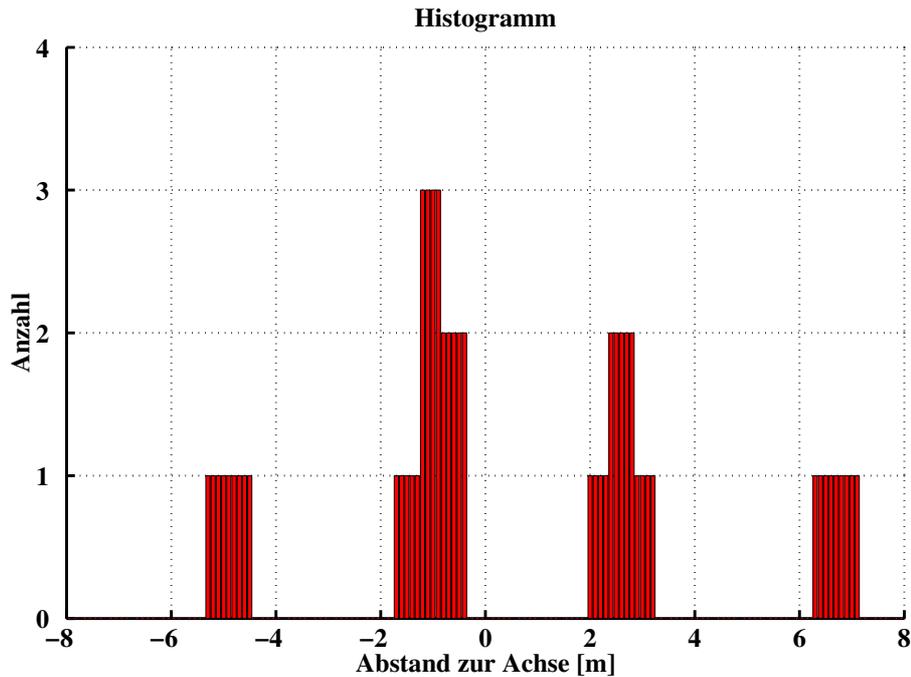


Abbildung 7.4.: Beispiel für ein Histogramm (siehe auch Abb. 7.5).

der Differenzen zwischen den Trajektorien deutlich. Die automatisch erzeugten Näherungswerte in Abb. 7.5 können zudem für einfache Anwendungen einer Kalman-Filterung analog der Linienverfolgung in Kapitel 6.3 unterworfen werden. Das Ergebnis ist ein relativ exaktes Abbild der Fahrstreifenstruktur der gesamten Fahrbahn.

7.6. Homogenisierung der Befahrungsergebnisse

Die Differenzen zwischen den Ergebnissen aus verschiedenen Befahrungen lassen sich anhand redundant bestimmter Objekte ermitteln. Zur Homogenisierung der Befahrungen werden die Unterschiede als Korrektur an den Trajektorien angebracht.

7.6.1. Das Kalman-Filter zur Bestimmung der Trajektorienindifferenzen

Die Schätzung der systematischen Unterschiede in der Positionierung der einzelnen Befahrungen basiert auf dem Kalman-Filter-Verfahren. Die Diskretisierung der Filterinkremente wird durch die Rechenachse vorgegeben, die als Leitlinie dient und in der Regel mit einem Intervall von $\Delta s = 1$ m berechnet wird (siehe Kap. 7.3). Zustandsgrößen sind die systematischen Differenzen in Lage und Höhe zwischen den einzelnen Trajektorien. Die Filtermodellierung kann in Form von Koordinatendifferenzen (7.11) oder in Form von Quer- und Längsabweichungen bezogen auf die Rechenachse (7.12) erfolgen. In beiden Varianten wird i als aktuelle Epoche der Rechenachse definiert. j ist der Index der Befahrung mit $j = 2 \dots p$. Die Höhendifferenz zur Bezugsmessfahrt wird mit $\Delta h_{i,j}$ bezeichnet.

$$\mathbf{x}_{i,j} = \left(\Delta N_{i,j} \quad \Delta R_{i,j} \quad \Delta h_{i,j} \right)^t \quad (7.11)$$

mit: $\Delta N_{i,j}$ Differenz im Nordwert zur Bezugsmessfahrt
 $\Delta R_{i,j}$ Differenz im Rechtswert zur Bezugsmessfahrt

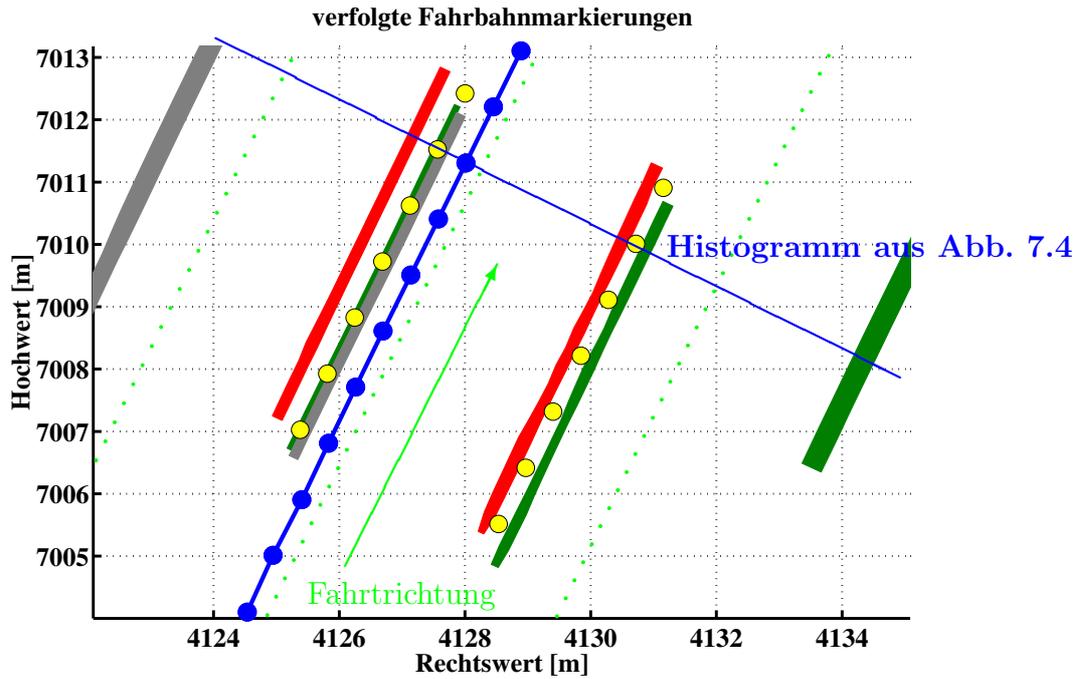


Abbildung 7.5.: Die Grafik bezieht sich auf das Beispiel in Abb. 7.1. Zusätzlich sind die Näherungsbeobachtungen für die Homogenisierung (gelb) und die Rechenachse (blau) eingezeichnet.

Der Zusammenhang zwischen den Größen in (7.11) und (7.12) ist über die Transformation (7.8) gegeben.

$$\mathbf{x}_{i,j} = \begin{pmatrix} \Delta d_{i,j} & \Delta l_{i,j} & \Delta h_{i,j} \end{pmatrix}^t \quad (7.12)$$

mit: $\Delta d_{i,j}$ Differenz zur Bezugsmessfahrt senkrecht zur Rechenachse
 $\Delta l_{i,j}$ Differenz zur Bezugsmessfahrt in Richtung der Rechenachse

Aufgrund der transparenteren Zusammenhänge wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels für die Zustandsgrößen die zweite Variante nach (7.12) verwendet. Die Differenzen zwischen den Trajektorien werden relativ zur Rechenachse geschätzt. Die Achse bildet dabei den kontinuierlichen, festen Bezug für die weiteren Berechnungen. Die Rechenschritte in Kap. 7.4 dienen der Transformation der Beobachtungen auf die Rechenachse zur Vorbereitung der eigentlichen Homogenisierung. Der Zustandsvektor \mathbf{x}_i (7.13) wird aus den einzelnen Komponenten nach (7.12) so aufgebaut, dass eine numerisch stabile Parameterschätzung möglich ist. Analog zur Ausgleichsrechnung, z.B. bei einem Nivellementsnetz, ist die Festlegung eines geodätischen Datums erforderlich, um Rangdefekte und damit singuläre Matrizen zu vermeiden. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse einer Messfahrt festgehalten und dienen als Bezug für alle anderen Befahrungen (siehe Abb. 7.6).

$$\mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{i,2}^t & \dots & \mathbf{x}_{i,j}^t & \dots & \mathbf{x}_{i,p}^t \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} \Delta d_{i,2} & \Delta l_{i,2} & \Delta h_{i,2} & \dots & \Delta d_{i,j} & \Delta l_{i,j} & \Delta h_{i,j} & \dots & \Delta d_{i,p} & \Delta l_{i,p} & \Delta h_{i,p} \end{pmatrix}^t \quad (7.13)$$

Die Bezugsmessfahrt erhält den Index 1. Im Fall der Abbildung 7.5 wäre es zum Beispiel günstig, die mittlere Messfahrt als Bezug zu wählen. Es kann aber auch eine der äußeren Messfahrten festgehalten werden, wobei sich dann nicht mehr alle Zustandsgrößen direkt

beobachten lassen. Auf die Qualität der Parameterschätzung hat die Festlegung der Bezugsmessfahrt aufgrund der großen Redundanz nur geringen Einfluss. Alternativ zum Festhalten einer Trajektorie wäre auch die Einführung einer zusätzlichen Datumsbedingung möglich, in der zum Beispiel definiert wird, dass die Summe aller Koordinatendifferenzen null ergeben muss.

Die Filterung beginnt mit der ersten Epoche der Rechenachse. In jedem Schritt erfolgt zunächst die Prädiktion der Zustandsgrößen von Epoche $i - 1$ zur Epoche i nach Formel (7.14).

$$\begin{aligned}\Delta \bar{d}_{i,j} &= -\sin(\Delta\theta_{i-1,i})\Delta l_{i-1,j} + \cos(\Delta\theta_{i-1,i})\Delta d_{i-1,j} \\ \Delta \bar{l}_{i,j} &= \cos(\Delta\theta_{i-1,i})\Delta l_{i-1,j} + \sin(\Delta\theta_{i-1,i})\Delta d_{i-1,j} \\ \Delta \bar{h}_{i,j} &= \Delta h_{i-1,j}\end{aligned}\tag{7.14}$$

Bei der Prädiktion der Längs- und Querabweichungen ist der Zusammenhang mit der zugrundeliegenden Transformation zu wahren. Daher wird die Richtungsänderung der Achse nach Formel (7.15) bei der Prädiktion berücksichtigt.

$$\Delta\theta_{i-1,i} = \theta_i - \theta_{i-1}\tag{7.15}$$

Die Transitionsmatrix \mathbf{T}_{i-1} für die Differenzen zur Fahrt j enthält Formel (7.16).

$$\mathbf{T}_{i-1} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta_{i-1,i}) & -\sin(\Delta\theta_{i-1,i}) & 0 \\ \sin(\Delta\theta_{i-1,i}) & \cos(\Delta\theta_{i-1,i}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\tag{7.16}$$

Der mathematische Ablauf der Prädiktion ist in (A.1) und (A.2) dargestellt. Bei der Prädiktion der Varianz $\bar{\mathbf{S}}_i$ ist zu beachten, dass die jeweiligen Trajektorien der Messfahrten durch eine zeitbasierte Kalman-Filterung ermittelt werden. Die Drift der Trajektorie ist damit abhängig von der Zeit. Die Schätzung der Differenzen zwischen den Trajektorien findet aber in einem geometrisch diskretisierten Filter statt. Das Gewicht der Prädiktion muss anhand eines empirisch ermittelten Zusammenhangs die korrekte Transformation vom Zeitbereich in den metrischen Zustandsraum sicherstellen. Der erste Teil des Systemrauschens ist daher nach Formel (7.17) umgekehrt proportional zum Betrag der Geschwindigkeit $v_{i,1}$ des Fahrzeuges bei der Messung der Bezugstrajektorie. Im zweiten Teil des Systemrauschens wird berücksichtigt, dass die Störung der Prädiktion proportional zum Geschwindigkeitsunterschied $\Delta v_{i,1}$ zwischen der Fahrt j und der Bezugsmessfahrt zunimmt. Somit gilt für die Störmatrix \mathbf{B}_{i-1} und das Systemrauschen \mathbf{Q}_{i-1} :

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_{i-1}\mathbf{Q}_{i-1}\mathbf{B}_{i-1}^t &= \mathbf{B}_{1,i-1}\mathbf{Q}_{1,i-1}\mathbf{B}_{1,i-1}^t + \mathbf{B}_{2,i-1}\mathbf{Q}_{2,i-1}\mathbf{B}_{2,i-1}^t \\ \text{mit } \mathbf{B}_{1,i-1} &= \begin{pmatrix} \frac{1}{v_{i-1,1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{v_{i-1,1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{v_{i-1,1}} \end{pmatrix} \\ \text{und } \mathbf{B}_{2,i-1} &= \begin{pmatrix} \Delta v_{i-1,j} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta v_{i-1,j} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta v_{i-1,j} \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{7.17}$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrizen $\mathbf{Q}_{1,i-1}$ und $\mathbf{Q}_{2,i-1}$ ergeben sich als Ergebnis umfangreicher Tests und Simulationen.

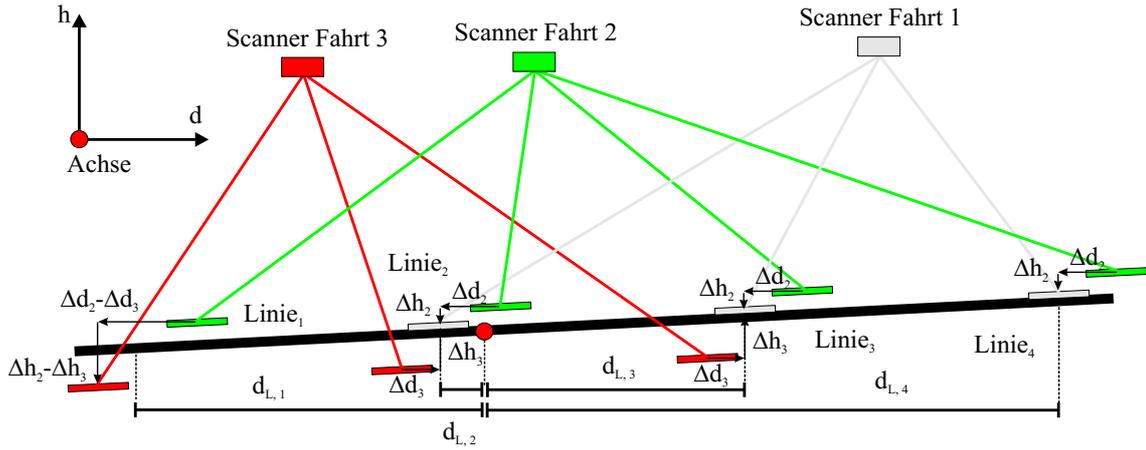


Abbildung 7.6.: Darstellung des Prinzips zur Verknüpfung der Beobachtungen aus verschiedenen Befahrungen.

7.6.2. Beobachtungsgleichungen

Beobachten lassen sich die Zustandsgrößen anhand von Koordinatenabweichungen bei identischen Objekten, die in verschiedenen Befahrungen unabhängig bestimmt worden sind. Als Beobachtungen gehen Markierungen, Fahrbahnränder und photogrammetrisch gemessene Verknüpfungspunkte in die Filterung ein. Berücksichtigt werden nur Linien in Bereichen, die im Zuge der Berechnung der profilbezogenen Histogramme als Abschnitte mit redundanten Linienbeobachtungen detektiert wurden (siehe Kap. 7.5). Insgesamt stehen pro Epoche n_i Markierungen und Fahrbahnränder aus verschiedenen Befahrungen zur Verfügung. Diese werden nach (7.10) interpoliert und nach (7.8) auf die Rechenachse abgebildet. Das Ergebnis sind Achsabstand und Höhe nach (7.18) als Beobachtung für jede Linie sowie die dazugehörige Varianz-Kovarianz-Matrix $\tilde{\mathbf{S}}_{i,j,r}^L$, die sich aus der Varianzenfortpflanzung in (7.9) ergibt.

$$\mathbf{x}_{i,j,r}^L = \begin{pmatrix} d_{i,j,r} & h_{i,j,r} \end{pmatrix}^t \quad (7.18)$$

mit: r Index der Linie zur Epoche i mit $r = 1 \dots n_i$
 n_i aktuelle Anzahl der redundant beobachteten Linien

Das Beispiel in Abbildung 7.5 und die Prinzipskizze in Abbildung 7.6 zeigen, dass die detektierten Markierungen bei einer fahrstreifenweisen Befahrung eines Straßenabschnittes die Verknüpfung der Messfahrten erlauben. Formel (7.18) enthält aber keinen Beobachtungsbeitrag zur Schätzung der Längsabweichung der Trajektorien, da Beginn oder Ende einer Linie aus Laserscannerdaten nicht sicher zu beobachten sind. Die Schätzung der Abweichung in Längsrichtung erfolgt über photogrammetrisch bestimmte Verknüpfungspunkte (vgl. Abb. 7.1). Diese werden ebenfalls nach (7.8) auf die Rechenachse abgebildet. Das Resultat sind die Beobachtungen in (7.19) sowie die dazugehörige Varianz-Kovarianz-Matrix $\tilde{\mathbf{S}}_{i,j,r}^P$.

$$\mathbf{x}_{i,j,q}^P = \begin{pmatrix} l_{i,j,q} & d_{i,j,q} & h_{i,j,q} \end{pmatrix}^t \quad (7.19)$$

mit: q Index des Punktes zur Epoche i mit $q = 1 \dots m_i$
 m_i aktuelle Anzahl der redundant beobachteten photogrammetrischen Verknüpfungspunkte

Das funktionale Modell für jede beobachtete Differenz zwischen zwei Befahrungen aus (7.20) setzt sich aus einer linearen Kombination der prädierten Zustandsgrößen zusammen. Die eigentliche Zustandsgröße ist jeweils der Unterschied der Befahrung j zur Bezugsmessfahrt. Die Abweichungen der übrigen Fahrten untereinander lassen sich nur indirekt beobachten. Matrix (7.23) gibt die möglichen Kombinationen an. Die Zustandsgrößen finden sich in der ersten Zeile. Alle weiteren Elemente der Matrix können als Kombination der Zustandsgrößen angegeben werden.

$$\begin{pmatrix} \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{1j} & \cdots & \Delta_{1p} \\ & \ddots & \vdots & & \vdots \\ & & \Delta_{(j-1)j} & \cdots & \Delta_{(j-1)p} \\ & \mathbf{0} & & \ddots & \vdots \\ & & & & \Delta_{(p-1)p} \end{pmatrix} \quad (7.23)$$

Zum Beispiel lässt sich die Differenz $\Delta d_{i,(j-1)j,r}^L$ zwischen der Markierung r in Fahrt $j-1$ und in Fahrt j mit der Linearkombination der zugehörigen Zustandsgrößen in (7.24) ausdrücken.

$$\Delta d_{i,(j-1)j,r}^L = \Delta d_{i,j} - \Delta d_{i,(j-1)} \quad (7.24)$$

Die Prädiktion der Beobachtungen erfolgt entsprechend. Analog zu Formel (7.20) ergibt sich (7.25).

$$\begin{aligned} \bar{l}_i &= \left(\bar{l}_{i,1}^L \quad \cdots \quad \bar{l}_{i,r}^L \quad \cdots \quad \bar{l}_{i,n_i}^L \quad \bar{l}_{i,1}^P \quad \cdots \quad \bar{l}_{i,q}^P \quad \cdots \quad \bar{l}_{i,m_i}^P \right)^t \\ &= \begin{pmatrix} \left((\Delta \bar{d}_{i,j_2} - \Delta \bar{d}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{h}_{i,j_2} - \Delta \bar{h}_{i,j_1}) \right)^t \\ \vdots \\ \left((\Delta \bar{d}_{i,j_2} - \Delta \bar{d}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{h}_{i,j_2} - \Delta \bar{h}_{i,j_1}) \right)^t \\ \vdots \\ \left((\Delta \bar{d}_{i,j_2} - \Delta \bar{d}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{h}_{i,j_2} - \Delta \bar{h}_{i,j_1}) \right)^t \\ \left((\Delta \bar{l}_{i,j_2} - \Delta \bar{l}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{d}_{i,j_2} - \Delta \bar{d}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{h}_{i,j_2} - \Delta \bar{h}_{i,j_1}) \right)^t \\ \vdots \\ \left((\Delta \bar{l}_{i,j_2} - \Delta \bar{l}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{d}_{i,j_2} - \Delta \bar{d}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{h}_{i,j_2} - \Delta \bar{h}_{i,j_1}) \right)^t \\ \vdots \\ \left((\Delta \bar{l}_{i,j_2} - \Delta \bar{l}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{d}_{i,j_2} - \Delta \bar{d}_{i,j_1}) \quad (\Delta \bar{h}_{i,j_2} - \Delta \bar{h}_{i,j_1}) \right)^t \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7.25)$$

mit: j_2, j_1 Indizes der Befahrungen, zu denen die Beobachtungen gehören. Diese nehmen für jede Beobachtungsgleichung unterschiedliche Werte an.

Für die linearisierte Beobachtungsmatrix $\mathbf{A}_{i,r}^L$ zur Markierung r gilt:

$$\mathbf{A}_{i,r}^L = \begin{pmatrix} \cdots & \frac{\partial l_{i,r}^L}{\partial \Delta d_{i,j_1}} & \frac{\partial l_{i,r}^L}{\partial \Delta h_{i,j_1}} & \cdots & \frac{\partial l_{i,r}^L}{\partial \Delta d_{i,j_2}} & \frac{\partial l_{i,r}^L}{\partial \Delta h_{i,j_2}} & \cdots \\ \cdots & -1 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & -1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

Insgesamt folgt für die Beobachtungsmatrix \mathbf{A}_i :

$$\mathbf{A}_i = \left(\mathbf{A}_{i,1}^L \quad \cdots \quad \mathbf{A}_{i,r}^L \quad \cdots \quad \mathbf{A}_{i,n_i}^L \quad \mathbf{A}_{i,1}^P \quad \cdots \quad \mathbf{A}_{i,q}^P \quad \cdots \quad \mathbf{A}_{i,m_i}^P \right)^t \quad (7.27)$$

Aus der Prinzipskizze in Abbildung 7.6 geht hervor, dass pro Epoche nicht nur eine, sondern mehrere Linien zur Verfügung stehen können, die in verschiedenen Messfahrtskombinationen beobachtet worden sind. Bei der Schätzung der Differenzen zwischen den Befahrungen kommt es vor, dass eine Zustandsgröße innerhalb einer Filterepoche redundant ermittelt werden kann. Aus numerischen Gründen kann es erforderlich sein, die Beobachtungen epochenweise auszugleichen, und nur die Ergebnisse in die Filterung einzubringen. Eine sinnvolle Weiterentwicklung des Modells wird zukünftig darin bestehen, den Zustandsvektor um Linien zu erweitern analog zum Filtermodell in Kapitel 6.3. Die Linien würden die Homogenisierung stabilisieren. Mit dieser Erweiterung können dann auch einfach beobachtete Fahrstreifenmarkierungen in die Filterung eingehen und nicht nur mehrfach detektierte Linien.

7.6.3. Feststellung der Identität der Beobachtungen

Voraussetzung für die Aufstellung der Beobachtungsgleichungen (7.20) ist die Feststellung der Identität der beobachteten Linien. Die Zuordnung der Markierung r in Fahrt j_1 zu einer Beobachtung aus Fahrt j_2 kann zuverlässig nur über die Beobachtungsresiduen nach Formel (7.28) erfolgen.

$$\delta \mathbf{l}_{i,j_2,r}^L = \begin{pmatrix} \Delta d_{i,j_2,r}^L - \Delta d_{i,j_1,r}^L \\ \Delta h_{i,j_2,r}^L - \Delta h_{i,j_1,r}^L \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta \bar{d}_{i,j_2} - \Delta \bar{d}_{i,j_1} \\ \Delta \bar{h}_{i,j_2} - \Delta \bar{h}_{i,j_1} \end{pmatrix} \quad (7.28)$$

Zur Feststellung der Identität wird ein statistischer Test für Achsabstand und -höhe nach Formel (A.11) durchgeführt. Gleichzeitig dient der Test zum Ausschluss von groben Beobachtungsfehlern. Wenn die geprüfte Kombination statistisch akzeptiert werden kann, geht die beobachtete Differenz in die Filterung ein. Für die gegenseitige Zuordnung der photogrammetrischen Verknüpfungspunkte gilt ein entsprechendes Vorgehen. Quer- und Längsabweichung werden dabei gemeinsam als Punktlageabweichung nach Formel (A.19) geprüft.

7.6.4. Filterung

Die eigentliche Filterung zur Bestimmung der Differenzen zwischen den Befahrungen folgt dem Rechenschema für das Vorwärts-Kalman-Filter in Kapitel A.1 mit entsprechender Rückwärts-Filterung (Kap. A.3) und anschließender Glättung (Kap. A.4). Fallunterscheidungen für die Rückwärtsfilterung oder für Fahrten gegen die Stationierungsrichtung sind nicht erforderlich.

7.6.5. Ergebnisse

Das Beispiel aus Kap. 7.1 (vgl. Abb. 7.1 und 7.2) enthält drei Messfahrten. Die erste Fahrt entlang des Hauptfahrstreifens wird als Bezug definiert. Abbildung 7.7 zeigt die Differenzen zwischen der Bezugstrajektorie und den Trajektorien der Befahrungen entlang der beiden Überholfahrstreifen. Dargestellt sind die abschließend geglätteten Ergebnisse der Filterung.

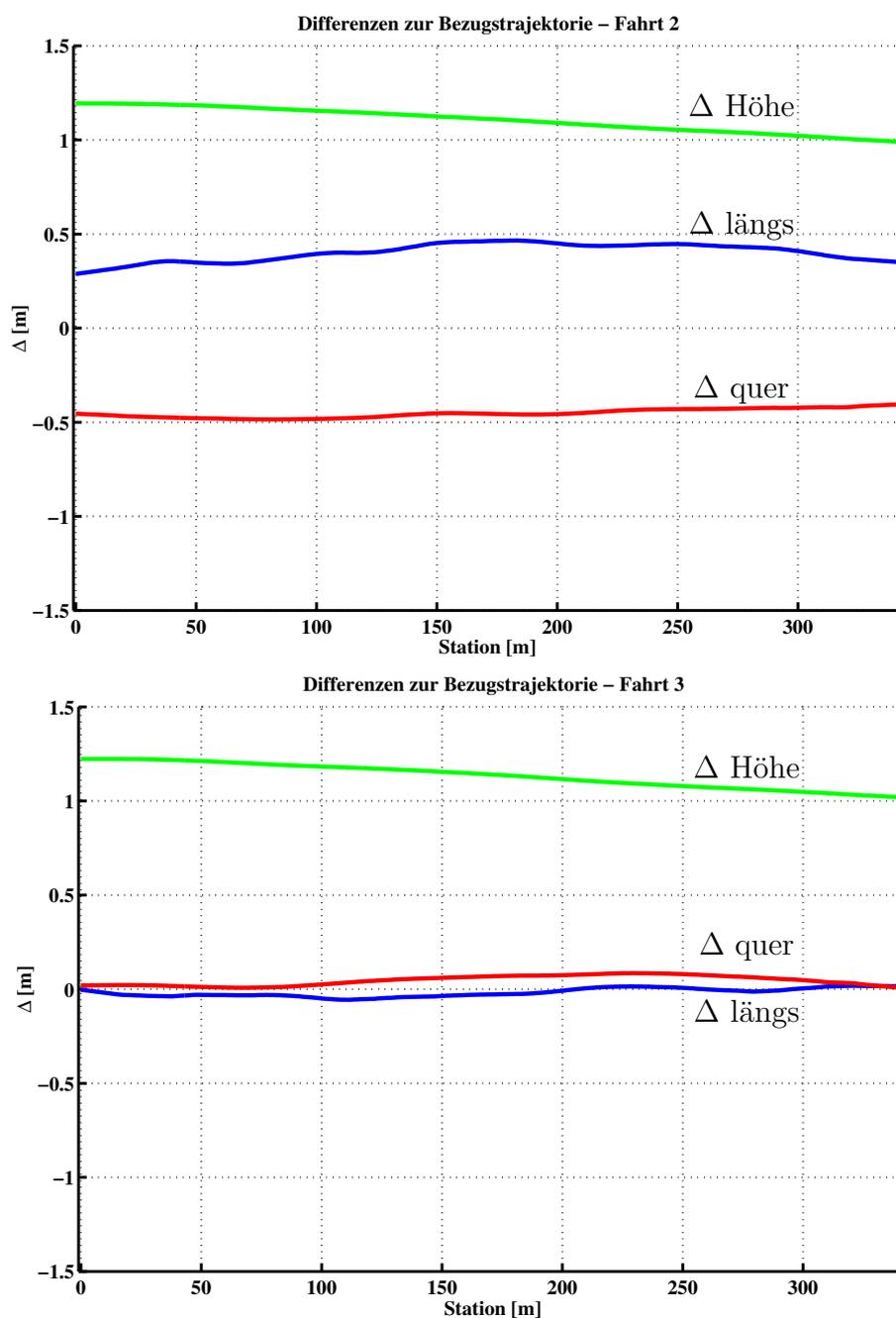
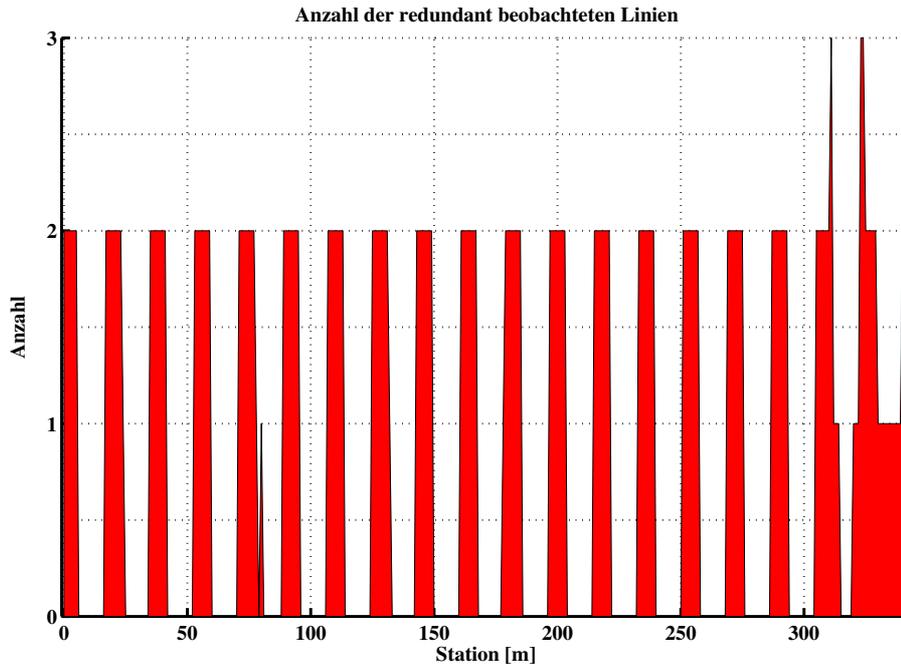


Abbildung 7.7.: Differenzen der Trajektorien der Messfahrten 2 und 3 zur Bezugstrajektorie (vergleiche auch Abb. 7.1).

Auffallend ist, dass alle Differenzen entlang des Abschnittes von 340 m Länge nahezu konstant sind und maximal eine Drift von ca. 0,2 m aufweisen. Die Höhendifferenz zur Bezugstrajektorie ist für Fahrt 2 und 3 fast identisch. Die Bezugsmessfahrt unterscheidet sich in der Höhe um 1 m bis 1,2 m von den beiden anderen Befahrungen. Die Querabweichung für Fahrt 2 liegt bei $-0,5$ m und die Längsabweichung bei $0,4$ m. Die Größenordnung der ermittelten Differenzen entspricht den Erwartungen aufgrund der Messunsicherheit der Trajektorienbestimmung. Abbildung 7.8 enthält die Anzahl der Markierungen, die entlang der Rechenachse für die Homogenisierung verwendet worden sind. Die Scannerdaten aus den 3 Befahrungen liefern vor allem redundante Beobachtungen für die Markierungen links und rechts vom ersten Überholfahrtstreifen. Ein gutes Mass für die Qualität der Verknüpfung sind die



Verknüpfungspunkten zuverlässig ermitteln lassen. Die Genauigkeit der Verknüpfung der Befahrungen erfüllt die Anforderungen der Straßeninformationsbank deutlich (vgl. Tab. 2.1).

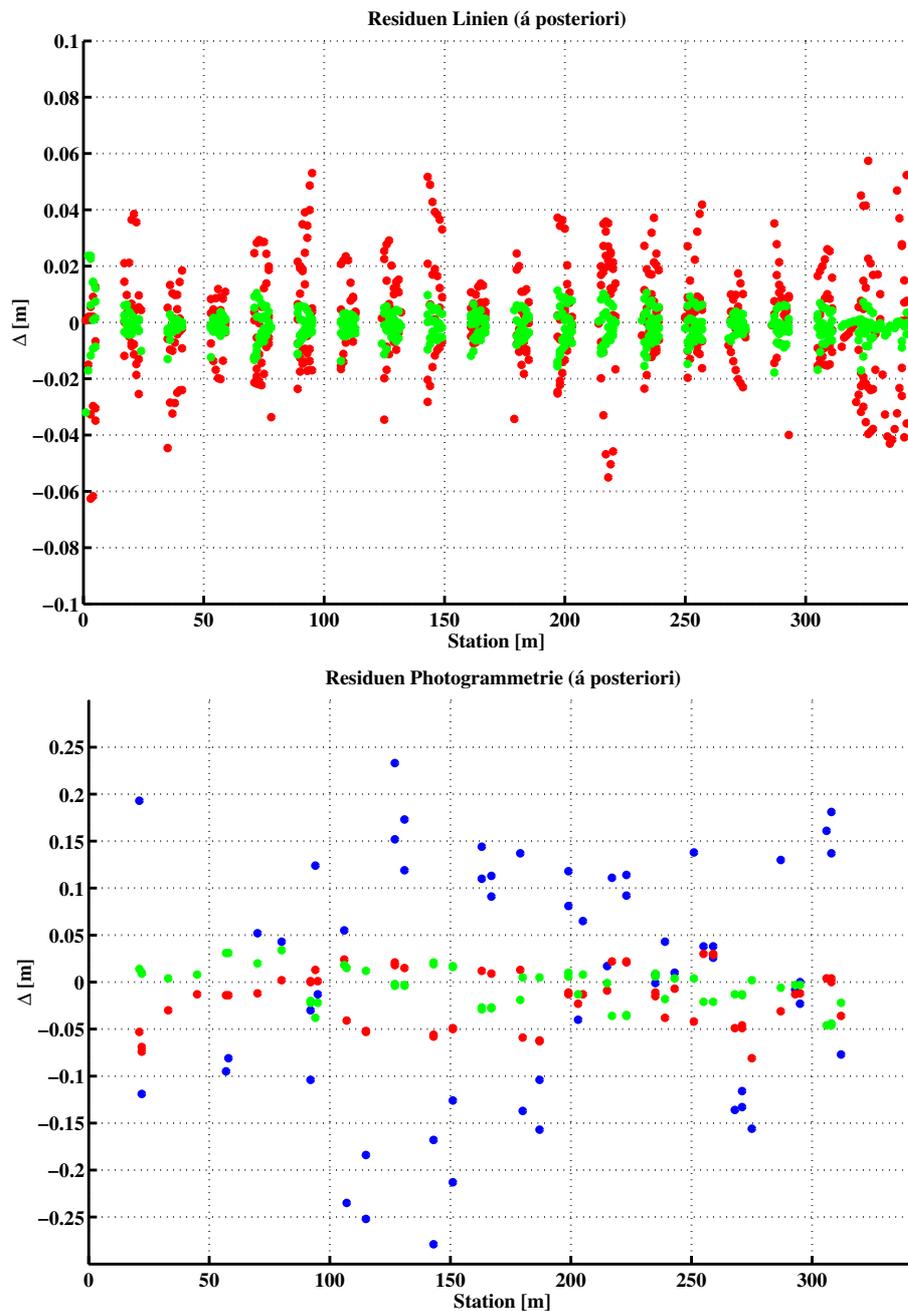


Abbildung 7.9.: Residuen der Beobachtungen aus allen Befahrungen: quer (rot), längs (blau) und Höhe (grün).

Das Ergebnis garantiert Nachbarschaftsgenauigkeit, z.B. für die gesamte Fahrbahnfläche einer Autobahn. Auch die Forderungen nach tachymetrischer Messgenauigkeit beim digitalen Oberflächenmodell werden quer zur Fahrbahnachse und in der Höhe erfüllt (vgl. Kap. 8). In Längsrichtung ist die Genauigkeit in diesem Beispiel nicht zufriedenstellend. Die Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung wird durch die schwache Geometrie des Vorwärtsschnittes in Längsrichtung beeinträchtigt und ist damit abhängig von der Entfernung der Messpunkte zum Fahrzeug (vgl. Kap. 3.10). Die durchschnittliche Messentfernung

für die Verknüpfungspunkte liegt in diesem Beispiel über 20 m. Da die Kamerabasis auf dem Fahrzeug nicht verbreitert werden kann, kommt für eine Verbesserung der Messgenauigkeit in Längsrichtung nur die Erhöhung der Bildauflösung in Frage. Die Unsicherheiten in der Längsabweichung werden für digitale Oberflächenmodelle als tolerierbar angesehen, wenn auf kürzere Entfernungen unter optimalen geometrischen Bedingungen gemessen wird. Kleine Abweichungen in Längsrichtung sind tolerierbar, da gerade auf Autobahnen plötzliche Änderungen in Fahrtrichtung nicht auftreten.

7.7. Korrektur der Trajektorien

Die Bewegungskurve des Fahrzeuges im Raum ist Grundlage aller Auswertungen. Um die Konsistenz der Ergebnisse sicherzustellen, die auf der Basis der Trajektorie erzeugt werden, erfolgt im letzten Schritt die Korrektur der Trajektorien. Zunächst werden die geglätteten Zustandsgrößen epochenweise mit Hilfe des Richtungswinkels der Achse nach Formel (7.29) auf Koordinatendifferenzen transformiert (vgl. Abb. 7.3).

$$\begin{aligned}\Delta N_{i,j} &= \cos(\theta)\Delta l_{i,j} - \sin(\theta)\Delta d_{i,j} \\ \Delta R_{i,j} &= \sin(\theta)\Delta l_{i,j} + \cos(\theta)\Delta d_{i,j}\end{aligned}\tag{7.29}$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrix $\hat{\mathbf{S}}_{i,g}$ der Zustandsgrößen zur Epoche i wird mit Hilfe der Varianzenfortpflanzung in (7.30) auf die Koordinatenkomponenten übertragen.

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{S}}'_{i,g} &= \mathbf{B}_i \hat{\mathbf{S}}_{i,g} \mathbf{B}_i^t \\ \text{mit: } \mathbf{B}_i &= \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{7.30}$$

Der transformierte Zustandsvektor mit geglätteten Koordinatendifferenzen ergibt sich aus (7.31).

$$\hat{\mathbf{x}}'_{i,g} = \mathbf{B}_i \hat{\mathbf{x}}_{i,g}\tag{7.31}$$

Zur Ermittlung der Korrekturen für die Trajektorien werden die Differenzen $\hat{\mathbf{x}}'_{i,g}$ auf die einzelnen Messfahrten verteilt. Analog zur Ermittlung der Verbesserungen bei der Kalman-Filterung nach (A.6) und (A.7) lässt sich die Verschiebung jeder einzelnen Trajektorie mit Hilfe der Transformation (7.32) erzeugen. Die Struktur der linearisierten Beobachtungsmatrix \mathbf{A} entsteht durch Ableitung der geglätteten Zustandsgrößen $\hat{\mathbf{x}}'_{i,g}$ nach der jeweils zugehörigen Trajektorie mit Index j und der Bezugstrajektorie mit Index 1. Das Gewicht jeder Trajektorie bei der Verteilung entspricht der Varianz-Kovarianz-Matrix der Trajektorienbestimmung, die mit $\mathbf{S}_{i,j}^T$ bezeichnet wird. Auf diese Weise erhalten Trajektorien mit hoher Standardabweichung größere Korrekturen als Trajektorien mit kleiner Standardabweichung. Für jede Filtereпоche lassen sich auf diese Weise dreidimensionale Trajektorienkorrekturen

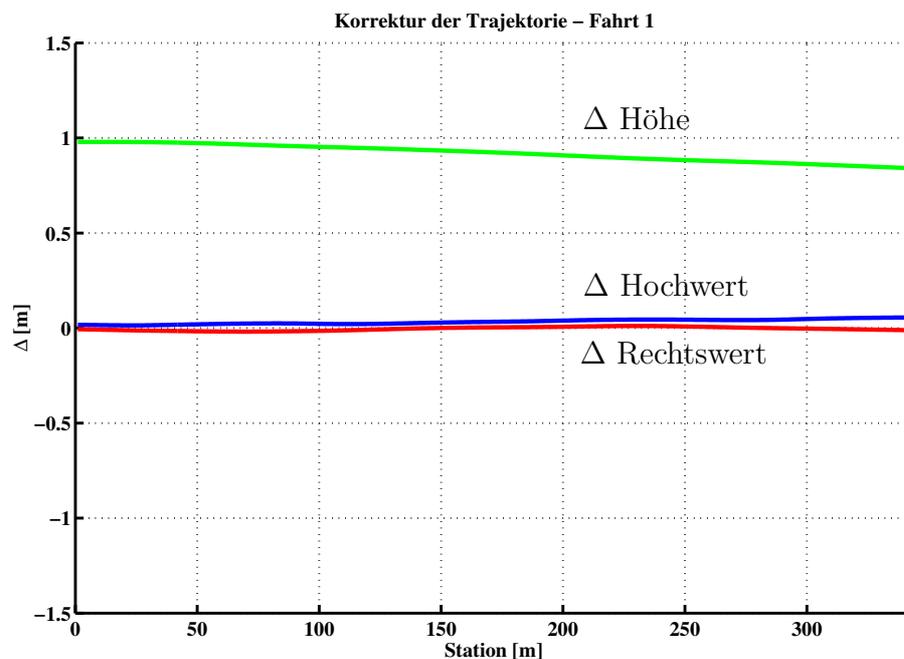


Abbildung 7.10.: Darstellung der Korrekturen für die Trajektorie der Befahrung 1, die sich aus dem Beispiel in Abbildung 7.7 ergeben.

nach (7.32) bestimmen.

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{\text{korri},g}^{\text{T}} = \boldsymbol{K}_i \hat{\boldsymbol{x}}'_{i,g}$$

mit:

$$\boldsymbol{K}_i = \boldsymbol{S}_i^{\text{T}} \boldsymbol{A}^t (\boldsymbol{A} \boldsymbol{S}_i^{\text{T}} \boldsymbol{A}^t)^{-1},$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & & 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & & \vdots & & & & \vdots & & \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ und} \quad (7.32)$$

$$\boldsymbol{S}_i^{\text{T}} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{S}_{i,1}^{\text{T}} & & & & & & & & & \\ & \ddots & & & & & & & & \\ & & \boldsymbol{S}_{i,j}^{\text{T}} & & & & & & & \\ & & & \ddots & & & & & & \\ & & & & \boldsymbol{S}_{i,p}^{\text{T}} & & & & & \\ & & & & & \ddots & & & & \end{pmatrix}$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrix der Korrekturen $\hat{\boldsymbol{S}}_{\text{korri},g}^{\text{T}}$ wird analog nach Formel (7.33) berechnet.

$$\hat{\boldsymbol{S}}_{\text{korri},g}^{\text{T}} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_i \boldsymbol{A}) \hat{\boldsymbol{S}}'_{i,g} \quad (7.33)$$

Die streckenabhängig ermittelten Korrekturen sind zeitlich eindeutig der jeweiligen Trajektorie zugeordnet. Bei der Korrektur der einzelnen Epochen wird innerhalb eines Filterintervalls $\Delta s_{i-1,i}$ über die entsprechende Zeitdifferenz $\Delta t_{i-1,i}$ interpoliert. Abbildung 7.10 zeigt die Korrekturen für die Trajektorie der Messfahrt 1, die sich für das Beispiel aus Abbildung 7.7 ergeben. Die geschätzten Differenzen zur Bezugstrajektorie werden gewichtet nach der Standardabweichung der Trajektorienbestimmung verteilt. Dabei erfolgt für die Bezugsmessfahrt insbesondere eine Korrektur in der Höhe. Die übrigen Trajektorien erhalten entsprechende Verbesserungen.

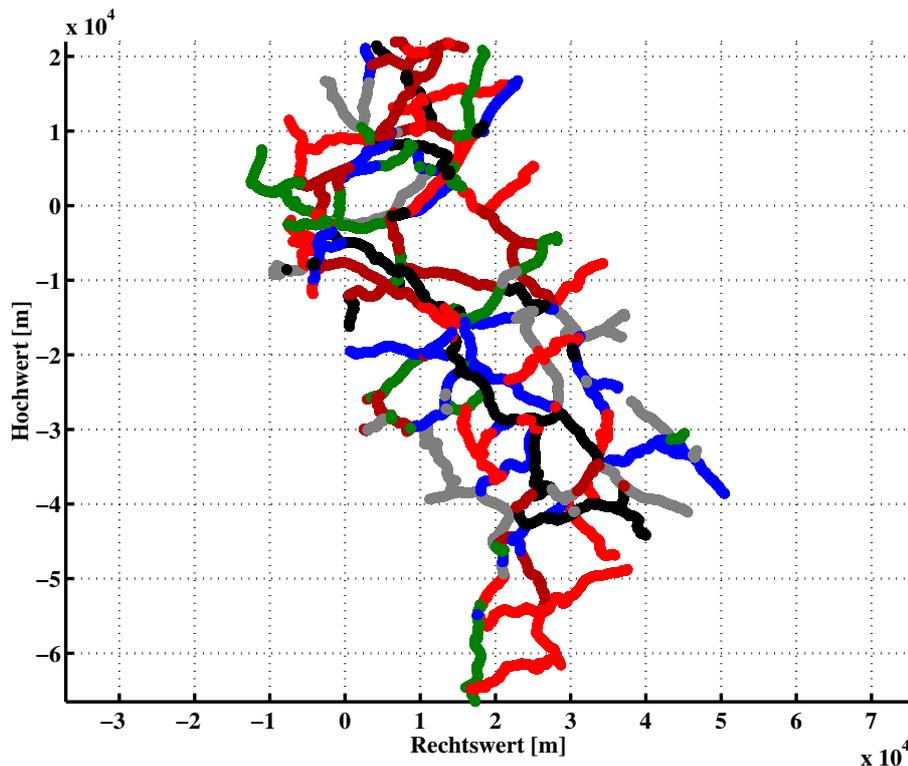


Abbildung 7.11.: Straßennetz aus homogenisierten Trajektorien für den Straßenbauamtsbezirk Hameln.

7.8. Netzbildung

Die vorangegangenen Abschnitte zeigen, dass die Homogenisierung unabhängiger Befahrungen entlang zusammenhängender Straßenabschnitte mit zufriedenstellender Genauigkeit möglich ist. Die Bildung eines homogenen Straßennetzes aus kinematischen Aufnahmedaten erfordert noch einen weiteren Rechenschritt. Als Beispiel ist in Abbildung 7.11 das Straßennetz für den Straßenbauamtsbezirk Hameln abgebildet. Dieses Netz umfasst ca. 1000 km trassierter Länge. Die Abbildung setzt sich aus insgesamt 101 Messfahrten zusammen, die zu verschiedenen, zeitlich gestaffelten Messkampagnen gehören. Die Trajektorien der Befahrungen wurden entlang der Straßen erfolgreich homogenisiert. An den Kreuzungspunkten des Netzes allerdings treffen die angepassten Fahrten der verschiedenen, zusammenhängenden Abschnitte aufeinander. Zwangsläufig treten an diesen Stellen Netzspannungen auf. Abbildung 7.12 zeigt als Beispiel die planfreie Kreuzung einer Bundesstraße mit allen zugehörigen Befahrungen. Um die Kreuzung erfolgreich auswerten zu können, ist die gegenseitige Anpassung der Trajektorien der kreuzenden Straßen erforderlich. Im Allgemeinen lassen

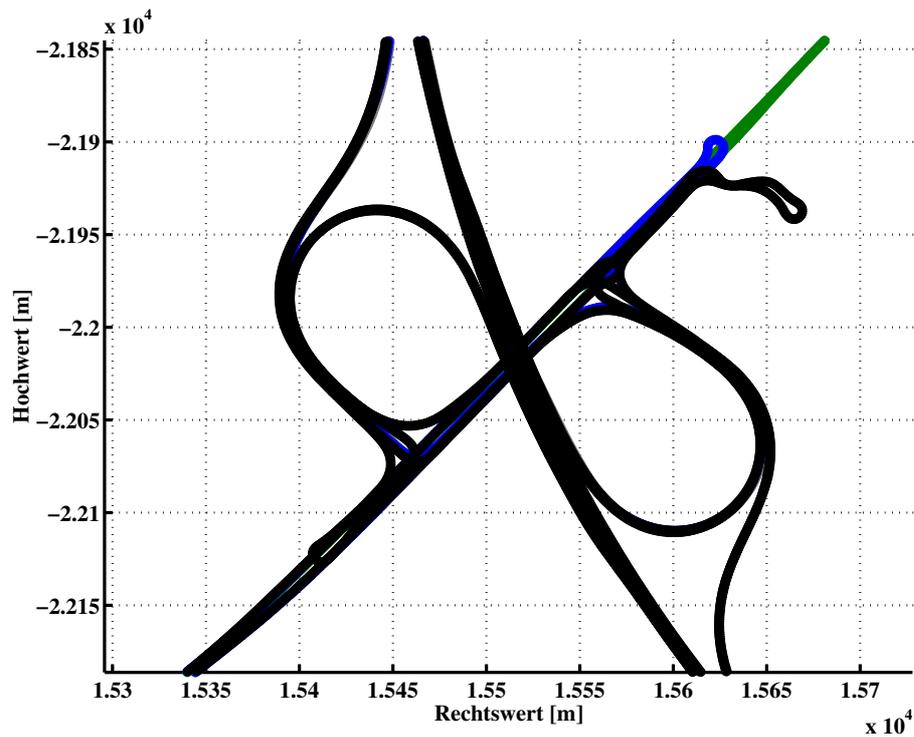


Abbildung 7.12.: Planfreie Kreuzung als Ausschnitt aus dem Straßennetz mit homogenisierten Trajektorien.

sich die systematischen Koordinatendifferenzen zwischen den einzelnen Homogenisierungsabschnitten mit Hilfe photogrammetrisch gemessener Verknüpfungspunkte feststellen und als Korrekturen anbringen. Beim Projekt Hameln wurden die vorhandenen Netzknotenmarkierungen in den Kreuzungsbereichen zusätzlich mit differentiell GPS statisch eingemessen. Die gewonnenen Koordinaten dienen als absolute Passpunktinformationen, so dass die photogrammetrische Messung der Knotenmarkierungen die Anpassung an das Landeskoordinatensystem ermöglichte. Das Ergebnis des Verfahrens ist ein großräumig kinematisch vermessenes, spannungsfreies Straßennetz.

8. Digitale Modelle von Fahrbahnoberflächen

Die Berechnung digitaler Modelle von Fahrbahnoberflächen stellt ein neuartiges Anwendungsgebiet für die Auswertung kinematisch gewonnener Laserscanner-Messdaten dar. Anwendungen liegen im Bereich der Automobilindustrie, z.B. für Fahrsimulationen oder als Referenz für Fahrdynamik-Teststrecken. Hauptsächlich werden digitale Modelle von Fahrbahnoberflächen als Planungsgrundlage für die Sanierung der Fahrbahndecken von Straßen eingesetzt, z.B. zur Erstellung des Deckenbuches für eine Autobahn. Das Verfahren steht in direkter Konkurrenz zu statischen Vermessungsmethoden. Die Deckensanierung erfordert die homogene Erfassung der Fahrbahn über die gesamte Breite. Durch Anwendung der Prozessierungsschritte aus den vorangegangenen Kapiteln lässt sich die Aufgabenstellung auch mit kinematisch erfassten Messdaten lösen. Im ersten Schritt werden aus den kalibrierten Scannermessungen die Markierungen extrahiert. Die gegenseitige Anpassung aller Trajektorien im Straßenabschnitt und die nachfolgende Transformation auf Passpunkte liefern die Grundlage für die Bestimmung der dreidimensionalen Trassierungselemente der Straße. Die daraus resultierende Bestandsachse dient als Bezug für das digitale Modell der Fahrbahnoberfläche, das aus den Laserscanner-Messdaten aller Fahrten berechnet wird.

8.1. Transformation auf ein lokales Koordinatensystem

Die Erstellung eines digitalen Oberflächenmodells erfordert in einigen Fällen die Transformation der vorhandenen Trajektorien auf ein lokales Koordinatensystem. Insbesondere bei Anwendungen im Bereich der Deckensanierung ist die Festlegung eines Baustellenkoordinatensystems als Bezugsrahmen die Regel. Das Ergebnis der Rechenschritte in Kap. 3.8 sind Laserscanner-Koordinaten \mathbf{x}_k^a bezogen auf ein konformes Anwender-Koordinatensystem. Üblich ist die Ausgabe der Daten in Landeskoordinaten bezogen auf das Bessel-Ellipsoid. Die Homogenisierung der Trajektorien ergibt eine präzise relative Anpassung der Befahrungen zueinander. Die absolute Genauigkeit der Koordinaten liegt nach der Homogenisierung aber immer noch im Rahmen der Standardabweichung der Trajektorienbestimmung (vgl. Tabelle 3.3). Absolut gesehen beziehen sich die homogenisierten Messdaten auf die Trajektorie mit der geringsten geschätzten Standardabweichung (vgl. Kap. 7). Der exakte Bezug auf ein lokales Koordinatensystem kann nur über Passpunkte hergestellt werden. Die maximal geforderte Genauigkeit für ein digitales Modell der Fahrbahnoberfläche liegt gemäß Tabelle 8.3 bei 0,03 m in der Lage und 0,004 m in der Höhe. Diese Messgenauigkeit lässt sich derzeit über photogrammetrische Messungen nicht erreichen (vgl. Tab. 7.2). Die notwendigen Transformationsparameter werden aus Passpunktmessungen in den Laserscanner-Messdaten gewonnen. Eine konforme Abbildung der Koordinaten vorausgesetzt, besteht die Transformation in diesem Fall lediglich aus Translationen. Für die Anpassung auf das lokale Koordinatensystem ist eine gleitende Transformation erforderlich, da sich die Parameter zeit- und damit streckenabhängig verändern. Für die Passpunktmessung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Bei der Standardmethode werden markierte Passpunkte in den Remissions-

messungen der Laserscanner detektiert. Der Vergleich der Laserscanner-Koordinaten mit den Sollwerten liefert nach (8.1) an jedem Punkt Differenzen zum lokalen System. Zeitlich können die Abweichungen jeweils einer Epoche j der Trajektorie zugeordnet werden.

$$\Delta \mathbf{x}_{j,a}^{lokal} = \mathbf{x}_j^{lokal} - \mathbf{x}_j^a \quad (8.1)$$

Die Korrekturen lassen sich damit in entsprechender zeitlicher Abfolge an der Trajektorie anbringen. Zwischen den Zeitpunkten mit detektierten Passpunkten werden die Verbesserungen interpoliert. Das Ergebnis der Auswertung sind lokal angepasste Laserscanner-Messpunkte \mathbf{x}_k^{lokal} als Grundlage für die Prozessierung des digitalen Oberflächenmodells. Abbildung 8.2 enthält die Differenzen zum lokalen Koordinatensystem am Beispiel der Fahrbahn aus Abbildung 8.1. Insgesamt wurden auf der 1930 m langen Strecke 21 Passpunkte markiert und gemessen. Der durchschnittliche Punktabstand liegt dabei bei knapp unter 100 m. Die Distanz zwischen den Passpunkten muss so gewählt werden, dass die nichtlinearen Anteile der Drift der Trajektorie zwischen den einzelnen Kontrollpunkten keine signifikante Größenordnung annehmen (vgl. auch Abbildung 7.10). Die Differenzen zu den Passpunkten in Abb. 8.2 zeigen einen nahezu linearen Verlauf. In der Lage bleiben die Korrekturen im Bereich weniger Zentimeter. Die Höhe wird im Schnitt um $-0,45$ m verschoben. Die Größenordnung der Abweichungen liegt damit im Rahmen der Erwartungen (vgl. Tab. 3.3). Die absolute Genauigkeit des Ergebnisses lässt sich über Kontrollmessungen verifizieren (siehe Tabelle 8.2).

8.2. Verknüpfung von Straßenachse und Laserscannerdaten

Im Straßenwesen werden für die Planung in der Regel Profile quer zu einer Bezugsachse verwendet. Die Berechnungsmethode für digitale Modelle der Fahrbahnoberfläche lehnt sich an diese Vorgehensweise an. Das Rechenraster folgt profilweise der Bestandsachse für die vorhandene Straße (siehe Kap. 8.2.3).

8.2.1. Die Bestandsachse

Die Straßenachse dient zur präzisen mathematischen Modellierung der dreidimensionalen Geometrie eines Verkehrsweges. Analog zur Vorgehensweise beim Straßenentwurf werden die geometrischen Verhältnisse ausgehend von Stützpunkten in der Lage mit den Trassierungsparametern Gerade, Klothoide und Kreis und in der Höhe durch die Gradienten beschrieben. Die Achse wird als Bestandsachse bezeichnet, wenn sie sich auf den Verlauf der gesamten Straße bezieht, und als Fahrbahnachse, wenn sie nur die jeweilige Richtungsfahrbahn beschreibt. Gemäß der Definition in der Anweisung Straßeninformationsbank verläuft die Bestandsachse grundsätzlich in der Mitte der aufzunehmenden Straße [ASB (2005)]. Bei nachträglichen Querschnittsänderungen infolge von Baumaßnahmen, z.B. zusätzlichen Fahrstreifen, verschiebt sich die Bestandsachse in die neue Mitte der Straße. Bei Verkehrswegen mit baulich getrennten Richtungsfahrbahnen liegt die Bestandsachse in der Mitte der baulichen Trennung. Fahrstreifen sind markierte Bereiche, die der Unterteilung der Fahrbahn und der Führung des Straßenverkehrs dienen. Zusätzlich gehören auch stationsbezogene Angaben, wie z.B. die jeweilige Fahrbahnbreite oder die Querneigung zu den Trassierungsparametern. Die Bestimmung der Achse ist auch Bestandteil der Erfassung von Straßennetzen für die Straßeninformationsbank (vgl. Tab. 2.1 oder Kap. 7.8). Die mathematische Parametrisierung des Verkehrsweges hat den Vorteil, dass auch lange Straßenabschnitte ohne Genauigkeitsverlust in kompakter Form beschrieben werden können. Für jede Station entlang der Achse kann der räumliche Verlauf exakt abgeleitet werden. Abbildung 8.1 stellt die Achse einer Landesstraße mit 1930 m Länge dar. Die Passpunkte zu Abb. 8.2 sind ebenfalls eingezeichnet.

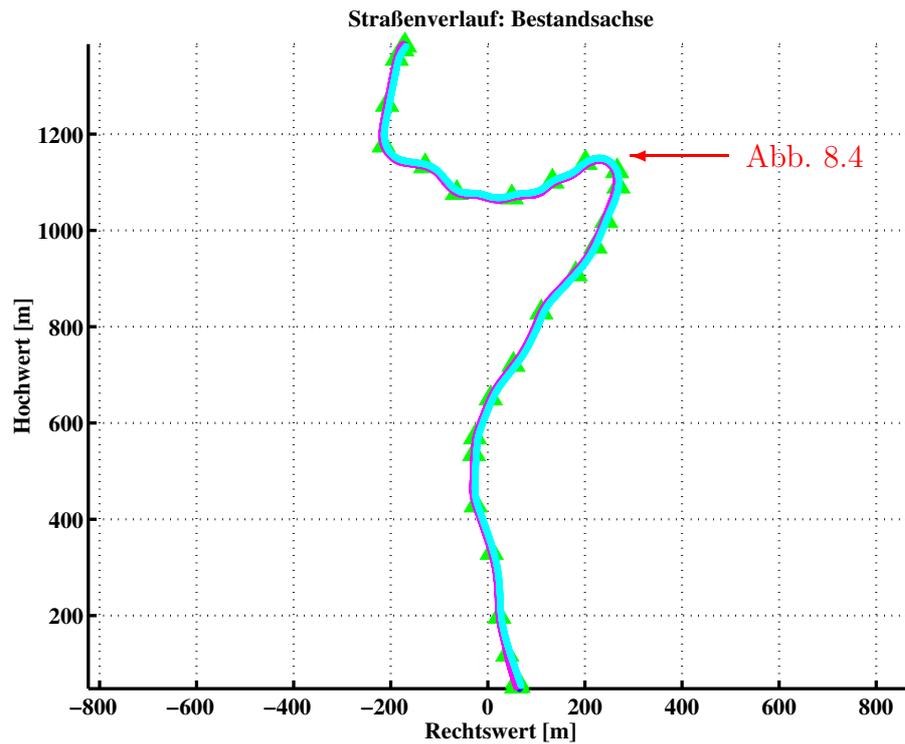


Abbildung 8.1.: Bestandsachse einer Landesstraße (von Süd nach Nord), für die ein digitales Oberflächenmodell abgeleitet wurde: Achse(blau), linker Rand(magenta), rechter Rand (cyan). Passpunkte sind als grüne Dreiecke dargestellt.

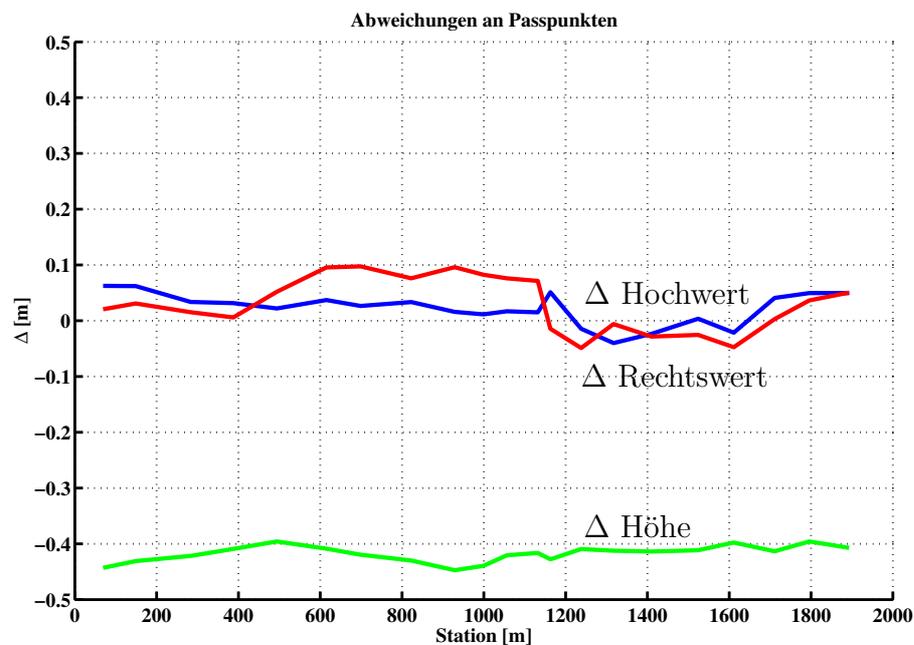


Abbildung 8.2.: Differenzen zum lokalen Koordinatensystem an den Passpunkten zur Strecke aus Abbildung 8.1.

Abbildung 8.3 zeigt den Höhenverlauf der Achse aus Abb. 8.1 sowie die zugehörige Fahrbahnbreite. Die Straße weist einen Höhenunterschied von 97 m auf. Die Breite der Fahrbahn schwankt, liegt aber im Mittel bei 5 m. Die Trassierungsparameter der Achse wurden aus Messdaten des Systems MoSES abgeleitet (siehe Kap. 8.2.2).

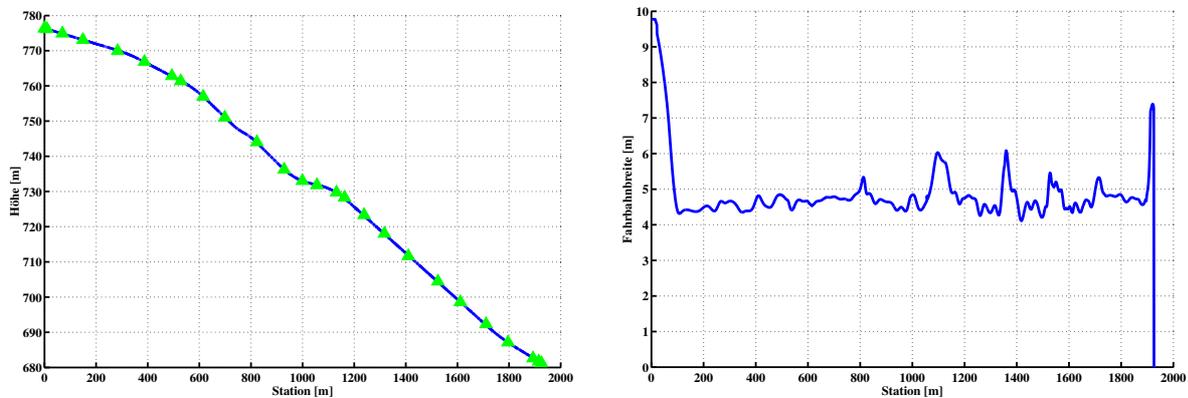


Abbildung 8.3.: Höhenverlauf und Fahrbahnbreite zur Achse in Abb. 8.1. Passpunkte sind als grüne Dreiecke dargestellt.

8.2.2. Bestimmung der Trassierungsparameter aus kinematischen Messdaten

Grundlage für die Bestimmung der Trassierungsparameter ist grundsätzlich eine dichte Folge von Positionen, z.B. im Abstand von 1 m, entlang der Achse des Verkehrsweges. Aus der Punktfolge werden die Parameter des Straßenentwurfs in Lage und Höhe abgeleitet. Eine Darstellung der mathematischen Verfahren zur Gewinnung von Trassierungsparametern aus diskreten Punkten findet sich bei [Rickert (2002)] oder [Lippold et al. (2004)]. In der Regel laufen die Verfahren ganz oder teilweise automatisiert ab. Von besonderem Interesse ist die korrekte Ermittlung der Kurvenanfangs- und -endpunkte. Qualitative Unterschiede bei Straßenachsen beruhen vor allem auf der Güte der zugrundeliegenden Punktfolgen. Die einfachste Grundlage zur Gewinnung der Achse ist die diskretisierte Trajektorie des Messfahrzeuges. Die Krümmungseigenschaften des Verkehrsweges lassen sich bereits aus der Trajektorie nach (3.1) näherungsweise ableiten [Wang (1997)]. Bei gleichmäßiger Fahrt mit konstantem Abstand zur Mittellinie kann die Trajektorie als Parallele zur Achse betrachtet und in die Nähe der Fahrbahnachse transformiert werden [Sternberg und Caspary (2002)]. Auch die Mittelung der diskreten Punktfolgen aus Hin- und Rückfahrt ist eine Möglichkeit zur Konstruktion einer Näherungslösung für die Achse eines Verkehrsweges. Beispiele beschreiben [Sternberg und Caspary (1994)] und [Lippold et al. (2004)]. In der Praxis kann beim Fahren eine Parallele zur Achse nicht eingehalten werden. Aufgrund von Überholmanövern oder Fahrbahnaufweitungen sind die Ergebnisse der einfachen Methode zur Gewinnung der Trassierungsparameter nur eingeschränkt nutzbar. Insbesondere kleine Kurvenradien lassen sich mit Hilfe der Trajektorie nur ungenau ermitteln, da die Fahrlinie in Kurven aufgrund der Fahrzeuggeometrie von einer Parallele zur Fahrbahnachse deutlich abweicht (vgl. Kap. 6.3.4). Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung einer Näherungslösung für die Bestandsachse ist die Verwendung der Rechenachse aus der Homogenisierung unabhängiger Befahrungen (siehe Kap. 7.3). Für die Ansprüche der Straßeninformationsbank [ASB (2005)] oder für die Anforderungen der Fahrerassistenzsysteme reichen die oben genannten Verfahren teilweise nicht aus.

Die hypothesenfreie Ableitung der Achse eines Verkehrsweges, die allen Anforderungen genügt, erfolgt mit Hilfe der äußeren Fahrbahnränder, die aus Messdaten geometrisch erfasst werden. Beim System MoSES wird der korrekte Straßenverlauf anhand von Auswertungen in den Aufnahmen der Stereokameras und den Laserscannerdaten bestimmt. Mit Hilfe der Laserscannermessungen werden die äußeren Fahrstreifenmarkierungen und die geometrischen Fahrbahnränder verfolgt (vgl. Kap. 6). Photogrammetrische Messungen dienen zur Verdichtung und visuellen Kontrolle (vgl. Kap. 3.10). Das Ergebnis ist ein diskretisiertes Bild der Struktur der Fahrbahn, aus dem sich die geforderten Trassierungsparameter automatisiert ableiten lassen. Details zum Verfahrensablauf der Achsgewinnung und Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung der Auswertungsergebnisse der MoSES-Daten für den Einsatz in Fahrerassistenzsystemen sind zusammengetragen in [Claus (2004)].

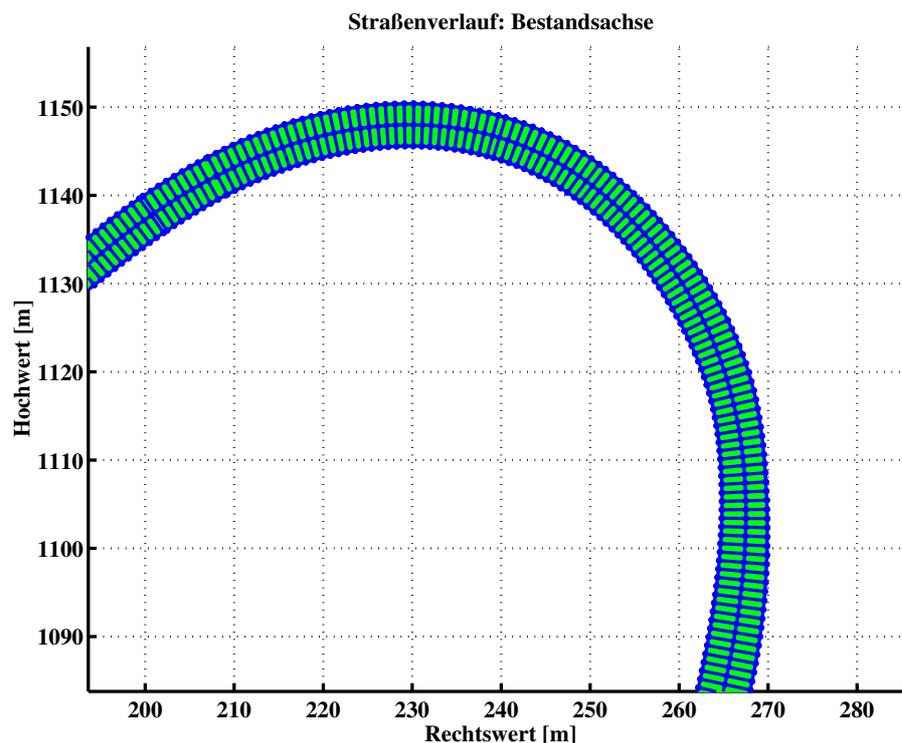


Abbildung 8.4.: Ausschnitt der Achse in Abb. 8.1 mit eingezeichneten Querprofilen im Abstand von 1 m in Stationierungsrichtung.

8.2.3. Nutzung von Bestandsachsen für Fahrbahn-Oberflächenmodelle

Die Anordnung des geometrischen Rasters für das digitale Modell der Fahrbahnoberfläche orientiert sich an den Standards der Straßenplanung. Die Bestandsachse dient als Leitlinie der Berechnungen. Entlang der abgerollten Länge der dreidimensionalen Achse werden in regelmäßigen Stationierungsabständen Δs Querprofile senkrecht zur Achse gebildet. Aus den Trassierungsparametern ergibt sich für jede Epoche i zur Station s_i ein Achspunkt $\mathbf{x}_{i,0} = (N_{i,0} \ R_{i,0} \ \theta_i)^t = (\text{Nordwert} \ \text{Rechtswert} \ \text{Richtungswinkel})^t$. In den Querprofilen werden nach Formel (8.2) Punkte j in regelmäßigem Abstand Δd zueinander berechnet. Die äußeren Punkte in jedem Profil bilden die Fahrbahn­ränder.

$$\mathbf{x}_{i,j} = \begin{pmatrix} N_{i,0} - \sin(\theta_i) \Delta d_j \\ R_{i,0} + \cos(\theta_i) \Delta d_j \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

Die Rasterweite eines digitalen Oberflächenmodells liegt in der Regel zwischen 0,02 m und 0,50 m. Der Profilabstand Δs entlang der Bestandsachse und die Rasterweite Δd im Querprofil sind meist identisch. Abbildung 8.4 zeigt einen Ausschnitt der Achse aus Abb. 8.1 als Beispiel für das achsbegleitende Rechenraster eines digitalen Oberflächenmodells. Zur Erleichterung der Übersicht sind nur die Profile im Abstand von 1 m eingezeichnet.

8.3. Bildung eines digitalen Oberflächenmodells der Fahrbahn

Zu jedem Rasterpunkt eines digitalen Fahrbahnoberflächenmodells ergeben sich die Höhe und deren Standardabweichung aus einer ausgleichenden Fläche (siehe Kap. 8.3.1). Dazu werden für jeden einzelnen Rasterpunkt die Parameter einer optimal an die umgebenden Laserscanner-Messpunkte angepassten Funktion geschätzt (siehe Kap. 8.3.3). Wegen der speziellen Verteilung der Scannerpunkte auf der Fahrbahn musste ein eigener Ansatz zur Bestimmung des Oberflächenmodells entwickelt werden. Im Gegensatz zu luftfahrzeugbasierten Vermessungen mit Laserscannern liegen die Messpunkte nicht gleichmäßig verteilt vor. Die Scanner im MoSES digitalisieren den Straßenraum profilweise, so dass innerhalb eines Profils sehr dichte Abtastungen der Straße vorliegen während zwischen den Profilen keine Messinformation gewonnen werden kann (vgl. Kap. 4.2.2 und 8.3.2).

8.3.1. Mathematisches Modell

Die ausgleichende Flächenfunktion für jeden Rasterpunkt muss die tatsächlichen geometrischen Gegebenheiten der Fahrbahn möglichst exakt wiedergeben. Eine kurze Darstellung der Möglichkeiten zur mathematischen Beschreibung von Oberflächen findet sich zum Beispiel in [Shahrabi (2000)]. Bei der Modellbildung für die Fahrbahndecke kann davon ausgegangen werden, dass die Fläche näherungsweise eben ist. Kleine Unstetigkeiten sowie wellenförmige Strukturen sollen aber korrekt modelliert werden. Für die Modellbildung kommen folgende explizite Flächendarstellungen in Betracht:

lineares Modell:

$$h_{i,j} = f(N_{i,j}, R_{i,j}) = a_0 + a_1 \cdot \Delta N_{i,j} + a_2 \cdot \Delta R_{i,j}$$

quadratisches Modell:

$$h_{i,j} = f(N_{i,j}, R_{i,j}) = a_0 + a_1 \cdot \Delta N_{i,j} + a_2 \cdot \Delta R_{i,j} + a_3 \cdot \Delta N_{i,j}^2 + a_4 \cdot \Delta R_{i,j}^2 \quad (8.3)$$

harmonisches Modell:

$$h_{i,j} = f(N_{i,j}, R_{i,j}) = a_0 + a_1 \cdot \sin(\Delta N_{i,j} \cdot \pi) + a_2 \cdot \sin(\Delta R_{i,j} \cdot \pi) + a_3 \cdot \cos(\Delta N_{i,j} \cdot \pi) + a_4 \cdot \cos(\Delta R_{i,j} \cdot \pi)$$

mit:	$\Delta N_{i,j} = N_{i,j} - N_0$	Koordinatendifferenzen zum zentralen Bezugspunkt
	$\Delta R_{i,j} = R_{i,j} - R_0$	für das jeweilige Modell, z.B. dem Schwerpunkt
	$N_{i,j}, R_{i,j}, h_{i,j}$	Koordinaten des Rasterpunktes
	N_0, R_0	Koordinaten des zentralen Bezugspunktes
	a_0, \dots, a_4	Parameter der jeweiligen Fläche

Die Eigenschaften der verschiedenen Modelle lassen sich durch die Untersuchung der Präzision bei der Annäherung einer realitätsnahen Sollfläche beurteilen (siehe Abb. 8.5). Die

Bezeichnung	lineares Modell	quadratisches Modell	harmonisches Modell
Standardabweichung [mm]	5,8	0,5	0,5
minimale Abweichung [mm]	-11,8	-1,0	-0,9
maximale Abweichung [mm]	11,8	1,0	0,9

Tabelle 8.1.: Abweichungen der jeweiligen Modelle zur Sollfläche.

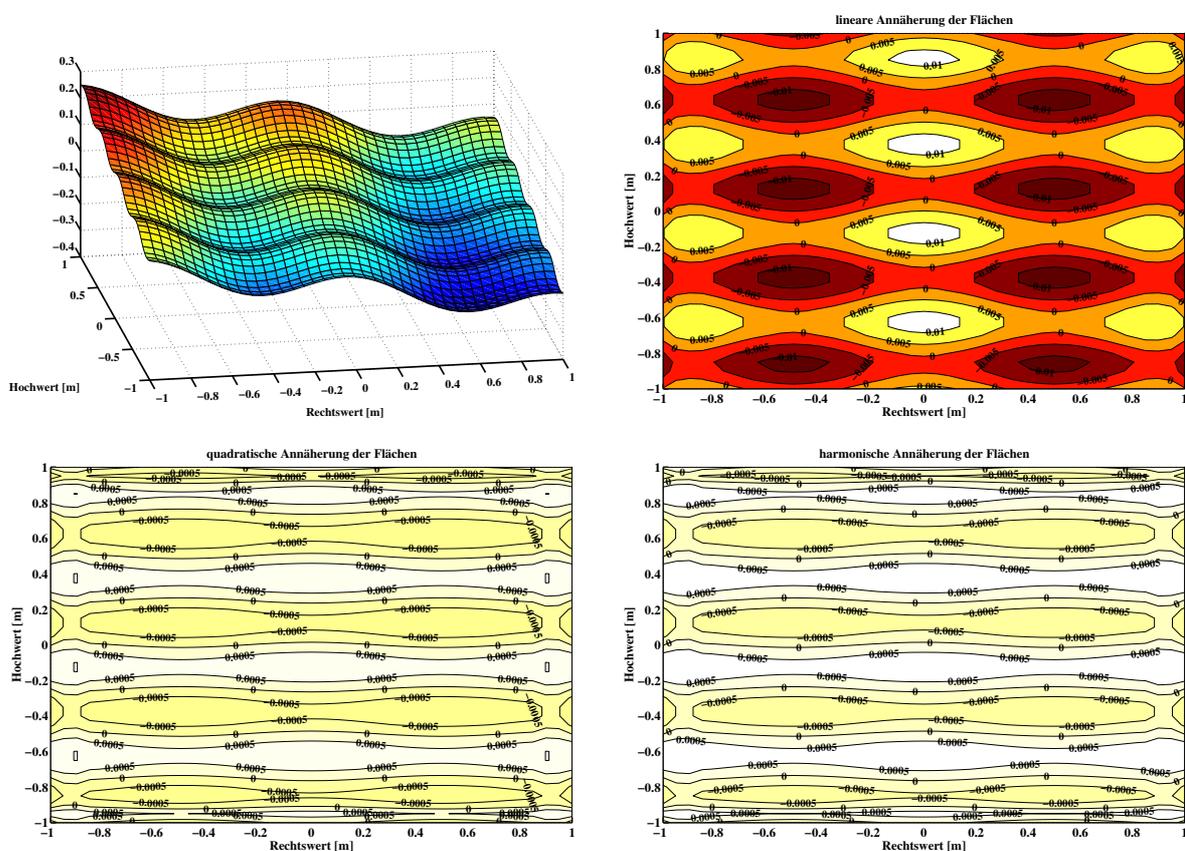


Abbildung 8.5.: Abweichungen bei der Annäherung an eine Sollfläche (oben links) mit dem linearen (oben rechts), dem quadratischen (unten links) und dem harmonischen Modell (unten rechts).

Sollfläche mit einer Größe von 2 m^2 wurde mit Hilfe einer Flächensimulation erzeugt und enthält 1681 Punkte ohne Messrauschen. Die Neigung der Fläche beträgt in jeder Koordinatenrichtung 10 %. Zusätzlich weist die Fläche in Längsrichtung 2 parallel laufende, 10 cm tiefe Rinnen und in Querrichtung 4 jeweils 4 cm hohe Rippen auf. Die Flächenparameter für die drei verschiedenen Modelle wurden punktweise bezogen auf eine Rasterweite von 5 cm durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen geschätzt. Zur Ermittlung der optimal angenäherten, lokalen Fläche wurden Messpunkte innerhalb eines Quadrates von 30 cm

Kantenlänge um den Rasterpunkt verwendet. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 8.1. Die Abweichungen für das harmonische und das quadratische Flächenmodell unterscheiden sich nicht, während die lineare Näherung für die Oberfläche unter gleichen Bedingungen um den Faktor 10 schlechter abschneidet. Beim Test mit tatsächlichen Messdaten hat sich der quadratische Flächenansatz als etwas robuster erwiesen und wurde daher für die praktische Anwendung ausgewählt.

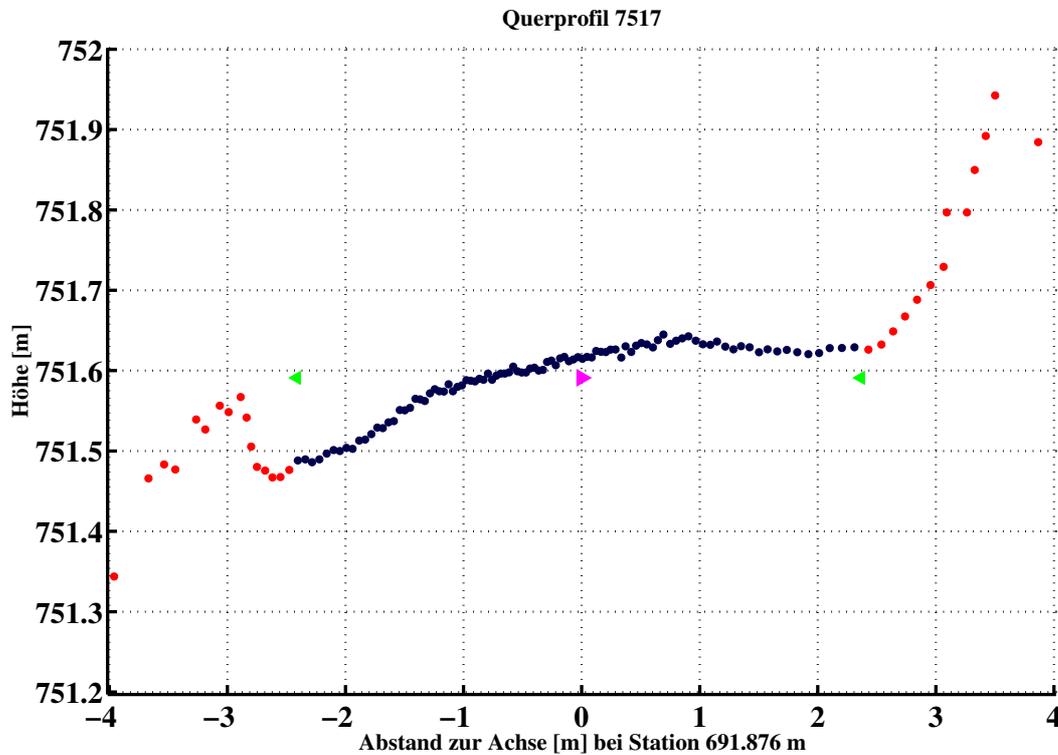


Abbildung 8.6.: Beispiel für ein Scanprofil entlang der Strecke in Abb. 8.4. Die Punkte auf der Fahrbahnfläche sind in schwarz, die Punkte außerhalb in rot eingezeichnet.

8.3.2. Organisation der Beobachtungen

Die Berechnung eines digitalen Fahrbahnoberflächenmodells erfordert sorgfältige Datenorganisation. Die Laserscannerdaten sind nicht homogen über die Fahrbahnfläche verteilt. Die Messungen liegen in hoher Dichte in Scanprofilen vor, in deren Zwischenräumen in Fahrtrichtung sich dagegen keinerlei Punkte befinden. Abbildung 8.6 zeigt ein Scanprofil entlang der Strecke im Beispiel 8.4. Der Abstand der Scanprofile hängt von der Fahrgeschwindigkeit ab und die Punktdichte im Profil verändert sich mit dem Abstand zum Scanner (vgl. Abb. 4.5). Die Profile können außerdem von verschiedenen Scannern und auch aus verschiedenen Messfahrten stammen, sofern die Fahrten vor der Berechnung homogenisiert worden sind (siehe Kap. 7). Zur Vorbereitung der Berechnungen werden alle gemessenen Punkte nach Formel (7.8) auf die Fahrbahnachse abgebildet und anhand von Station und Abstand dem jeweils nächstliegenden Rasterpunkt zugeordnet. Die Schätzung der Punkthöhe über eine ausgleichende Fläche ist rechentechnisch aufwändig, hat aber den Vorteil, dass sowohl die inhomogene Verteilung als auch die hohe Redundanz der Messpunkte bei der Höhenbestimmung berücksichtigt werden. Der Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass ein Flächenmodell die Bruchkanten, z.B. bei Schlaglöchern, nur bei großer Dichte der Messpunkte korrekt abbildet.

Bruchkanten müssen aus diesem Grund bei hohen Genauigkeitsforderungen separat bestimmt werden. Die Ermittlung der Flächenparameter durch eine Ausgleichung ist nur zuverlässig, wenn genügend Beobachtungen in stabiler geometrischer Konstellation zur Verfügung stehen. Daraus ergeben sich folgende Bedingungen:

- Die Kantenlänge des umgebenden Quadrates mit den Messdaten für den zu berechnenden Rasterpunkt ist so zu bemessen, dass mindestens Punkte aus 3 verschiedenen Scanprofilen enthalten sind.
- Die Scannerpunkte innerhalb des umgebenden Quadrates für den Rasterpunkt müssen eine gleichmäßige Verteilung aufweisen.
- Rasterpunkte am Rand des Oberflächenmodells, für die nur einseitig verteilte Messdaten vorliegen, können nur berechnet werden, wenn der Abstand zum nächsten Messpunkt weniger als 5 cm beträgt.

Aus den Bedingungen ist ersichtlich, dass einzelne Punkte eines Fahrbahnoberflächenmodells eventuell nicht aus den Messdaten berechnet werden können, z.B. bei Hindernissen auf der Fahrbahnoberfläche (siehe Abb. 6.2). In diesem Fall verbleiben entweder Lücken im Modell oder die fehlenden Punkte werden interpoliert.

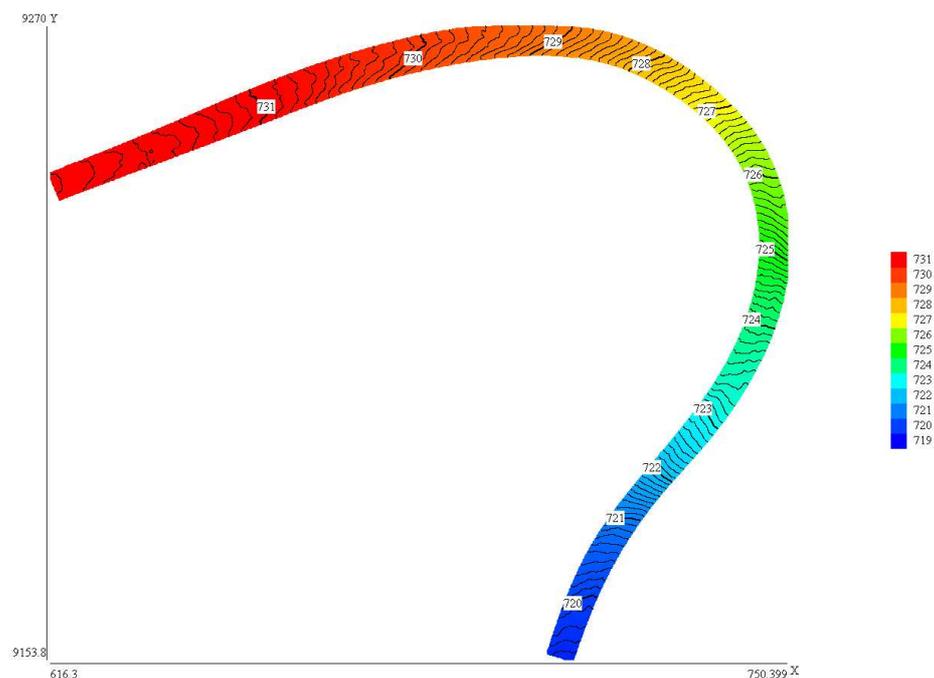


Abbildung 8.7.: Oberflächenmodell mit Höhenlinien für die Strecke in Abb. 8.4.

8.3.3. Ermittlung der ausgleichenden Flächen

Die Parameter der optimal an die Umgebung jedes einzelnen Rasterpunktes angepassten Flächenfunktion werden mit Hilfe einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen geschätzt (siehe Anlage B.1). Aus den Flächenparametern wird die Höhe des Rasterpunktes

ermittelt. Über das Varianzenfortpflanzungsgesetz steht auch die zugehörige Standardabweichung zur Verfügung. Da eine Filterung in Bezug auf grobe Fehler bereits stattgefunden hat (siehe Kap. 6.1) und die Redundanz aufgrund der vielen beobachteten Punkte von zwei oder mehr Scannern sehr gross ist, hat die Einführung robuster Schätzmethoden in diesem Fall untergeordnete Bedeutung. Das digitale Oberflächenmodell in Abbildung 8.7 enthält die Höhenangaben zur Strecke im Abbildung 8.4.

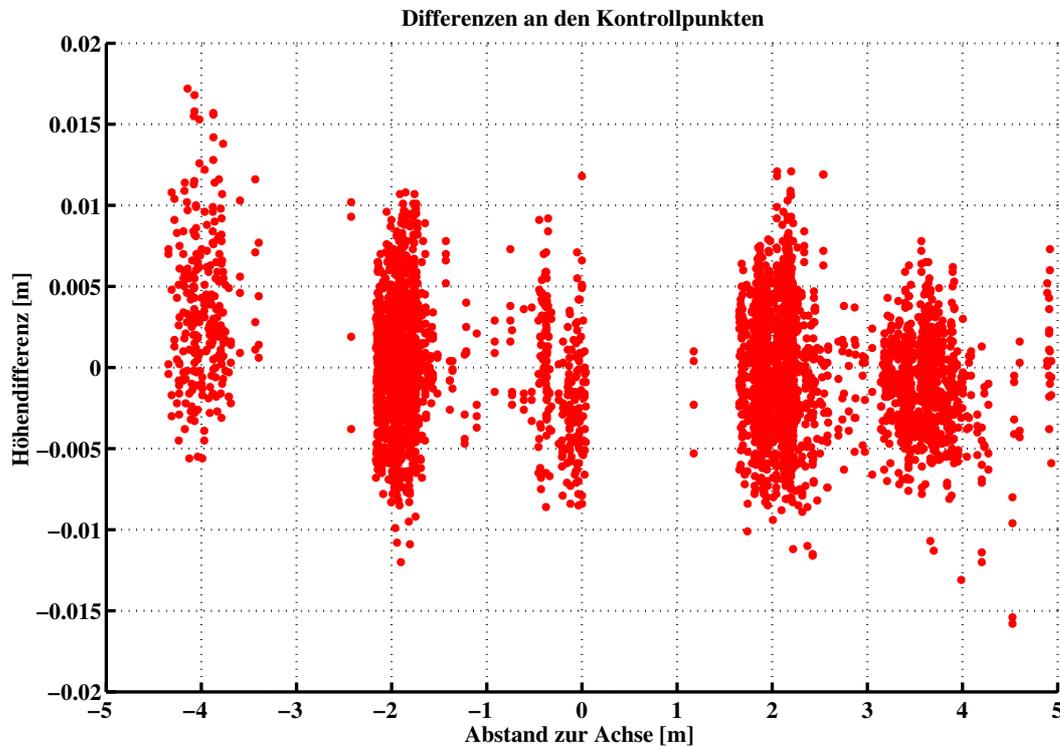


Abbildung 8.8.: Höhendifferenzen aus dem Vergleich von vier unabhängigen Oberflächenmodell-Messungen mit 1113 Kontrollpunkten entlang der Taxiway auf dem Flugfeld der Universität der Bundeswehr.

8.3.4. Genauigkeit der Ergebnisse

Die absolute Genauigkeit der gewonnenen Höhen für das digitale Oberflächenmodell der Fahrbahn sollte in der Größenordnung dem Messrauschen der Laserscanner entsprechen. Dies beträgt 3,7 mm nach den Ergebnissen aus Kapitel 5.3. Zur Bestimmung der Standardabweichung des digitalen Oberflächenmodells wurden entlang der Taxiway auf dem Flugfeld der Universität der Bundeswehr insgesamt 1113 Kontrollpunkte mit einem Präzisionstachymeter vermessen. Die Punkte sind in Profilen angeordnet, die im Abstand von 5 m bis 10 m die Breite der Fahrbahn abdecken. Die Taxiway verfügt für Testzwecke auf einer Länge von ca. 1200 m über die Fahrstreifenmarkierungen einer zweispurigen Autobahn, so dass ein vollständiges digitales Oberflächenmodell für eine Autobahn praxisnah getestet werden kann. Als Kontrollpunkte dienen vor allem Eck- oder Randpunkte der Fahrstreifenmarkierungen. Auf dem Standstreifen wurden zusätzlich Passpunkte für die lokale Koordinatenanpassung markiert (vgl. Kap. 8.1). Die Ergebnisse des Vergleichs von vier unabhängigen Oberflächenmodell-Messungen mit den Kontrollpunkten enthält Tabelle 8.2. Das Oberflächenmodell wurde für jede Messfahrt auf einer Breite von 10 m ausgewertet. Der Messbereich geht damit deutlich über die Ausmaße des Kontrollpunktfeldes hinaus, das für die Untersuchungen in Kapitel 5.3

Bezeichnung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4
Standardabweichung [m]	0,0038	0,0038	0,0035	0,0039
minimale Abweichung [m]	-0,0158	-0,0116	-0,0131	-0,0154
maximale Abweichung [m]	0,0168	0,0108	0,0116	0,0172

Tabelle 8.2.: Vergleich von vier unabhängigen Oberflächenmodell-Messungen mit 1113 Kontrollpunkten entlang der Taxiway auf dem Flugfeld der Universität der Bundeswehr.

verwendet worden ist. Abbildung 8.8 enthält die Höhendifferenzen zu den Kontrollpunkten aus allen 4 Messungen. Insgesamt liegen fast alle Abweichungen innerhalb von ± 1 cm. Ein Bereich am linken Rand weist teilweise höhere Werte auf. Dies kann auf Restfehler der Sensorkalibrierung zurückzuführen sein. Die Ursache für einige Ausreißer liegt vermutlich auch in Verschmutzungen der Fahrbahn. Von links nach rechts scheint ein Trend von ca. $-0,004$ m vorzuliegen. Die Größenordnung entspricht einem Horizontierungsfehler von ca. $0,02^\circ$. In die Winkelabweichung gehen die Messunsicherheit der Lagewinkel der Trajektorie sowie die Messunsicherheit des Winkels $\gamma_{y,s}^f$ ein (vgl. Tab. 3.2 und Tab. 5.2). Die Größenordnung des Winkelfehlers erscheint plausibel. Die resultierende Standardabweichung von 3,8 mm entspricht exakt den Erwartungen und erfüllt die Genauigkeitsforderungen (vgl. Kap. 8.4).

8.4. Anwendungen

Digitale Oberflächenmodelle dienen unter anderem als Grundlage für Fahrsimulationen oder als Referenzdaten bei der Automobilentwicklung [Gräfe et al. (2005)]. Die Hauptanwendung liegt im Bereich der Sanierung von Fahrbahndecken. [Zimmermann (2004)] zum Beispiel beschreibt praktische Anwendungen für die dreidimensionalen Steuerung von Baumaschinen auf der Grundlage von 3d-Modellen der Fahrbahn. Bei der Steuerung von Fräsen und Fertigern ist eine Standardabweichung deutlich unter 1 cm einzuhalten. Dies entspricht den Genauigkeitsforderungen gemäß Tabelle 8.3 für die Absteckung von Straßendeckschichten. Hier wird eine Standardabweichung von 0,004 m für die Höhenbestimmung vorgeschrieben. Das kinematisch erzeugte digitale Oberflächenmodell aus Laserscanner-Messdaten erfüllt die Genauigkeitsforderungen. Damit kann die Vermessung in der Bewegung in direkte Konkurrenz zu traditionellen Messverfahren treten. Gegenüber statischen Methoden bestehen zusätzlich folgende Vorteile:

- Die Messung des Oberflächenmodells erfolgt im fließenden Verkehr. Dies bedeutet eine erhebliche Zeitersparnis bei der Datenerfassung sowie eine deutliche Reduktion der Sicherheitsrisiken verglichen mit statischen Vermessungsverfahren.
- Das digitale Oberflächenmodell aus Laserscannermessungen kann dank automatisierter Berechnungsmethoden in wesentlich kürzerer Zeit erstellt werden.
- Das Oberflächenmodell gibt bei vergleichbarer Genauigkeit die Struktur der Fahrbahnoberfläche sehr viel detaillierter wieder als bisher möglich.
- Die statisch zu bestimmenden Fixpunkte für das lokale Baustellenkoordinatensystem können bei entsprechender Signalisierung als Passpunkte für die lokale Transformation

der Trajektorien verwendet werden (vgl. Kap. 8.1). Festpunkte werden in der Regel alle 150 m vermarktet.

Ein Anwendungsbeispiel für digitale Oberflächenmodelle als Grundlage für die Sanierung von Fahrbahndecken findet sich in [Gräfe (2005)].

Objekt	σ Lage [m]	σ Höhe [m]
Tragschicht	< 0,030	< 0,008
Deckschicht	< 0,030	< 0,004

Tabelle 8.3.: Im Regelfall einzuhaltende Standardabweichungen bei der Absteckung von Objekten des Straßenbaus gemäß [FGSV (2001)].

8.5. Straßenzustandserfassung

Digitale Modelle für Fahrbahnoberflächen lassen sich nicht nur als absolute Höheninformationen nutzen. Zur Berechnung der Höhe für jeden Rasterpunkt wird mit hoher Redundanz über die Messpunkte eine ausgleichende Fläche geschätzt (vgl. Kap. 8.3.1). Die Berechnungsmethode hat eine Glättung der Messdaten zur Folge, die erwarten lässt, dass relative Maße innerhalb des digitalen Oberflächenmodells verglichen mit der Messunsicherheit der Laserscanner-Messdaten mit erhöhter Präzision abgeleitet werden können. Ein Anwendungsgebiet für abgeleitete relative Maße ist die Straßenzustandserfassung mit den Zustandsgrößen der Längs- und Querebenheit (vgl. Kap. 2.3.2).

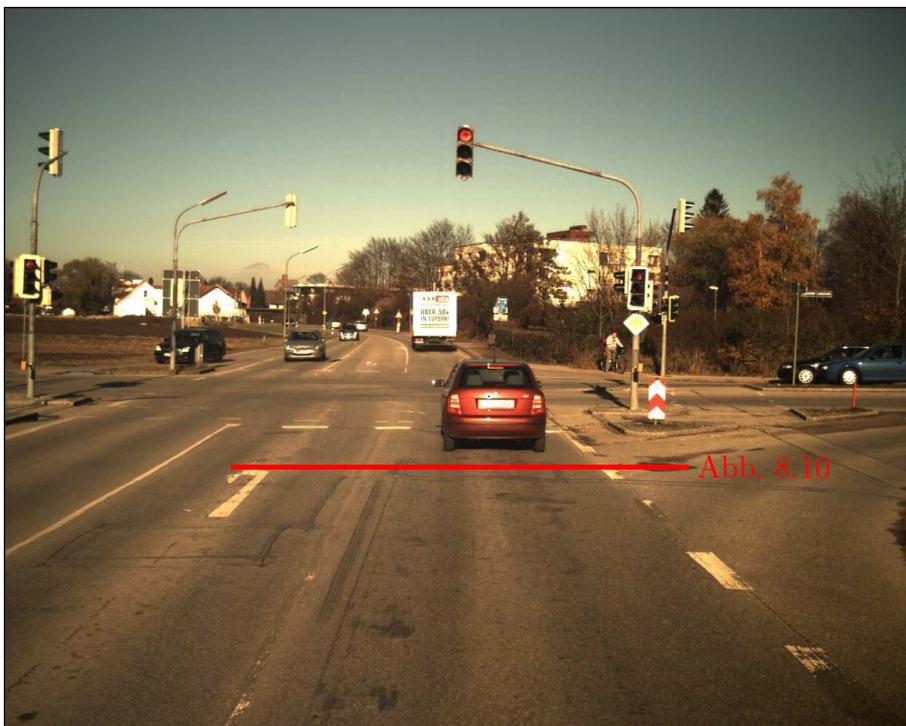


Abbildung 8.9.: Teststrecke für die Analyse der Querebenheit. Die Kreuzung weist erhebliche Ebenheitsmängel im Bereich der Ampelanlage auf.

8.5.1. Ebenheit

Die Berechnungsverfahren sowie die Genauigkeitsforderungen an die Zustandsgrößen der Längs- und Querebenheit sind in den technischen Vorschriften zur Straßenzustandserfassung definiert (vgl. Kap. 2.3.2). Mit einem digitalen Oberflächenmodell ist im Gegensatz zu den etablierten Verfahren zur Straßenzustandserfassung eine flächendeckende Beurteilung der Fahrbahn möglich. In Bezug auf die Ebenheit hat dies zum Beispiel den Vorteil, dass die qualitative Beurteilung unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit und der Fahrlinie des Fahrzeuges ist. Abweichungen von der Ideallinie aufgrund der Fahrweise des Fahrers oder aufgrund von Brems- oder Überholvorgängen haben auf das Ergebnis der Analyse keine negativen Auswirkungen. Die Auswertung ist außerdem nicht auf die befahrene Fahrspur begrenzt (vgl. Kap. 2.3.2). Bei den bisherigen Verfahren kann die Längsebenheit in der Regel nur bezogen auf die rechte Rollspur analysiert werden. Ein digitales Oberflächenmodell dagegen ermöglicht die Ausgabe von Längsprofilen als Parallelen zur Fahrbahnachse zum Beispiel in einem Abstandsraaster von 0,1 m. Jedes Längsprofil steht qualitativ gleichwertig für eine Fourier-Analyse zur Beurteilung der Längsebenheit zur Verfügung. Damit können die Fahreigenschaften der Fahrbahn in Bezug auf verschiedene Spurweiten hypothesenfrei verglichen werden. Untersuchungen dieser Art werden Gegenstand weiterführender Forschungsarbeiten sein. Die Analyse der relativen Genauigkeit im digitalen Oberflächenmodell konzentriert sich in den folgenden Abschnitten auf die Querebenheit.

Bezeichnung	Strecke 1 Hinweg	Strecke 1 Rückweg	Strecke 2 Hinweg	Strecke 2 Rückweg
Anzahl der Oberflächenmodelle	5	5	4	5
Länge der Strecke [m]	166,5	166,5	160,3	160,3
maximale Breite des DGM [m]	5,0	5,0	4,5	4,5
maximale Tiefe [mm]	-40,9	-39,1	-35,8	-31,4
Anzahl der Profile	1667	1667	1605	1605
$ \bar{\Delta} $ maximale Tiefe [mm]	0,69	0,84	0,81	0,78
σ maximale Tiefe [mm]	0,91	1,10	1,07	1,03
Anzahl der verglichenen DGM-Punkte	395755	389060	264692	341990
$ \bar{\Delta} $ Spurrinntiefe [mm]	0,74	0,78	0,70	0,84
σ Spurrinntiefe [mm]	0,97	1,03	0,93	1,10

Tabelle 8.4.: Statistische Analyse der Spurrinntiefe entlang von vier Teststrecken.

8.5.2. Analyse der Querebenheit

Die Querebenheit umfasst insbesondere die Zustandsgrößen Spurrinntiefe und fiktive Wassertiefe. Für die qualitative Analyse dieser abgeleiteten Größen wurden zwei Teststrecken entlang von Bundesstraßen im Raum München jeweils mehrfach im Hin- und Rückweg befahren. Aus den Messdaten wurden für jede Befahrung getrennt nach Hin- und Rückweg

Oberflächenmodelle für die befahrene Fahrspur sowie den angrenzenden Bereich des benachbarten Fahrstreifens errechnet. Insgesamt liegen 19 digitale Oberflächenmodelle mit einer Rasterweite von 0,1 m vor.

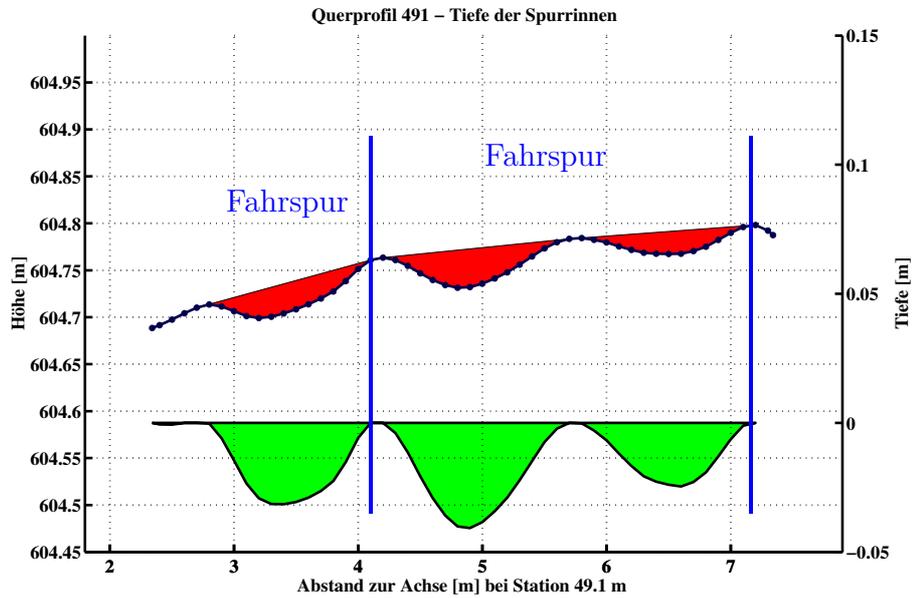


Abbildung 8.10.: Spurrinnenanalyse eines Querprofils im Kreuzungsbereich (vgl. Abb. 8.9). Die Profilkurve sind in schwarz dargestellt. Spurrinnen erscheinen rot. Der untere Bereich der Grafik enthält die Spurrinnentiefe.

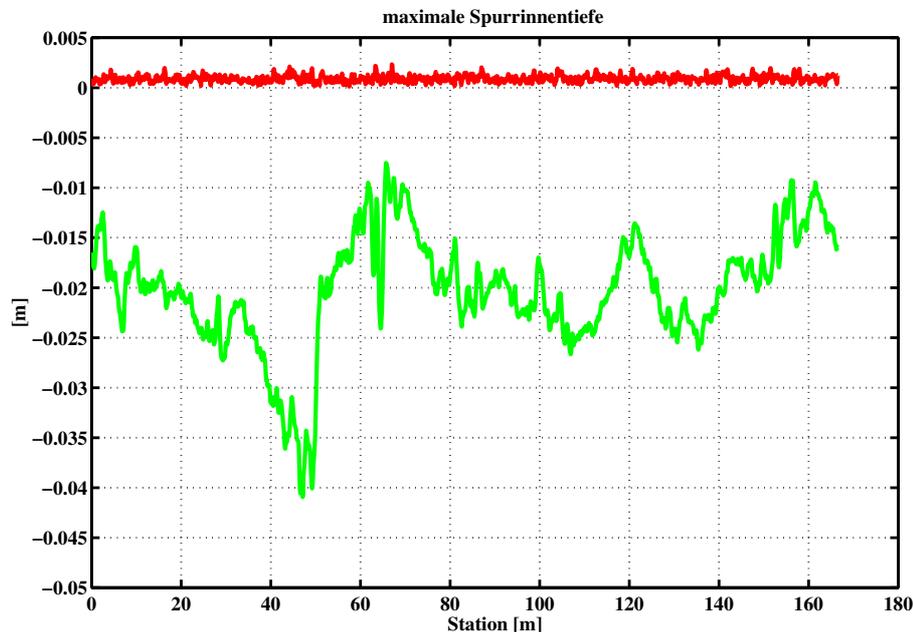


Abbildung 8.11.: Maximale Spurrinnentiefe entlang der Teststrecke 1 (grün) (vgl. Abb. 8.9). Die Standardabweichung (rot) wurde als Wiederholgenauigkeit aus 5 unabhängigen bestimmten Oberflächenmodellen entlang der Strecke errechnet.

Die Teststrecken sind jeweils ca. 160 m lang und weisen entlang dieser kurzen Strecke große Änderungen in der Qualität der Querebenheit auf. In der Mitte der ersten Teststrecke befindet sich eine Kreuzung mit erheblichen Ebenheitsmängeln im unmittelbaren Bereich um

die Lichtsignalanlage (siehe Abbildung 8.9). Die zweite Strecke endet an einem Kreisverkehr und weist im Bereich der Zufahrt deutliche Verformungen der Fahrbahndecke auf.

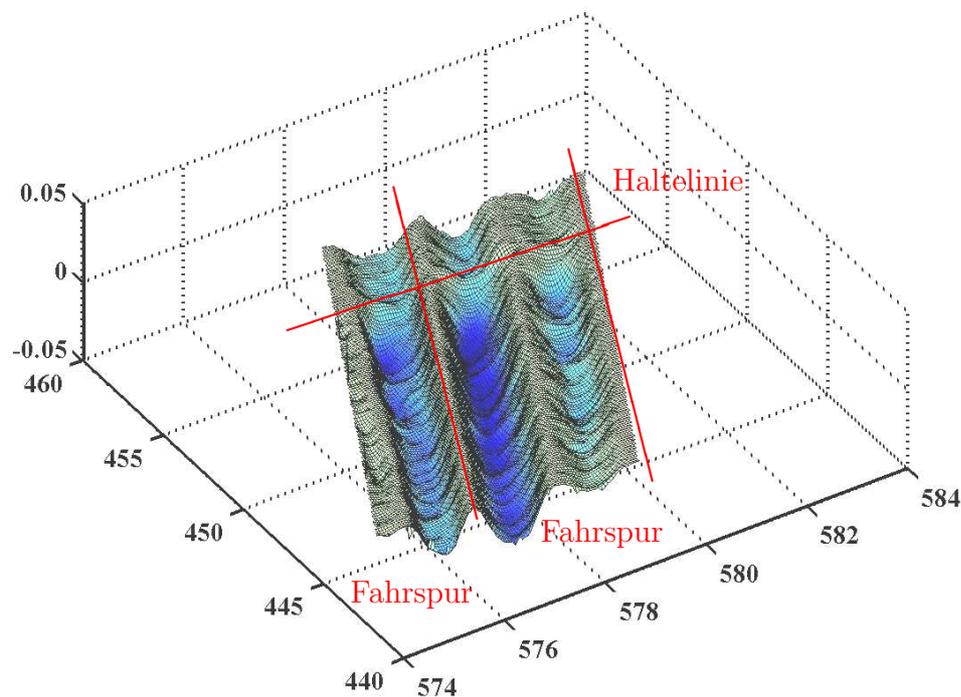


Abbildung 8.12.: 3d-Ansicht der Spurrinntiefe für einen ca. 15 m langen Abschnitt im Kreuzungsbereich der Teststrecke 1 (vgl. Abb. 8.9).

8.5.3. Spurrinntiefe

Die Tiefe von Spurrinnen lässt sich aus den Daten eines digitalen Oberflächenmodells mit Hilfe einer profilweisen Analyse ableiten. Für jedes Querprofil wird eine gleitende 2 m Messlatte simuliert, die jeweils auf den höchsten Punkten der Fahrbahnfläche aufliegt. Der senkrechte Abstand zwischen der Messlatte und den Profilmittelpunkten im eingeschlossenen Bereich ist die Spurrinntiefe (siehe Abb. 8.10 und Abb. 8.12). Zur Bewertung des Straßenzustandes dient die maximale Spurrinntiefe. Abbildung 8.11 enthält den Maximalwert der Spurrinntiefe für alle Profile entlang der Teststrecke 1. Die Spurrinnen im Bereich der Lichtsignalanlage heben sich mit einer Tiefe von 4 cm deutlich hervor. Im übrigen Bereich liegen die maximalen Werte bei ca. 2 cm. Tabelle 8.4 enthält die zusammengefassten Ergebnisse der statistischen Untersuchung der Spurrinntiefe für alle 4 Teststrecken. Die Genauigkeit aus Wiederholungsmessungen liegt homogen im Bereich von 1 mm. Zusätzlich zu der Untersuchung der Maximalwerte wurde auch die Standardabweichung der Spurrinntiefe über die Gesamtheit der Punkte bestimmt, für die in allen Modellen ein Wert ermittelt werden konnte. Die Vorschriften für die Straßenzustandserfassung verlangen neben der Berechnung der Standardabweichung auch den Nachweis des mittleren Betrages der Abweichungen zum Mittelwert $|\bar{\Delta}|$ als Parameter für die Streuung der Messwerte. Die Zustandsgrößen werden bei der Zustandserfassung auf Bundesfernstraßen zwar etwas anders zusammengefasst, aber die festgelegten Grenzwerte können zum Vergleich dienen. Der vorgeschriebene Grenzwert für die Standardabweichung der maximalen Spurrinntiefe liegt für Wiederholungsmessungen

bei 1,5 mm. Der Grenzwert für $|\bar{\Delta}|$ beträgt 0,7 mm (siehe Tabelle 2.3). Tabelle 8.4 zeigt, dass die Anforderungen der Straßenzustandserfassung gemäß [BASt (2001)] erfüllt werden.

8.5.4. fiktive Wassertiefe

Analog zum Vorgehen bei der Ableitung der Spurrinntentiefe wird zur Berechnung der fiktiven Wassertiefe profilweise eine gleitende, horizontale 2 m Messlatte simuliert (siehe Abb. 8.13). Die resultierende Wassertiefe ist aufgrund der Querneigung der Fahrbahn immer kleiner als die entsprechende Spurrinntentiefe. Zur Bewertung des Straßenzustandes dient die maximale fiktive Wassertiefe. Abbildung 8.14 enthält die Maximalwerte aus allen Profilen entlang der Teststrecke 1, wobei wiederum der Ampelbereich mit einem Wert von 3 cm auffällt. Im übrigen Bereich gibt es kurze Abschnitte, in denen das Wasser aus den Spurrinnen abfließen kann, so dass die fiktive Wassertiefe den Wert Null annimmt. Tabelle 8.4 enthält die zusammengefassten Ergebnisse der statistischen Untersuchung für alle 4 Teststrecken. Die Standardabweichung aus Wiederholungsmessungen für die maximale fiktive Wassertiefe liegt teils deutlich unter 1 mm. Das gleiche gilt für die Standardabweichung über die Gesamtheit der Punkte, für die in allen Fahrten ein Wert ermittelt werden konnte. Bei der Zustandserfassung auf Bundesfernstraßen liegt der vorgeschriebene Grenzwert für die Standardabweichung der maximalen fiktiven Wassertiefe für Wiederholungsmessungen bei 1,5 mm. Der Grenzwert für $|\bar{\Delta}|$ beträgt 0,7 mm. Tabelle 8.5 zeigt, dass für diese Zustandsgröße die Anforderungen der Straßenzustandserfassung gemäß [BASt (2001)] sicher erfüllt werden.

Bezeichnung	Strecke 1 Hinweg	Strecke 1 Rückweg	Strecke 2 Hinweg	Strecke 2 Rückweg
maximale Tiefe [mm]	-31,8	-34,0	-29,9	-21,9
Anzahl der Profile	1667	1667	1605	1605
$ \bar{\Delta} $ maximale Tiefe [mm]	0,69	0,75	0,39	0,49
σ maximale Tiefe [mm]	0,91	0,99	0,52	0,65
Anzahl der verglichenen DGM-Punkte	119540	96965	46084	59530
$ \bar{\Delta} $ fiktive Wassertiefe [mm]	0,53	0,59	0,42	0,35
σ fiktive Wassertiefe [mm]	0,69	0,78	0,56	0,47

Tabelle 8.5.: Statistische Analyse der fiktiven Wassertiefe entlang von vier Teststrecken.

8.5.5. Bewertung der Ebenheitsanalyse

Die Analyse der Ebenheit anhand digitaler Modelle der Fahrbahnoberfläche erbringt den Nachweis, dass die Anforderungen der Straßenzustandserfassung knapp erfüllt werden. Aufgrund der Analyse der Spurrinntentiefe und der fiktiven Wassertiefe zeigt sich, dass die relative Genauigkeit der Höhen im digitalen Oberflächenmodell durchweg im Bereich von 1 mm oder besser liegt. Verglichen mit der Messunsicherheit der Scannerdaten von 3,7 mm stellt dies einen erheblichen Gewinn dar. Die abgeleiteten relativen Zustandsgrößen können wiederum als digitales Oberflächenmodell dargestellt werden und erlauben auf diese Weise exakte Analysen des Wasserabflusses sowie die punktgenaue Lokalisierung und Beurteilung schadhafter Bereiche der Fahrbahnoberfläche (siehe Abb. 8.12, 8.15 und 8.16).

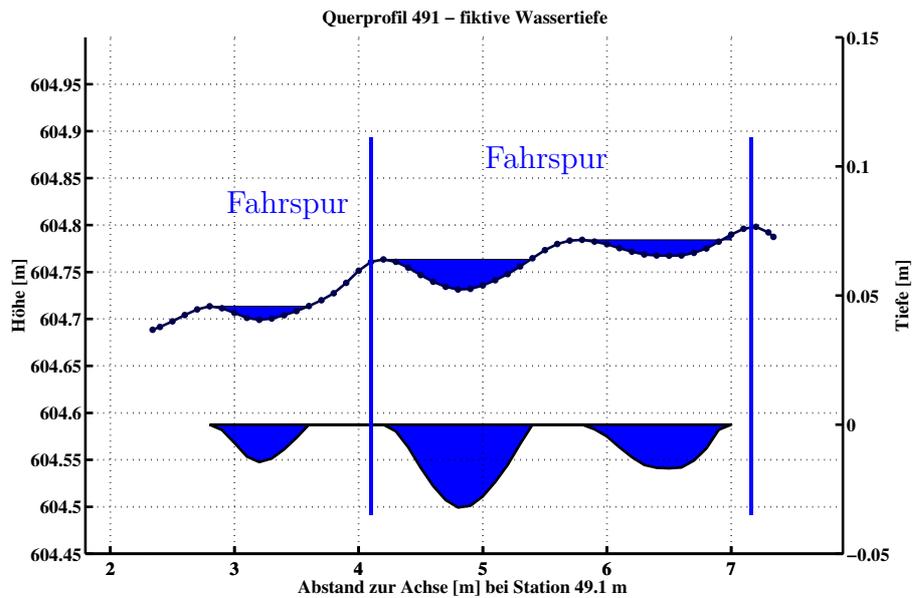


Abbildung 8.13.: Fiktive Wassertiefe eines Querprofils im Kreuzungsbereich (vgl. Abb. 8.9). Die Profilpunkte sind in schwarz dargestellt. Das fiktiv in der Spurrinne stehende Wasser erscheint blau. Der untere Bereich der Grafik enthält die fiktive Wassertiefe.

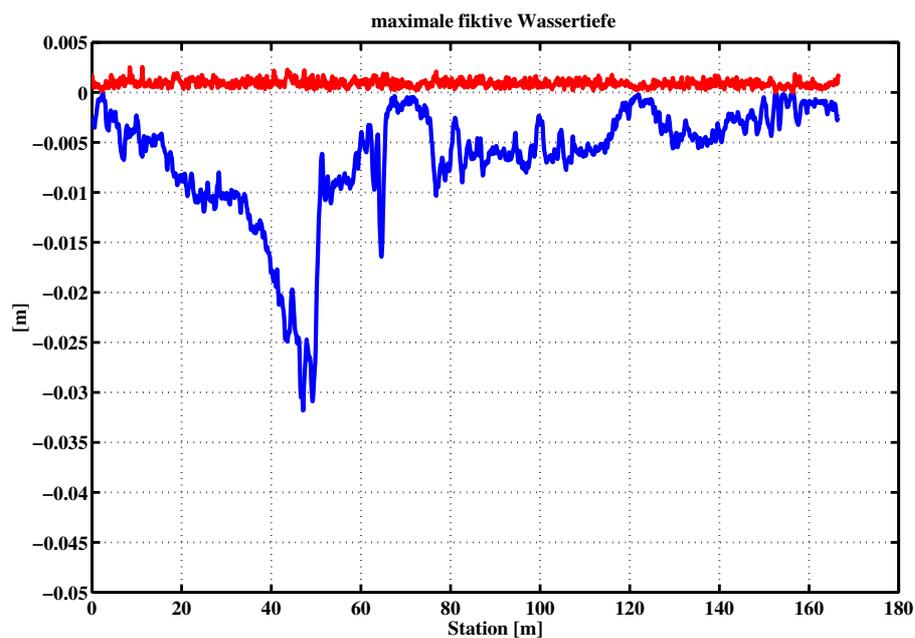


Abbildung 8.14.: Maximale fiktive Wassertiefe entlang der Teststrecke 1 (blau) (vgl. Abb. 8.9). Die Standardabweichung (rot) wurde als Wiederholgenauigkeit aus 5 unabhängig bestimmten Oberflächenmodellen entlang der Strecke errechnet.

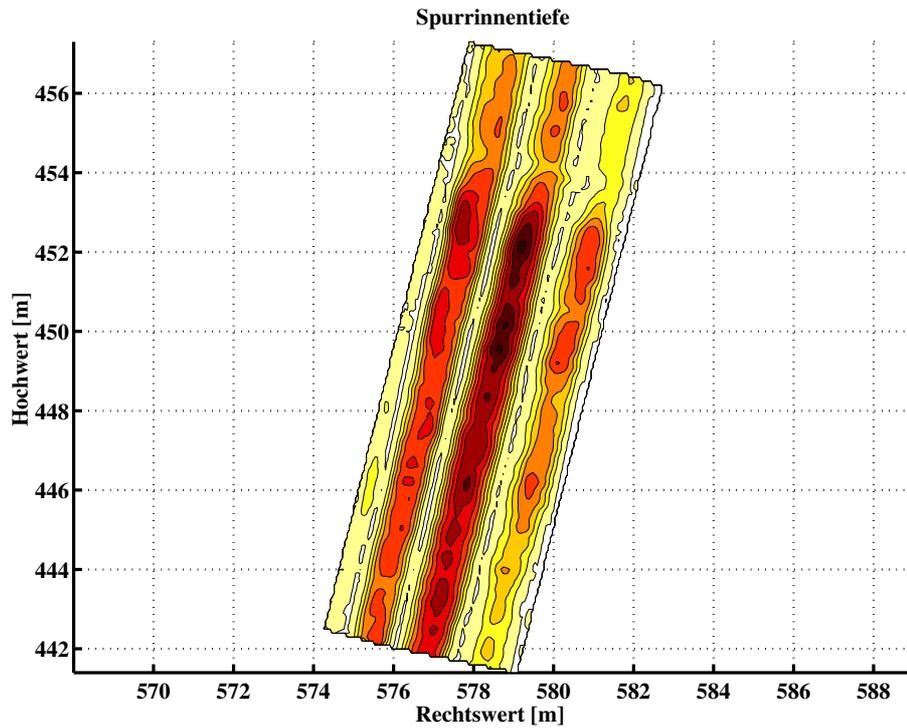


Abbildung 8.15.: Höhenliniendarstellung der Spurrinntiefe zu Abbildung 8.12.

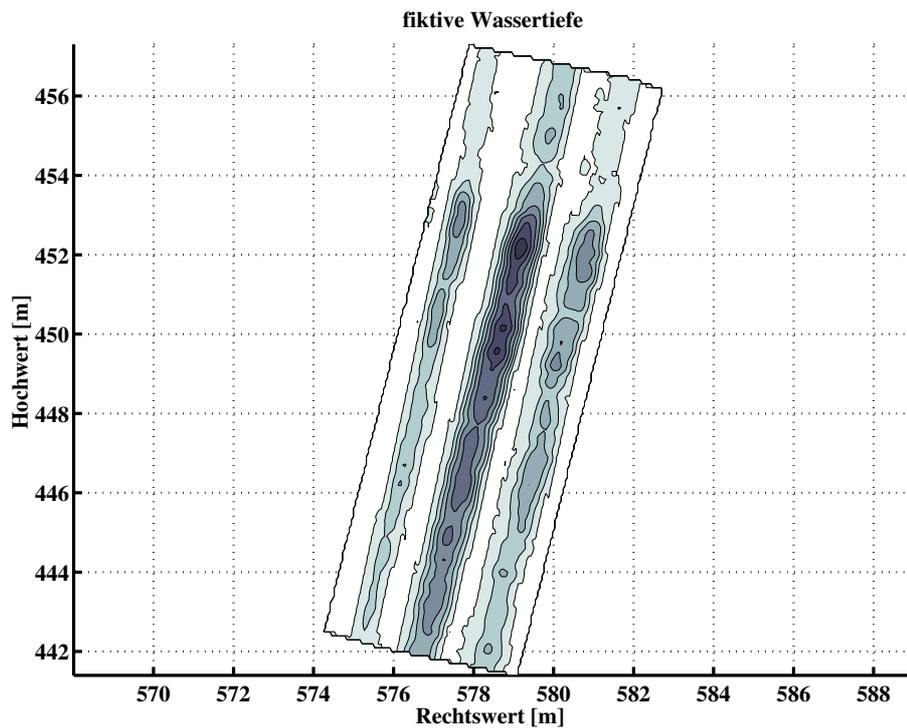


Abbildung 8.16.: Höhenliniendarstellung der fiktiven Wassertiefe zu Abbildung 8.12.

9. Fazit und Ausblick

Kinematische Messverfahren eröffnen neue geodätische Aufgabengebiete oder treten in Teilbereichen an die Stelle konventioneller, stationärer Messmethoden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung von Auswertungsverfahren für kinematisch erfasste Laserscanner-Messdaten. Die Resultate sollen neue Anwendungen für die mobile Vermessung von Verkehrswegen erschließen. Ziel der Entwicklung ist, Ergebnisse im Bereich der Messgenauigkeit der statischen Vermessung zu erreichen.

Das Mobile Straßen-Erfassungs-System (MoSES) wurde seit 1998 als Multisensorsystem zur Erfassung des Straßenraumes aufgebaut. Die Aufnahme des Verkehrskorridors erfolgt mit Kameras und Laserscannern. Eine wesentliche Grundlage für die kinematische Vermessung ist die kontinuierliche Bestimmung von Position und Orientierung für das Messsystem. Um die qualitativ hochwertige Auswertung von Laserscanner-Messdaten zu ermöglichen, muss die Stetigkeit der Trajektorie gewährleistet sein. Zu diesem Zweck wurde ein Qualitätsmanagement entworfen, das jede Trajektorie in Bezug auf Messunsicherheit, Plausibilität und auf Unstetigkeitsstellen prüft. Die aktuellen Filtertechniken für die Trajektorienbestimmung lassen Raum für zukünftige Entwicklungen. Dabei ist eine zunehmend engere Verknüpfung von inertialen Messdaten mit GPS zu erwarten sowie die Entwicklung alternativer Filtertechniken zum Kalman-Filter.

Voraussetzung für die Gewinnung exakter Laserscanner-Messdaten mit kinematischen Methoden ist die präzise Integration der Sensoren in das zugrundeliegende Messsystem. Die Integration umfasst den Messaufbau selbst, die präzise zeitliche Synchronisation, die Sensorkalibrierung und die Zentrierung im Fahrzeugsystem. Für die Sensorkalibrierung der eingesetzten Laserscanner wurde ein Verfahren entwickelt, das die systematischen Fehler für die Messung auf der Fahrbahnfläche kompensiert. Die Korrekturen werden abhängig von der gemessenen Strecke und der reflektierten Intensität auf einer Komparatorbahn ermittelt. Das Ergebnis der Sensorkalibrierung sind Korrekturfunktionen für Entfernung und Remission, die spezifisch auf den Messaufbau im MoSES ausgelegt sind. Das Verfahren zur Gewinnung der Zentrierparameter für die Laserscanner umfasst die Ermittlung von Position und Lagewinkeln in Bezug auf das Fahrzeugsystem sowie die Bestimmung des Nullpunktfehlers für den jeweiligen Scanner. Zur Lösung der Aufgabe wurde ein Verfahren entwickelt, das die spezifischen Eigenschaften der Laserscanner im MoSES berücksichtigt. Kern der Methode ist die Detektion und Vermessung der Spur des Laserscanners auf lokalen Referenzflächen. Die Spurgeraden erlauben die Bestimmung der Zentrierparameter über identische Geraden. Der Erfolg der Sensorintegration der Laserscanner in das Messfahrzeug wurde anhand von Testmessungen entlang von Referenzpunktfeldern überprüft. Es ergibt sich eine Standardabweichung von 4 mm. Dies entspricht der Wiederholgenauigkeit der eingesetzten Scanner. Daraus folgt, dass die Zuverlässigkeit der Kalibrierung so hoch ist, dass die Messwerte der Scanner ohne signifikanten Genauigkeitsverlust mit Hilfe der Trajektorie in das übergeordnete Koordinatensystem überführt werden können. Das Kalibrierverfahren bietet trotzdem Raum für weitere Forschungsarbeiten. Die Bestimmung der Zentrierparameter ist zum Beispiel bisher recht aufwändig und kann zukünftig durch den Einsatz anderer Messverfahren vereinfacht

werden. Zudem kann die Genauigkeit der geometrischen Kalibrierparameter für die Scanner noch gesteigert werden, insbesondere in Bezug auf die Lagewinkel. Um die Genauigkeit der Referenzmessung zu erhöhen, wurde bereits die Vermessung von Referenzflächen mit einem Lasertracker erprobt.

Die Entwicklungen zur Laserscanner-Kalibrierung ermöglichen eine Reihe neuartiger Anwendungen für Laserscanner im Straßenraum. In einem ersten Entwicklungsschritt wurde eine automatische Merkmalsextraktion entworfen. Aus den Messungen der Laserscanner werden Fahrbahnränder und Fahrbahnmarkierungen extrahiert und mit Hilfe eines eigens entwickelten, robusten Filterverfahrens zu Objekten zusammengefasst. Die automatische Objektbildung hat sich bisher unter verschiedenen Umgebungsbedingungen als zuverlässig erwiesen. Die Markierungen und Ränder können als Objekte für Straßendatenbanken Verwendung finden. Für zukünftige Entwicklungen ist zu prüfen, ob die entwickelten Verfahren auch mit Anwendungen aus der Bildverarbeitung verknüpft werden können.

Bei der Erfassung von Daten für Straßenbauverwaltungen oder auch für Fahrerassistenzsysteme tritt die Problematik auf, dass zur vollständigen Aufnahme des Verkehrsweges häufig mindestens zwei Befahrungen nötig sind, deren Ergebnisse sich in der absoluten Lage aufgrund der Messunsicherheit der Trajektorienbestimmung unterscheiden. Zur Lösung dieses Problems wurde ein Verfahren entwickelt, das anhand der extrahierten Fahrbahnmarkierungen die Homogenisierung aller Befahrungen in einem Straßenabschnitt ermöglicht. Die Differenzen zwischen den Trajektorien werden mit Hilfe einer robusten Kalman-Filterung mit anschließender Glättung ermittelt. Nach Korrektur der Trajektorien kann der betreffende Straßenabschnitt nachbarschaftsgenau zwischen allen Befahrungen ausgewertet werden. Die Homogenisierung ist die Grundlage für eine Reihe von neuen Tätigkeitsfeldern für die kinematische Vermessung, z.B. die Bestimmung digitaler Oberflächenmodelle oder auch für die hochwertige Erfassung von Straßennetzen. Die gegenseitige Anpassung der Trajektorien erlaubt zum Beispiel die präzise Bestimmung von Fahrbahnachsen. Die Homogenisierung kann zukünftig erweitert werden, indem die Fahrbahnmarkierungen analog zur Merkmalsextraktion als Zustandsgrößen geschätzt werden. Diese Erweiterung würde die Robustheit und Zuverlässigkeit der Homogenisierung weiter erhöhen.

Passpunkte werden zur Korrektur von Trajektorien eingesetzt, wenn für eine kinematische Vermessung statische Messgenauigkeit gefordert wird. Die Punkte können photogrammetrisch oder aus Laserscannerdaten bestimmt werden. Für höchste Genauigkeitsforderungen ist die Messung der Passpunkte in den Scannerdaten aufgrund der höheren Genauigkeit anzuraten. Ein Schwerpunkt zukünftiger Entwicklungsarbeit ist die Verbesserung der Qualität der stereo-photogrammetrischen Messungen, da für manche Anwendungen höhere Anforderungen gestellt werden, als bislang erfüllt werden können. Mit Hilfe der entwickelten Auswertungsverfahren für kinematisch erfasste Laserscanner-Messdaten wurde bereits eine Reihe von Projekten erfolgreich durchgeführt. Dazu zählen die Aufnahme des Straßenbauamtsbezirks Hameln (siehe Kap. 7.8) sowie weitere Netzerfassungen, z.B. als Referenz für Fahrerassistenzsysteme.

Von besonderem Interesse ist die kinematische Erfassung von Fahrbahndecken mit Laserscannern. Zur Berechnung eines Oberflächenmodells werden die Daten von zwei Scannern pro Messfahrt und ggf. auch die Messwerte weiterer, homogener Messfahrten zu einem gemeinsamen Modell verarbeitet. Das Raster des digitalen Oberflächenmodells folgt dabei der Fahrbahnachse. Die Maschenweite ist variabel und liegt je nach Anwendung zwischen 0,02 m und 1,0 m. Das Ergebnis besteht aus Profilen quer zur Fahrbahnachse. Auf diese Wei-

se können die Berechnungen direkt für Aufgaben des Bauingenieurwesens verwendet werden. Die Genauigkeit der digitalen Oberflächenmodelle wurde mit Hilfe von Kontrollpunkten einer Reihe von Tests unterworfen. Als Ergebnis ergibt sich eine Standardabweichung von 4 mm für die ausgeglichenen Höhen im Modell. Die kinematische Erfassung von Fahrbahnoberflächen mit Laserscannern erfüllt damit die Genauigkeitsforderungen aller Anwendungsgebiete und kann auch für Aufgaben eingesetzt werden, die bisher der statischen Vermessung vorbehalten waren.

Das Spektrum möglicher Anwendungen reicht von der Erfassung von Grundlagendaten für die Sanierung von Fahrbahndecken bis zur Straßenzustandserfassung. Im Bereich der Straßenerhaltung ist ein Schwerpunkt zukünftiger Entwicklungen zu sehen, insbesondere auf dem Gebiet der Analyse der Längsebenheit. Der kinematische Einsatz von Laserscannern ermöglicht punktgenaue Analysen der Fahrbahnebenheit in Quer- und Längsrichtung. Weitere Anwendungsgebiete ergeben sich damit zum Beispiel im Bereich der Bauabnahme oder der Unfallanalyse. Die digitalen Modelle von Fahrbahnoberflächen könnten nicht nur als Grundlage für die Planung, sondern auch als Basis für die Steuerung von Baumaschinen dienen. Ein anderes Tätigkeitsfeld für den fahrzeugbasierten Einsatz von Laserscannern stellt die dreidimensionale, kinematische Erfassung von Brücken- oder Tunnelbauwerken dar.

Für die Zukunft ist für kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum ein breites Betätigungsfeld mit vielen neue Entwicklungen zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- Alamus, R., Baron, A., Bosch, E., Casacuberta, J., Miranda, J., Pla, M., Serra, A., und Talaya, J. (2004). On the Accuracy and Performance of the GEOMOBIL system. In: *Proceedings of the XXth ISPRS Congress - Geo-Imagery Bridging Continents*. Istanbul.
- Applanix (2001). *POS LV Specifications*. Applanix Corporation. Richmond Hill, Canada.
- Applanix (2005). *Product Manual POS LV*. Applanix Corporation. Richmond Hill, Canada.
- ASB (2005). *Anweisung Straßeninformationsbank (ASB)-Teilsystem Netzdaten*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen-Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr. Berlin. Stand April 2005.
- BAST (2001). *Technische Vertragsbedingungen zur Zustandserfassung und -bewertung (TV-ZEB); Ausschreibungsunterlagen zur Zustandserfassung und -bewertung von BAB*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST). Bergisch-Gladbach.
- BAST (2002). *Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA)- Objektübersicht zum OKSTRA*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST). Bergisch-Gladbach.
- Bendafi, H., Hummelsheim, K., und Sabel, H. (2000). Classification of data capturing/production techniques. Technischer Bericht. NextMAP-Project for transport telematics applications.
- Blug, A., Baulig, C., Wölfelschneider, H., und Höfler, H. (2004). Fast Fiber Coupled Clearance Profile Scanner using Real Time 3D-Data Processing with Automatic Rail Detection. In: *Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Seiten 658–663. Parma, Italy.
- Blug, A., Baulig, C., Wölfelschneider, H., und Höfler, H. (2005). Novel Geometry for a High Speed Outdoor Laser Scanning System. In: Grün und Kahmen, Herausgeber, *Proceedings Optical 3D Measurement Techniques VII*. Seiten 154–163. Wien.
- Brammer, K. und Siffling, G. (1994). *Kalman-Bucy-Filter*. Oldenbourg Verlag. München.
- Caspary, W. (1988). Concepts of Network and Deformation Analysis. Technischer Bericht 11. School of Surveying; The University of New South Wales, Kensington, N.S.W., Australia.
- Caspary, W. (2002). Kinematische Messmethoden. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*. 127. Seiten 281–290.
- Caspary, W. und Heister, H. (2002). Aufbau von Datenbanken der Verkehrsinfrastruktur. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*. 127. Seiten 291–298.
- Caspary, W., Heister, H., Klemm, J., und Sternberg, H. (1997). KiSS, a Data Acquisition System for Transportation Infrastructure Management Databases. In: *Proceedings International Symposium on GIS/GPS*. Istanbul.

- Caspary, W., Heister, H., Klemm, J., und Sternberg, H. (2000). Straßenaufnahme durch kinematische Vermessung. In: *Proceedings Ingenieurvermessung 2000*. Seiten 304–310. Stuttgart. Wittwer Verlag.
- Caspary, W. und Wang, J. (1998). Redundanzanteile und Varianzkomponenten im Kalman-Filter. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*. 123. Seiten 121–128.
- Caspary, W. und Wichmann, K. (1994). *Lineare Modelle*. R. Oldenbourg Verlag. München. Algebraische Grundlagen und statistische Anwendungen.
- Claus, K. (2004). Untersuchung von Straßendaten des Mobilien Straßenerfassungssystems MoSES auf die Eignung für Fahrerassistenzsysteme. Diplomarbeit. Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- El-Sheimy, N. und Lavigne, M. (1998). 3D GIS Data Acquisition Using GPS/INS/Video Mobile Mapping System. In: *Proceedings Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*. Seiten 375–380. Eisenstadt.
- FGSV (1985). *Messverfahren und -geräte zur Erfassung des Zustands der Straßenbefestigung*. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln.
- FGSV (1993). *Richtlinien für die Markierung von Straßen RMS—Teil 1 Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen*. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln.
- FGSV (2001). *Richtlinien für die Anlage von Straßen—Teil Vermessung (RAS-Verm)*. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln.
- Fraunhofer(IPM) (2005). *Produktbroschüre Clearance Profile Scanner (CPS)*. Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik(IPM). Freiburg.
- Gelb, A. (1974). *Applied Optimal Estimation*. The Analytic Sciences Corporation & The M.I.T. Press. Cambridge, MA.
- Gillieron, P. Y., Skaloud, J., Levet, Y., und Merminod, B. (2001). A Mobile Mapping System for Automatic Road Data Capture in Real Time. In: Grün und Kahmen, Herausgeber, *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques V*. Seiten 128–136. Wien.
- Gimmler, H., Ammon, D., und Rauh, J. (2005). Straßenprofile: Mobile Messung, prozessgerechte Datenaufbereitung und vollständige Bewertung bereiten die Basis für eine effektive Simulation. Nummer 1912 in VDI-Berichte. Seiten 335–352.
- Glattki, W. und Jakubzig, G. (2004). *Ebenheitsmessfahrzeug zur Fahrbahnoberflächenanalyse EFA*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Bergisch-Gladbach.
- Gontran, H., Skaloud, J., und Gillieron, P. Y. (2003). A Mobile Mapping System for Road Data Capture via a Single Camera. In: Grün und Kahmen, Herausgeber, *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques VI*. Seiten 373–380. Zürich.
- Gräfe, G. (1996). Beiträge zur Sensorkalibrierung und Integration der Sensoren in das System KiSS. Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie. Als Manuskript gedruckt.

- Gräfe, G. (2000). Low-Cost DGPS im kinematischen Einsatz. In: *3. SAPOS-Symposium*. Seiten 58–71. Bayerisches Landesvermessungsamt, München.
- Gräfe, G. (2002). Das Mobile-Straßen-Erfassungs-System MoSES. In: *Beiträge anlässlich des 65. Geburtstages von Professor Caspary, Institut für Geodäsie*. Seiten 133–138. Neubiberg. Hrsg. Prof. Heister und Prof. Reinhardt.
- Gräfe, G. (2003). Mobile Mapping with Laser Scanners using the MoSES. In: Grün und Kahmen, Herausgeber, *Proceedings Conference on Optical 3D Measurement Techniques VI*. Seiten 381–388. ETH Zürich.
- Gräfe, G. (2005). Kinematic Determination of digital Road Surface Models. In: Grün und Kahmen, Herausgeber, *Proceedings Conference on Optical 3D Measurement Techniques VII*. Seiten 21–30. Wien.
- Gräfe, G., Caspary, W., Heister, H., Klemm, J., und Sever, M. (2001). The Road Data Acquisition System MoSES – determination and accuracy of trajectory data gained with the Applanix POS/LV. In: *Proceedings 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology (on CD)*. Cairo.
- Gräfe, G. und Heister, H. (2004). Kinematische Erfassung des Straßenraumes mit Hilfe von Laserscannern. In: *DVW-Seminar: kinematische Messmethoden — Vermessung in Bewegung*. Band 45 der *DVW-Schriftenreihe*. Seiten 245–263. Stuttgart. Wissner Verlag, Augsburg.
- Gräfe, G., Klemm, J., und Sternberg, H. (1998). Das kinematische Vermessungssystem KiSS – Zentrierung der Sensordaten und Transformation ins Fahrzeugsystem. In: *Festschrift: 25 Jahre Institut für Geodäsie an der Universität der Bundeswehr München*. Band 60 der *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München*. Seiten 143–154.
- Gräfe, G., Lang, M., und Banemann, S. (2005). Vermessung von Referenzstrecken für Simulation und Fahrversuch mit dem Mobilien-Straßen-Erfassungs-System (MoSES). In: *VDI-Tagung: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung*. Band 1900 der *VDI-Berichte*. Seiten 311–326. Würzburg. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Grejner-Brzezinska, D., Toth, C., und Xiao, Q. (2000). Real-time Tracking of Highway Linear Features. In: *ION GPS*. Salt Lake City, Utah. CD-ROM.
- Gruß, J. (2005). *Der Betrieb von Straßen-Video-Meßsystemen aus vermessungstechnischer Sicht*. Gerolstein. Curriculum.
- Heinz, I., Mettenleiter, M., Härtl, F., Fröhlich, C., und Langer, D. (2001). 3D Ladar for Inspection of Real World Environments. In: Grün und Kahmen, Herausgeber, *Proceedings Conference on Optical 3D Measurement Techniques V*. Seiten 10–17. Wien.
- Heister, H. (1988). Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmessinstrumente. Band 27 der *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg. Habilitationsschrift.
- Heister, H., Caspary, W., Hock, C., Klemm, J., und Sternberg, H. (1995). KiSS – a hybrid measuring system for kinematic surveying. In: Linkwitz, K. und Hangleiter, U., Herausgeber, *High Precision Navigation 95, Proceedings*. Seiten 561–568. Bonn. Ferd. Dümmler Verlag.

- Heister, H. und Gräfe, G. (2004). Projekterfahrungen beim Einsatz der kinematischen Messsysteme KiSS und MoSES. In: *58. DVW-Seminar: kinematische Messmethoden - Vermessung in Bewegung*. Band 45 der *DVW-Schriftenreihe*. Seiten 95–111. Stuttgart. Wissner Verlag, Augsburg.
- Hovenbitzer, M. (2003). *Zur Automation berührungsloser 3D Objekterfassung im Nahbereich*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- Ingensand, H., Ryf, A., und Schulz, T. (2003). Performances and Experiences in Terrestrial Laserscanning. In: Grün und Kahmen, Herausgeber, *Proceedings Conference on Optical 3D Measurement Techniques VI*. Seiten 236–243. ETH Zürich.
- Jekeli, C. (2001). *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. de Gruyter Verlag. Berlin.
- Joeckel, R. und Stober, M. (1999). *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. Konrad Wittwer Verlag. Stuttgart.
- Kempkens, E. und Glattki, W. (2001). *Lasersystem Analyse Querebenheit (LSAQ)—Kurzbeschreibung*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Bergisch-Gladbach.
- Klemm, J., Caspary, W., und Heister, H. (1997). Photogrammetric Data Organisation with the Mobile Surveying System KiSS. In: *Optical 3D Measurement Techniques*. Seiten 300–308. Zürich.
- Knickmeyer, E., Knickmeyer, E., und Nitschke, M. (1996). Zur Auswertung kinematischer Messungen mit dem Kalman-Filter. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung*. Band 22 der *DVW-Schriftenreihe*. Seiten 141–166. Stuttgart. Wittwer Verlag.
- Koch, K. R. (1997). *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. Dümmler Verlag. Bonn.
- Lapucha, D. (1990). GPS/INS Trajectory Determination for Highway Surveying. In: *Proceedings Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing*. Seiten 372–381. Banff. Springer-Verlag.
- Lindenberger, J. (1993). *Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme*. Dissertation. Universität Stuttgart, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Stuttgart.
- Lippold, C., Weise, G., Pietzsch, D., Ebersbach, D., und Dietze, M. (2004). Kinematische Erfassung von Straßendaten für die Straßeninformationsbank. *Zeitschrift Straßenverkehrstechnik*. 6. Seiten 276–283.
- Loffeld, O. (1990). *Estimationstheorie—Band I und II*. Oldenbourg Verlag. München.
- Löwenau, J., Bendafi, H., Hummelsheim, K., Entenmann, V., Marquet, J., Lilli, F., und Sabel, H. (2002). Final enhanced map database requirements. Technischer Bericht. NextMAP-Project for transport telematics applications.
- MMT (2004). *VISAT Van – Road and Highway Mapping*. Mobile Mapping Technologies Inc.

- Mönicke, H. J. (1996). Kinematik im Vermessungswesen - Messtechnik und Abgrenzung zu statischen Verfahren. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industriemessung*. Band 22 der *DVW-Schriftenreihe*. Seiten 32–52. Stuttgart. Wittwer Verlag.
- Müller, J. (1999). *Homogenisierung dreidimensionaler Szenarien nach der Methode der kleinsten Quadrate*. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH). Aachen.
- Niemeier, W. (2002). *Ausgleichsrechnung*. de Gruyter Verlag. Berlin.
- Niemeier, W. und Jungmichel, M. (2005). 3D Laserscanning für die Unfallstellendokumentation. In: *VDI-Tagung: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung*. Band 1900 der *VDI-Berichte*. Seiten 375–390. Würzburg. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Nöcker, G., Mezger, K., und Kerner, B. (2005). Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme (FAS 2005)*. Waltling.
- Novak, K. (1991). Integration von GPS und digitalen Kameras zur automatischen Vermessung von Verkehrswegen. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF)*. 59. Seiten 112–120.
- Oertelt, S. (1999). *Katalog typischer Zustands- und Schadensbilder auf Bundesautobahnen - Anlage zum Abschlussbericht zum Projekt FE 09.100/ 1995*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). München.
- Otto, K. (1998). Messwerterfassung, Modellbildung, Zustandsschätzung (Real-Time-Auswertung und rekursive Kalman-Filter). In: *Hybride Vermessungssysteme*. Band 29 der *DVW-Schriftenreihe*. Seiten 33–62. Neubiberg. Wittwer Verlag.
- Pfeil, R. (1999). Das Lasermesssystem LMS 200 – Entwicklung von Mess- und Auswertemethoden. Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie. Als Manuskript gedruckt.
- Phoenix (2005). *Produktbroschüre PPS-2000*. Phoenix Scientific Inc.. San Marcos, Kalifornien, USA.
- Portele, C. und König, D. (2000). Standardisierung graphischer Daten im Straßen- und Verkehrswesen Teil 2 - Realisierung. Band 782 der *Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (BMVBW)*.
- Rauterberg, K. und Brülle-Drews, C. (2004). Die Weiterentwicklung der Fahrzeugnavigation. 3. Hamburger Forum für Geomatik – Abstracts und Vorträge. Hamburg. Im Internet veröffentlicht unter www.haw-hamburg.de/fh/fb/v/forum2004.
- Reshetyuk, Y. (2006). *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. Dissertation. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy. Stockholm.
- Rickert, T. (2002). Automatische Achse: der Praxistest. In: *CARD/1 – Anwendermagazin interAKTIV*. Band 2/2002. IB&T, Norderstedt.
- Riegl (2005). *Produktbroschüre LMS-Q250i*. Riegl GmbH. Horn, Österreich.

- SBVNS (2000). *Anforderungskatalog zur Aufnahme von Netz- und Bestandsdaten für die Niedersächsische Straßenbauverwaltung*. Niedersächsische Straßenbauverwaltung. Hannover.
- Scherzinger, B. (2000). Precise Robust Positioning with Inertial/GPS RTK. In: *Proceedings of IONGPS-2000*. Salt Lake City, UH.
- Schlemmer, H. (1996). *Grundlagen der Sensorik*. H. Wichmann Verlag. Heidelberg.
- Schmuck, A. (1987). *Straßenerhaltung mit System—Grundlagen des Managements*. Kirschbaum Verlag. Bonn.
- Schödlbauer, A. (1982). *Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung*. Band Teil 1 – 3. Herbert Wichmann Verlag. Karlsruhe.
- Schraut, M. (2000). *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation. Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. München.
- Schrick, K. (1977). *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik – Anleitung und Beispiele*. Oldenbourg Verlag. München.
- Schuhmann, R. (2002). Mobile Erfassung von Lichtraumprofilen mit Laserscannern. Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie. Als Manuskript gedruckt.
- Schulz, T. und Ingensand, H. (2004). Laserscanning—Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen. In: Luhmann, Herausgeber, *Beiträge der 3. Oldenburger 3D-Tage*. Heidelberg. H. Wichmann Verlag.
- Schwarz, H. (1998). Mobile Multi-Sensor Systems-Modelling and Estimation. In: Kahmen, Brückl, und Wunderlich, Herausgeber, *Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*. Seiten 347–360. Eisenstadt.
- Schwarz, K. P., El-Sheimy, N., Li, R., und Chapman, M. A. (1994). VISAT-A mobile System for Precise GIS Highway Inventory Applications. In: *Proceedings 3rd International Conference on Land Vehicle Navigation*. Seiten 283–297. Dresden.
- Schwarz, W. (1996). Kinematische Sensoren - Klassifizierung und Leistungsfähigkeit. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industriemessung*. Band 22 der DVW-Schriftenreihe. Seiten 54–97. Stuttgart. Wittwer Verlag.
- Sebald, A. (2000). Extraktion von Straßenkanten aus Laserscannerdaten. Diplomarbeit. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie. Als Manuskript gedruckt.
- Shahrabi, B. A. (2000). *Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from Digital Imagery*. Dissertation. München.
- Sick (2005). *Produktbroschüre LMS 200*. Sick AG. Waldkirch.
- Sigl, R. (1991). *Geodätische Astronomie*. Herbert Wichmann Verlag. Karlsruhe.
- Sternberg, H. (2000). *Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Messsystem*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie. Neubiberg.

- Sternberg, H. und Caspary, W. (1994). Determination of Alignment Elements of surveyed Routes for Geographical Information Systems. In: *Proceedings International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*. Seiten 98–130. Banff, Canada.
- Sternberg, H. und Caspary, W. (2002). Fahrzeugtrajektorie und Trasse als Ergebnisse kinematischer Vermessung. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*. 127. Seiten 298–304.
- Sternberg, H., Caspary, W., und Heister, H. (1998). Determination of the trajectory surveyed by the mobile surveying system KiSS. In: Kahmen, Brückl, und Wunderlich, Herausgeber, *Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*. Seiten 361–366. Eisenstadt.
- Sternberg, H., Caspary, W., Heister, H., Hock, C., und Klemm, J. (1996). Kinematische Anwendungen von INS / GPS. In: *Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industriemessung*. Band 22 der *DVW-Schriftenreihe*. Seiten 98–130. Stuttgart. Wittwer Verlag.
- Sternberg, H., Caspary, W., Heister, H., und Klemm, J. (2001). Mobile Data Capturing on Roads and Railways Utilizing the Kinematic Survey System KiSS. In: *Proceedings 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology (on CD)*. Cairo.
- Stuetze, T. (2004). *Volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für die Erhaltung von Bundesautobahnen*. Dissertation. Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften. Berlin.
- Talaya, J., Alamus, R., Bosch, E., Serra, A., Kornus, W., und Baron, A. (2004). Integration of a Terrestrial Laser Scanner with GPS/IMU Orientation Sensors. In: *Proceedings of the XXth ISPRS Congress—Geo-Imagery Bridging Continents*. Istanbul.
- Toth, C. und Grejner-Brzezinska, D. (2002). Near Real-Time Road Centerline Extraction. In: *Photogrammetric Computer Vision - ISPRS Commission III Symposium*. Graz, Austria.
- TÜV (1989). Prüfung der Meßgenauigkeit für Peiseler-Rad 28. Technischer Bericht. TÜV Bayern - Technisches Prüfzentrum.
- Wang, J. (1997). *Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie. Neubiberg.
- Wehr, A. (1998). Scannertechniken zur dimensionellen Oberflächenbestimmung. In: *Hybride Vermessungssysteme*. Band 29 der *DVW-Schriftenreihe*. Seiten 125–148. Neubiberg.
- Wei, M., Lapucha, D., und Martell, H. (1990). Fault Detection and Estimation in dynamic Systems. In: *Proceedings Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing*. Seiten 201–217. Banff. Springer-Verlag.
- Welsch, W., Heunecke, O., und Kuhlmann, H. (2000). *Handbuch Ingenieurgeodäsie-Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. H. Wichmann Verlag. Heidelberg.
- Wieser, M. und Bartelme, N. (1998). Theory and Practice of Road Databases from the Geodetic Point of View with Respect to Austria. In: *Proceedings Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*. Seiten 418–425. Eisenstadt.

- Zhao, H. und Shibasaki, R. (2003). Reconstructing a textured CAD model of an urban environment using vehicle-borne laser range scanners and line cameras. *Machine Vision and Applications*. 14. Seiten 35–41.
- Zimmermann, D. (2004). Dreidimensional gesteuerte Baumaschinen. In: *Ingenieurvermessung 2004*. Zürich.
- Zoller+Fröhlich (2004). *Produktbroschüre Profiler 5002 und 6000 – 300*. Zoller+Fröhlich GmbH. Wangen.

A. Formeln zur Kalman-Filterung

Die Kalman-Filter-Technik ist das Standardwerkzeug zur Bestimmung von Position und Orientierung für ein kinematisches Messsystem und wurde in der Literatur ausführlich behandelt. Darstellungen zur Herleitung und zum Ablauf der Algorithmen eines Kalman-Filters finden sich zum Beispiel in [Gelb (1974)], [Schrick (1977)], [Loffeld (1990)], [Brammer und Siffing (1994)] oder [Jekeli (2001)].

A.1. Vorwärts-Kalman-Filter

Physikalisch wird das sich bewegende Fahrzeug als dynamisches System betrachtet. Der Zustandsvektor \mathbf{x}_k enthält alle Größen, die zur Beschreibung des dynamischen Modells erforderlich sind. Die Kalman-Filterung erfolgt in differentiell kleinen Zeitintervallen Δt . Der Zustandsvektor $\bar{\mathbf{x}}_k$ zum Zeitpunkt t_k wird mit Hilfe der rekursiven Systemgleichung der Kalman-Filterung (A.1) aus dem vorhergehenden Zustand zum Zeitpunkt t_{k-1} prädiziert.

$$\bar{\mathbf{x}}_k = \mathbf{T}_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{w}_{k-1} \quad (\text{A.1})$$

mit: \mathbf{T}_k Transitionsmatrix
 \mathbf{B}_k Störeingangsmatrix
 \mathbf{w}_{k-1} Prozessrauschvektor

Für die Prädiktion der Varianz-Kovarianz-Matrix $\bar{\mathbf{S}}_k$ ergibt sich:

$$\bar{\mathbf{S}}_k = \mathbf{T}_{k-1} \hat{\mathbf{S}}_{k-1} \mathbf{T}_{k-1}^t + \mathbf{B}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{B}_{k-1}^t \quad (\text{A.2})$$

mit: \mathbf{Q}_{k-1} Varianz-Kovarianz-Matrix des Systemrauschens

Die Beobachtungsgleichung lautet:

$$\mathbf{l}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad \text{funktionales Modell} \quad (\text{A.3})$$

mit: \mathbf{l}_k Beobachtungsvektor
 \mathbf{A}_k Beobachtungsmatrix
 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ Vektor des Beobachtungsrauschens

Die Beobachtungen zum Zeitpunkt t_k lassen sich mit Hilfe eines funktionalen Modells in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen formulieren. Anhand des prädizierten Zustandsvektors $\bar{\mathbf{x}}_k$ lassen sich die Beobachtungen mit Hilfe des Modells vorhersagen und Differenzen mit den tatsächlichen Beobachtungen bilden:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{l}}_k &= \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{x}}_k && \text{prädizierter Beobachtungsvektor} \\ \delta \mathbf{l}_k &= \mathbf{l}_k - \bar{\mathbf{l}}_k && \text{Innovation} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Als Varianz-Kovarianz-Matrix für die Prädiktionsresiduen ergibt sich:

$$\mathbf{S}_{\delta \mathbf{l},k} = (\mathbf{R}_k + \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{S}}_k \mathbf{A}_k^t) \quad (\text{A.5})$$

mit: \mathbf{R}_k Varianz-Kovarianz-Matrix des Beobachtungsrauschens

Als Lösung ergibt sich die sogenannte Verstärkungsmatrix oder auch Kalman-Gain-Matrix:

$$\mathbf{K}_k = \bar{\mathbf{S}}_k \mathbf{A}_k^t (\mathbf{R}_k + \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{S}}_k \mathbf{A}_k^t)^{-1} \quad (\text{A.6})$$

Die Schätzung des Zustandsvektors für die Epoche zum Zeitpunkt t_k und die ausgeglichene Varianz-Kovarianz-Matrix ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \delta l \\ \hat{\mathbf{S}}_k &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{A}_k) \bar{\mathbf{S}}_k \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

mit: \mathbf{I} Einheitsmatrix

Die Kalman-Filterung startet mit den Zustandswerten $\hat{\mathbf{x}}_0$ und der zugehörigen Varianz-Kovarianz-Matrix $\hat{\mathbf{S}}_0$, die je nach Aufgabe in geeigneter Weise festgelegt werden. Bei der kinematischen Positionsbestimmung für ein Landfahrzeug wird üblicherweise mit einem stehenden Fahrzeug begonnen. Die Standardabweichungen für den Start der Filterung werden empirisch nach Erfahrungswerten oder Simulationen so festgelegt, dass diese ein stabiles Einschwingen des Filters ermöglichen.

stochastisches Modell Das Verhalten des Filters wird wesentlich durch das Systemrauschen \mathbf{w}_k im Zusammenwirken mit dem Beobachtungsrauschen $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ bestimmt. Im stochastischen Modell werden die Eigenschaften beider Vektoren modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass es sich in beiden Fällen um weißes Rauschen handelt. Dies beinhaltet, dass der Erwartungswert Null ist und dass beide Vektoren unkorreliert sind, so dass gilt:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{w}_k) &= 0, \\ E(\boldsymbol{\varepsilon}_k) &= 0, \\ \text{Kov}\{\mathbf{w}_k, \mathbf{w}_j\} &= \mathbf{Q}_k \cdot \delta_{k,j}, \\ \text{Kov}\{\boldsymbol{\varepsilon}_k, \boldsymbol{\varepsilon}_j\} &= \mathbf{R}_k \cdot \delta_{k,j} \quad \text{und} \\ \text{Kov}\{\mathbf{w}_k, \boldsymbol{\varepsilon}_j\} &= 0. \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

mit: \mathbf{R}_k Matrix des Beobachtungsrauschens (positiv definit)
 \mathbf{Q}_k Matrix des Systemrauschens (nicht negativ definit)
 $\delta_{k,j}$ Diracsche Deltafunktion

A.2. Suche nach groben Beobachtungsfehlern

Eine optimale Parameterschätzung für den Zustandsvektor $\hat{\boldsymbol{x}}_k$ kann nur unter der Annahme erreicht werden, dass das Modell unter normalen Einsatzbedingungen das erwartete Systemverhalten stabil wiedergibt [Wei et al. (1990)]. Eine Möglichkeit zur Kontrolle des Systemverhaltens ist die Analyse der Prädiktionsresiduen. Eine ausführliche Darstellung findet sich in [Casparly und Wang (1998)] und [Wang (1997)]. Die Innovation zur Epoche k enthält nach Formel (A.4) einen Vergleich zwischen den prädizierten und den tatsächlichen Beobachtungen. Die Residuen setzen sich zusammen aus Beobachtungsfehlern und dem Fehler des prädizierten Zustandsvektors inklusive des Prozessrauschens. Vorausgesetzt dass das Filtermodell das Systemverhalten zufriedenstellend wiedergibt, können die Residuen zur Identifikation grober Fehler genutzt werden. Bei der Auswertung praktischer Messreihen ist es wahrscheinlich, dass Messfehler eines Sensors auftreten und das Ergebnis der Parameterschätzung verfälschen oder unbrauchbar machen können. Die Prädiktionsresiduen werden auf das Vorliegen eines groben Fehlers untersucht. Die Varianz der prädizierten Beobachtungen $\bar{\boldsymbol{R}}_k$ folgt aus dem Varianzenfortpflanzungsgesetz.

$$\bar{\boldsymbol{R}}_k = \boldsymbol{R}_k + \boldsymbol{A}_k \bar{\boldsymbol{S}}_k \boldsymbol{A}_k^t \quad (\text{A.9})$$

Das Kalman-Filter-Modell geht davon aus, dass die Innovation normalverteilt ist. Somit gilt:

$$\delta \boldsymbol{l}_k \sim N(\mathbf{0}, \bar{\boldsymbol{R}}_k) \quad (\text{A.10})$$

Die Identifikation einer fehlerhaften Beobachtung ist einfacher als beim Gauß-Markov-Modell (siehe Anlage B.3), da der prädizierte Zustandsvektor bereits vollständig ist und der Hypothesentest vor der eigentlichen Parameterschätzung stattfinden kann. Dem Prinzip des 'data-snooping' folgend kann dabei jede Beobachtung für sich mit Hilfe eines lokalen Tests auf grobe Fehler untersucht werden. Dabei wird die Innovation unter Annahme einer Nullhypothese gegen eine Alternativhypothese getestet. Für die Testgröße $N_{\delta l_{i,k}}$ zur i -ten Beobachtung gilt:

$$N_{\delta l_{i,k}} = \frac{|\delta l_{i,k}|}{\sqrt{\bar{R}_{ii,k}}} \sim N(0, 1) \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{A.11})$$

mit: $\bar{R}_{ii,k}$ prädizierte Varianz der Beobachtung i
 m Anzahl der Beobachtungen

Die Korrelationen zwischen den Prädiktionsresiduen werden bei der Berechnung der Testgröße vernachlässigt. Die Testhypothese lautet, dass der Erwartungswert eines Residuums den Wert 0 annimmt und normalverteilt ist:

$$H_0 : \quad E(\delta l_{i,k}) = 0 \quad (\text{A.12})$$

Die Alternativhypothese H_A besagt, dass es sich um einen groben Fehler handelt:

$$H_A : \quad E(\delta l_{i,k}) \neq 0 \quad (\text{A.13})$$

Die Nullhypothese H_0 wird angenommen, wenn gilt:

$$-N_{1-\frac{\alpha}{2}} \leq \frac{|\delta l_{i,k}|}{\sqrt{\bar{R}_{ii,k}}} \leq N_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad (\text{A.14})$$

mit: $1 - \frac{\alpha}{2}$ Fraktile der Standardnormalverteilung

Bewährt hat sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 5\%$ als Standardwert. Der Annahmebereich für H_0 beträgt in diesem Fall $100 - \alpha = 95\%$ der Verteilung. Fällt die Stichprobe in diesen Bereich, so gilt H_0 als angenommen, bzw. nicht abgelehnt. Bei der Detektion von Ausreißern bietet sich ein zweiseitiger Test an, bei dem der Verwerfungsbereich am linken und rechten Rand der Verteilung jeweils den Betrag $\frac{\alpha}{2} = 2,5\%$ annimmt (siehe Abbildung B.1). Überschreitet die Testgröße den aus der Verteilung entnommenen Schwellwert, so wird die Nullhypothese verworfen. Da in der Regel über die Zeit sehr viele Beobachtungen für die Filterung zur Verfügung stehen, ist es im Fall einer abgelehnten Messung am einfachsten, diese bei der Filterung der Epoche k nicht zu verwenden. Eine spezielle Variante der Suche nach groben Beobachtungsfehlern ist erforderlich, wenn Beobachtungen in besonderem Maße miteinander korreliert sind und der lokale Test für mehrere Prädiktionsresiduen gleichzeitig durchgeführt werden soll. Dies trifft insbesondere für Koordinaten zu (Beispiel siehe Kap. 6.3.3). Das Verfahren wird von [Wang (1997)] beschrieben. Dabei wird die betreffende Anzahl von f_1 Residuen zum Subvektor $\delta \mathbf{l}_{k,1}$ zusammenfasst, so dass gilt:

$$\delta \mathbf{l}_k = \left(\delta \mathbf{l}_{k,1} \quad \delta \mathbf{l}_{k,2} \right)^t \quad (\text{A.15})$$

Die Varianz der prädizierten Beobachtungen wird entsprechend aufgeteilt:

$$\bar{\mathbf{R}}_k = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{R}}_{k,11} & \bar{\mathbf{R}}_{k,12} \\ \bar{\mathbf{R}}_{k,21} & \bar{\mathbf{R}}_{k,22} \end{pmatrix} \quad \text{oder} \quad \bar{\mathbf{R}}_k^{-1} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{P}}_{k,11} & \bar{\mathbf{P}}_{k,12} \\ \bar{\mathbf{P}}_{k,21} & \bar{\mathbf{P}}_{k,22} \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Für den Subvektor kann nun die Nullhypothese

$$H_0 : \quad E(\delta \mathbf{l}_{k,1}) = 0 \quad (\text{A.17})$$

gegen die Alternativhypothese

$$H_A : \quad E(\delta \mathbf{l}_{k,1}) \neq 0 \quad (\text{A.18})$$

nach der Testgröße

$$\chi_{\delta \mathbf{l}_{k,1}}^2 = \delta \mathbf{l}_{k,1}^t \left(\bar{\mathbf{P}}_{k,11} - \bar{\mathbf{P}}_{k,12} \bar{\mathbf{P}}_{k,22}^{-1} \bar{\mathbf{P}}_{k,21} \right) \delta \mathbf{l}_{k,1} \sim \chi^2(f_1) \quad (\text{A.19})$$

der χ^2 -Verteilung zum Freiheitsgrad f_1 getestet werden. Die obigen Aussagen zum Ansatz der Schwellwerte gelten entsprechend.

A.3. Rückwärts-Kalman-Filter

Das Kalman-Filter berechnet die optimalen Schätzungen für die Zustandsgrößen zu jeder Epoche vom Anfangszustand zum Zeitpunkt t_0 bis zum Ende der Messreihe t_N . Da es sich um eine streng monoton fortschreitende Zeitreihe mit festen Intervallen handelt, kann das System auch in entgegengesetzter Richtung von der Epoche t_N bis zum Beginn bei t_0 durchlaufen werden. In diesem Fall wird das Kalman-Filter als Rückwärts-Filter bezeichnet.

A.4. Glättung

Als Ergebnis der vorhergehenden Berechnungen liegen für jede Epoche k die Zustandsvektoren der Vorwärtsfilterung $\hat{\mathbf{x}}_{k,V}$ und der Rückwärtsfilterung $\hat{\mathbf{x}}_{k,R}$ sowie die dazugehörigen Varianz-Kovarianz-Matrizen $\hat{\mathbf{S}}_{k,V}$ und $\hat{\mathbf{S}}_{k,R}$ vor. Der Zustandsvektor $\hat{\mathbf{x}}_{k,V}$ wird zeitlich vorwärts mit Hilfe der vorhandenen Beobachtungen \mathbf{l}_0 bis \mathbf{l}_k bestimmt, während in das Ergebnis der Rückwärtsfilterung die Beobachtungen \mathbf{l}_N bis \mathbf{l}_k einfließen. Bei den Epochen, zu denen Beobachtungen vorliegen, kommt es bei der Aufdatierung des Filters zu Unstetigkeitsstellen. Die Glättung ist ein Verfahren zur optimalen Kombination der Ergebnisse der Vorwärts- und Rückwärts-Filterung. Der geglättete Zustand $\hat{\mathbf{x}}_{k,g}$ enthält die Informationen der gesamten Zeitreihe $t_0 \leq t_k \leq t_N$ oder eines Ausschnittes davon. Die Genauigkeit der Ergebnisse für die Trajektorienberechnung wird mit Hilfe der anschließenden Glättung signifikant erhöht. Ein Beispiel für einen häufig verwendeten Glättungsalgorithmus ist der Fraser-Mayne-Algorithmus nach Formel (A.20) und (A.21) [Wang (1997)].

$$\hat{\mathbf{x}}_{k,g} = \hat{\mathbf{S}}_{k,g} \left(\hat{\mathbf{S}}_{k,V}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k,V} + \hat{\mathbf{S}}_{k,R}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k,R} \right) \quad (\text{A.20})$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{k,g} = \left(\hat{\mathbf{S}}_{k,V}^{-1} + \hat{\mathbf{S}}_{k,R}^{-1} \right)^{-1} \quad (\text{A.21})$$

Die Zustandsgrößen sind bei der dargestellten Glättungsvariante miteinander korreliert, da sowohl für die Vorwärts- als auch für die Rückwärtsfilterung die Beobachtungen zur Epoche k verwendet werden. Daher wird das Verfahren auch als approximative Fraser-Mayne-Glättung bezeichnet.

B. Formeln zur Ausgleichungsrechnung

Im Verlauf des Darstellungen in Kapitel 5 und Kapitel 8 werden verschiedene Methoden zur Parameterschätzung angewendet. Das Grundproblem der Ausgleichsrechnung besteht darin, dass häufig die gesuchten Parameter nicht direkt beobachtet werden können, sondern mit beobachtbaren Größen über ein funktionales Modell verbunden sind. Mit Hilfe erwartungstreuer Schätzer minimaler Varianz werden die unbekannten Parameter ermittelt und der Einfluss zufälliger Messfehler in den Beobachtungen minimiert. Definitionen der Grundbegriffe der Parameterschätzung finden sich in DIN 1319 und DIN 18709. Ausführliche Darstellungen der verschiedenen Ausgleichungsmodelle sowie zu statistischen Testverfahren finden sich in [Caspary (1988)], [Caspary und Wichmann (1994)], [Koch (1997)], [Welsch et al. (2000)] oder [Niemeier (2002)].

B.1. Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen

Die Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell basiert auf der Schätzung der gesuchten Parameter mit Hilfe eines funktionalen Modells zwischen Beobachtungen und Unbekannten. Die Ausgangsgrößen sind:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} & \text{ Vektor der unbekannt Parameter} \\ \mathbf{l} & \text{ Vektor der Beobachtungen} \\ \mathbf{Q}_l & \text{ Kofaktormatrix der Beobachtungen} \end{aligned} \tag{B.1}$$

Aus der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_l ergibt sich die Varianz-Kovarianz-Matrix(VKM) der Beobachtungen:

$$\begin{aligned} \Sigma_l = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_l & \text{ Varianz-Kovarianz-Matrix(VKM) der Beobachtungen} \\ \sigma_0^2 & \text{ Varianzfaktor} \end{aligned} \tag{B.2}$$

Der Varianzfaktor σ_0^2 wird a priori geeignet gewählt. Für die Berechnung sind daher nur die Kofaktormatrix und damit die Gewichte der Beobachtungen gegeben. Die Dimension des Beobachtungsvektors wird mit m , die des Unbekanntenvektors mit n bezeichnet. Zwischen den gesuchten Parametern und den Beobachtungen besteht der funktionaler Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \mathbf{l} = \mathbf{f}(\mathbf{u}) + \boldsymbol{\varepsilon} & \text{ funktionales Modell} \\ \boldsymbol{\varepsilon} & \text{ wahre Beobachtungsabweichungen} \end{aligned} \tag{B.3}$$

In einem regulären Modell gilt $m \geq n$. Um bei der Parameterschätzung dem Erwartungswert nahe zu kommen, wird eine möglichst hohe Redundanz bzw. ein großer Freiheitsgrad $f = m - n$ angestrebt. Im ersten Auswertungsschritt wird das funktionale Modell linearisiert und Näherungswerte \mathbf{u}_0 für die gesuchten Größen werden eingeführt:

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}_0} \text{ Designmatrix} \tag{B.4}$$

Es ergeben sich Näherungswerte für die Beobachtungen. Der Beobachtungsvektor wird entsprechend gekürzt:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{f}(\mathbf{u}_0) && \text{Näherungswerte für die Beobachtungen} \\ \delta\mathbf{y} &= \mathbf{l} - \mathbf{y} && \text{gekürzter Beobachtungsvektor} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

Unter der Bedingung $\mathbf{v}^t \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{v} \implies \text{Min}$ erhält man:

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= \mathbf{A}^t \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{A}, & \delta\hat{\mathbf{u}} &= \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{Q}_l^{-1} \delta\mathbf{y}, & \hat{\mathbf{u}} &= \mathbf{u}_0 + \delta\hat{\mathbf{u}}, \\ \mathbf{v} &= \mathbf{A} \delta\hat{\mathbf{u}} - \delta\mathbf{y}, & s_0^2 &= \frac{1}{m-n} (\mathbf{v}^t \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{v}), & \mathbf{S}_{\hat{\mathbf{u}}} &= s_0^2 \mathbf{N}^{-1} \\ \mathbf{S}_{\hat{\mathbf{l}}} &= s_0^2 \mathbf{A} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^t, & \mathbf{S}_v &= s_0^2 (\mathbf{Q}_l - \mathbf{A} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^t) \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

mit:	\mathbf{N}	Normalgleichungsmatrix
	$\hat{\mathbf{u}}$	Vektor der ausgeglichenen Unbekannten
	\mathbf{v}	Vektor der Beobachtungsresiduen
	$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v}$	Vektor der ausgeglichenen Beobachtungen
	s_0^2	a posteriori Varianzfaktor
	$\mathbf{S}_{\hat{\mathbf{u}}}$	Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten
	$\mathbf{S}_{\hat{\mathbf{l}}}$	a posteriori Varianz-Kovarianz-Matrix der Beobachtungen
	\mathbf{S}_v	Varianz-Kovarianz-Matrix der Modellresiduen

Die Varianz-Kovarianz-Matrizen der Unbekannten, der Beobachtungen und der Residuen lassen sich ausgehend von den Formeln für $\delta\hat{\mathbf{u}}$ und \mathbf{v} mit Hilfe des Varianzenfortpflanzungsgesetzes angeben. Bedeutung für die statistische Beurteilung des Ergebnisses hat vor allem die Schätzung des Varianzfaktors s_0^2 , der bei korrekter Größenordnung der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_l und korrektem Filtermodell ungefähr den Betrag σ_0^2 annehmen sollte.

B.2. Ausgleichung nach bedingten Beobachtungen mit Unbekannten

Bei der Ausgleichung nach bedingten Beobachtungen mit Unbekannten (Gauß-Helmert-Modell) werden Bedingungsgleichungen $\mathbf{f}(\mathbf{l}, \mathbf{u}) + \mathbf{a} = 0$ formuliert, die Beobachtungen und Unbekannte verknüpfen. Die Ausgangsparameter lauten wie in Formel (B.1). Der Varianzfaktor σ_0^2 wird a priori geeignet gewählt. Die Kofaktormatrix und damit die Gewichte der Beobachtungen stehen aber zur Verfügung. Aus den Restriktionen ergeben sich nach Einführung von Näherungswerten \mathbf{u}_0 für die gesuchten Parameter Widerspruchsgleichungen:

$$\mathbf{w} = \mathbf{f}(\mathbf{l}, \mathbf{u})|_{\mathbf{u}_0} + \mathbf{a} \quad (\text{B.7})$$

Im Einzelfall kann es sinnvoll sein, Restriktionen als zusätzliche Pseudobeobachtungen mit sehr kleiner Varianz einzuführen. Die Begrenzung der Länge der Richtungsvektoren z.B. im Kapitel 5.2.4 wird als Pseudobeobachtung der Größe 1 mit einer Standardabweichung von 10^{-6} definiert. Die Variable m bezeichnet im Fall der bedingten Beobachtungen die Dimension des Vektors der Bedingungsgleichungen. Um den Einfluss der zufälligen Messfehler auf das

Ergebnis möglichst zu begrenzen, wird eine hohe Redundanz $r = m - n$ angestrebt. Im ersten Auswertungsschritt werden die Bedingungsgleichungen linearisiert:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{l}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}_0} && \begin{array}{l} \text{Koeffizientenmatrix} \\ \text{linearisiert nach den Unbekannten} \end{array} \\ \mathbf{B} &= \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{l}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{l}} \right|_{\mathbf{u}_0} && \begin{array}{l} \text{Koeffizientenmatrix} \\ \text{linearisiert nach den Beobachtungen} \end{array} \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

Für die Parameterschätzung gilt im einzelnen:

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= (\mathbf{B} \mathbf{Q}_l \mathbf{B}^t), & \delta \hat{\mathbf{u}} &= -(\mathbf{A}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{w}, \\ \hat{\mathbf{u}} &= \mathbf{u}_0 + \delta \hat{\mathbf{u}}, & \mathbf{v} &= -\mathbf{Q}_l \mathbf{B}^t \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{A} \delta \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{w}), \\ s_0^2 &= \frac{1}{m-n} (\mathbf{v}^t \mathbf{Q}_l^{-1} \mathbf{v}), & \mathbf{S}_{\hat{\mathbf{u}}} &= s_0^2 (\mathbf{A}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \\ \mathbf{S}_{\hat{\mathbf{l}}} &= s_0^2 \left(\mathbf{Q}_l - \mathbf{Q}_l \mathbf{B}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{Q}_l + \mathbf{Q}_l \mathbf{B}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{A}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{Q}_l \right) \\ \mathbf{S}_v &= s_0^2 \left(\mathbf{Q}_l \mathbf{B}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{Q}_l - \mathbf{Q}_l \mathbf{B}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{A}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{Q}_l \right) \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

mit:	\mathbf{N}	Normalgleichungsmatrix
	$\hat{\mathbf{u}}$	Vektor der ausgeglichenen Unbekannten
	\mathbf{v}	Vektor der Beobachtungsresiduen
	$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v}$	Vektor der ausgeglichenen Beobachtungen
	s_0^2	a posteriori Varianzfaktor
	$\mathbf{S}_{\hat{\mathbf{u}}}$	Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten
	$\mathbf{S}_{\hat{\mathbf{l}}}$	a posteriori Varianz-Kovarianz-Matrix der Beobachtungen
	\mathbf{S}_v	Varianz-Kovarianz-Matrix der Modellresiduen

Die Varianz-Kovarianz-Matrizen der Unbekannten, der Beobachtungen und der Residuen lassen sich ausgehend von den Formeln für $\delta \hat{\mathbf{u}}$ und \mathbf{v} mit Hilfe des Varianzenfortpflanzungsgesetzes bestimmen. Wie beim Gauß-Markov-Modell hat vor allem die Schätzung des Varianzfaktors s_0^2 Bedeutung für die statistische Beurteilung des Ergebnisses.

B.3. Detektion von groben Fehlern

Bei der Auswertung praktischer Messdaten tritt das Problem der statistischen Ausreißer auf, die zwar selten sind, aber im Falle des Vorkommens das Ergebnis der Parameterschätzung erheblich verfälschen oder unbrauchbar machen können. Grobe Fehler entstehen durch falsche Punktzuordnungen, Messfehler eines Sensors oder ähnliche Ursachen. Das Auftreten ist unsystematisch. Daher sind alle Beobachtungen, die im Laufe einer Ausgleichung durch hohe Residuen auffallen, auf grobe Fehler zu prüfen. Bei der Parameterschätzung wird davon ausgegangen, dass die Beobachtungen näherungsweise normalverteilt sind. Somit gilt:

$$\mathbf{l} \sim N(\mathbf{A}\mathbf{x}, \mathbf{\Sigma}), \text{ bzw. } \boldsymbol{\varepsilon} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{\Sigma}) \quad (\text{B.10})$$

Die Beobachtungen können vor der Auswertung mit dem Gauß-Markov-Modell nicht auf grobe Fehler getestet werden. Nach der Parameterschätzung ergeben sich nach Formel (B.6) oder (B.9) Verbesserungen \mathbf{v} für die Beobachtungen. Die Verbesserungen sind ebenfalls normalverteilt mit $\mathbf{v} \sim N(\mathbf{0}, s_0^2 \mathbf{Q}_v)$. Für den Fall, dass ein grober Fehler das Ergebnis der Methode der kleinsten Quadrate verzerrt, ist eine Trennung der fehlerfreien Beobachtungen von der fehlerbehafteten Beobachtung aufgrund der Korrelation der Verbesserungen unter Umständen schwierig. Um die Vergleichbarkeit der Testgrößen sicherzustellen, ist eine Normierung der Residuen erforderlich. Für die Detektion von groben Fehlern sind unter anderem die drei folgenden Verfahren gebräuchlich.

standardisierte Verbesserungen Wenn der Varianzfaktor σ_0^2 bekannt ist, gilt für die Normierung:

$$u_i = \frac{|v_i|}{\sigma_0 \sqrt{q_{ii}}} \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{B.11})$$

mit: q_{ii} Diagonalelement von \mathbf{Q}_v

Die Testgröße ist normiert normalverteilt mit $u_i \sim N(0, 1)$. In der Regel ist die wahre Varianz der Gewichtseinheit allerdings unbekannt. Daher wird in den folgenden Testverfahren der empirische Varianzfaktor verwendet.

interne Studentisierung Die Verbesserung v_i geht nach den Formeln (B.6) oder (B.9) in die Schätzung von s_0^2 für die Varianz der Gewichtseinheit ein. Die Normierung mit s_0^2 wird daher als interne Studentisierung bezeichnet:

$$v'_i = \frac{|v_i|}{s_0 \sqrt{q_{ii}}} \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{B.12})$$

Die Testgröße v'_i unterliegt der τ_f -Verteilung, die auf die Student- oder t-Verteilung mit f Freiheitsgraden zurückzuführen ist:

$$\tau_f = \frac{\sqrt{f} t_{f-1}}{\sqrt{f-1 + t_{f-1}^2}} \quad \text{oder} \quad t_f = \frac{\sqrt{f} \tau_{f+1}}{\sqrt{f+1 - \tau_{f+1}^2}} \quad (\text{B.13})$$

externe Studentisierung Die externe Studentisierung ist das rechenaufwändigste Testverfahren. Die Parameterschätzung wird ohne die Beobachtung l_i noch einmal durchgeführt. Aus dem Rechenschritt folgt eine neue Schätzung \bar{s}_0^2 für die Varianz der Gewichtseinheit, die von der Verbesserung v_i unabhängig ist. Die Normierung mit \bar{s}_0^2 wird als externe Studentisierung bezeichnet:

$$\bar{v}_i = \frac{|v_i|}{\bar{s}_0 \sqrt{q_{ii}}} \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{B.14})$$

Die Testgröße \bar{v}_i unterliegt der t-Verteilung mit $f - 1$ Freiheitsgraden.

Detektion von Ausreißern Häufig sind weder der Erwartungswert der ausgeglichenen Größen noch die Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 bekannt, so dass die Detektion von Ausreißern im Regelfall über intern oder extern studentisierte Verbesserungen stattfindet. Die Testhypothese lautet, dass der Erwartungswert einer Verbesserung den Wert 0 annimmt und v_i normalverteilt ist:

$$H_0 : \quad E(v_i) = 0 \quad v_i \sim N(0, \hat{\sigma}_0^2 q_{ii}) \quad (\text{B.15})$$

Die Alternativhypothese H_A besagt, dass es sich um einen groben Fehler handelt:

$$H_A : \quad E(v_i) \neq 0 \quad (\text{B.16})$$

Zur Detektion eines möglichen Ausreißers wird die Testgröße T_i gebildet (siehe Formeln (B.12) und (B.14)). Die Korrelationen zwischen den studentisierten Verbesserungen werden vernachlässigt. Der maximale Wert für \bar{v}_i oder v'_i wird mit einer Testschwelle verglichen, die anhand der Dichtefunktion der jeweiligen Testverteilung festgelegt wird. Bewährt hat sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 5\%$ als Standardwert. Der Annahmehbereich für H_0 beträgt in diesem Fall $100 - \alpha = 95\%$ der Verteilung. Fällt die Stichprobe in diesen Bereich, so gilt H_0 als angenommen bzw. nicht abgelehnt. Überschreitet die Testgröße den aus der Verteilung entnommenen Schwellwert, so wird die Nullhypothese verworfen. Bei der Detektion von Ausreißern bietet sich ein zweiseitiger Test an, bei dem der Verwerfungsbereich am linken und rechten Rand der Verteilung jeweils den Betrag $\alpha/2 = 2,5\%$ annimmt (siehe Abbildung B.1). Die Teststatistik geht davon aus, dass nur jeweils ein Messwert unter

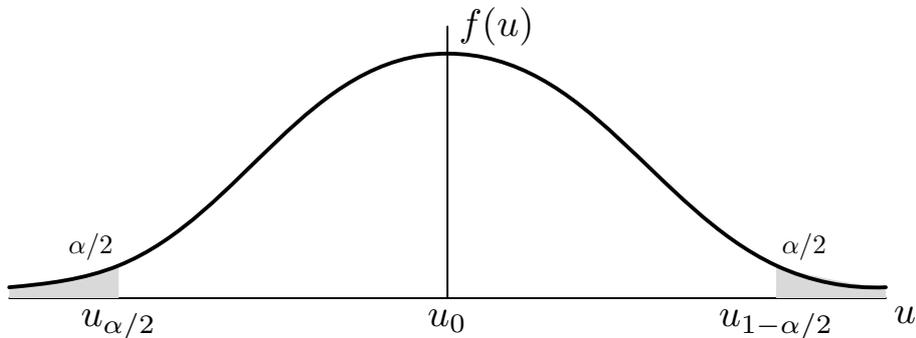


Abbildung B.1.: Zweiseitiger statistischer Test.

den verwendeten Beobachtungen ein grober Fehler ist. Um multiple grobe Fehler, z.B. in einer größeren Beobachtungsreihe, detektieren zu können, erfolgt in der Praxis eine iterative Auswertung bis keine groben Fehler mehr gefunden werden.

Lebenslauf

Name Gunnar Gräfe
Geburtsdatum 5.2.1971
Geburtsort Bad Segeberg / Schleswig-Holstein

Schulbildung

1977 - 1981 Heinrich-Rantzau-Schule in Bad Segeberg
1981 - 1990 Städtisches Gymnasium Bad Segeberg
 Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Beruflicher Werdegang

07/1990 - 06/2002 Offizier der Bundeswehr
07/1990 - 09/1993 Offizierlehrgänge
 Tätigkeit als Zugführeroffizier Artillerie
10/1993 - 12/1996 Studium des Vermessungswesens mit Vertiefungsrichtung Geodäsie
 an der Universität der Bundeswehr München
 Abschluss: Diplom Ingenieur (univ.)
01/1997 - 06/2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mathematik und
 Bauinformatik der Universität der Bundeswehr München
 Forschung in der Arbeitsgruppe integrierte kinematische Vermes-
 sung am Institut für Geodäsie
07/2002 - 12/2002 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Geodäsie
01/2003 - 03/2005 Freiberuflicher Vermessungsingenieur
 Durchführung von Entwicklungs-und Vermessungsprojekten im Be-
 reich der kinematischen Vermessung von Verkehrswegen
04/2005 - 01/2007 Leiter für die Entwicklung von Multisensor-Messsystemen bei der
 Mobile Mapping S&S GmbH
seit 02/2007 Geschäftsführer der 3D Mapping Solutions GmbH