

T. Strübing

Kalibrierung und Auswertung
von Lasertriangulationsbasierten
Multisensorsystemen am Beispiel des
Gleisvermessungssystems RACER II

SCHRIFTENREIHE

INSTITUT FÜR GEODÄSIE

der Bundeswehr
Universität  *München*

T. Strübing

Kalibrierung und Auswertung
von lasertriangulationsbasierten
Multisensorsystemen am Beispiel des
Gleisvermessungssystems RACER II

SCHRIFTENREIHE

INSTITUT FÜR GEODÄSIE

der Bundeswehr
Universität  *München*

Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr München gefördert.

Auflagenhöhe: 50

Druck und Bindearbeiten:

Rechenzentrum der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

Einbanddruck:

Graphische Werbung Böckmann & Burgstaller GbR, Putzbrunn

Herausgeber der Schriftenreihe:

Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

Bezugsnachweis:

**Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
Institut für Geodäsie
D - 85577 Neubiberg**

ISSN 0173 - 1009

**Kalibrierung und Auswertung
von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen
am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II**

Thorsten Strübing

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grads eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Promotionsausschuss:

- Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Thiemann
1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann, Leibniz Universität Hannover

Die Dissertation wurde am 16. Juni 2015 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 17. Juni 2015 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 30. September 2015 statt.

Kurzfassung

Multisensorsysteme werden zur umfassenden und effizienten Datengewinnung eingesetzt, auf deren Basis beispielsweise Planungsgrundlagen geschaffen, Maschinen gesteuert, Qualitätsprüfungen durchgeführt oder Arbeitsschritte dokumentiert werden. Dabei lässt sich das aufzunehmende, zu steuernde oder zu kontrollierende Objekt in Abhängigkeit der integrierten Sensormodule eines Messsystems modellieren. So können neben rein geometrischen Informationen wie Lage, Orientierung, Größe und Oberflächenstruktur im Bedarfsfall auch Eigenschaften wie Material, Farbe oder Temperatur bestimmt werden. Insbesondere im Bereich der Gleisvermessung haben Multisensorsysteme ein weites Anwendungsfeld gefunden.

Die Gleisgeometrie einer Trasse wird durch die Aneinanderreihung einzelner Trassenelemente definiert. Zur Absteckung sowie zur Kontrolle der geometrischen Informationen werden Messprofile in festen Intervallen entlang der Gleisachse bestimmt, wobei aufgrund des sich wiederholenden Messprozesses im Regelfall automatisierte Gleisvermessungssysteme zum Einsatz kommen. Das Gleisvermessungssystem RACER II (Rapid Automated Control Equipment for Rails) bestimmt die Schienengeometrie durch berührungslose Erfassung der Schienenoberfläche auf Basis von Lasertriangulationssensoren und stellt damit ein schnell arbeitendes, verschleißarmes Multisensorsystem dar. Der RACER II wurde speziell für die hohen Genauigkeitsanforderungen zur Kontrolle des Einbaus der Festen Fahrbahn im Gotthard-Basistunnel entwickelt.

Die relative Orientierung der insgesamt vier auf der Multisensorplattform verbauten Lasertriangulationssensoren, deren Kenntnis vorzusehen ist, lässt sich pro Lasertriangulationssensor durch 6 Parameter (3 Translation, 3 Rotationen) beschreiben (6-DoF, Degrees of Freedom). Da weder der Koordinatenursprung noch die Ausrichtung der Koordinatenachsen der Lasertriangulationssensoren direkt signalisierbar sind, müssen die 6-DoF-Parameter indirekt bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Lösungsansätze zur Bestimmung der 6-DoF-Parameter aus unterschiedlichen Referenzgeometrien sowie die konkrete Umsetzung für den RACER II beschrieben.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Ableitung der Gleisgeometrie aus den Messdaten der Lasertriangulationssensoren in Verbindung mit den tachymetrischen Messungen für die Georeferenzierung. Die vorliegende Arbeit leistet hierzu einen Beitrag hinsichtlich der Datenaufbereitung, Segmentierung und Modellierung sowie implementierten Techniken zur Qualitätskontrolle der Messdaten eines Lasertriangulationssensors am Beispiel des RACER II. Die Einhaltung der projektbezogenen Genauigkeitsforderungen konnten durch umfangreiche Validierungsmessungen bestätigt werden.

Stichworte: Multisensorsystem, Lasertriangulationssensor, Kalibrierung, Gleiskontrolle, 6 DoF.

Abstract

Multi sensor systems are used for an extensively and efficiently data acquisition, which leads to the creation of planning criteria, machine control, performing quality testing or documenting workflow, for instance. The recorded object can be modeled or controlled according to the integrated sensor modules of the measuring system. Thus, beside pure geometrical information like position, size and surface structure, characteristics like material, color or temperature can be determined if necessary. Especially at track surveying multi sensor systems have found a wide range of application.

The track geometry of a subgrade is defined by a sequence of individual subgrade elements. Measuring profiles are determined in certain intervals to transfer the geometrical information along the subgrade for pegging and monitoring purpose at which due to the repeating measuring process automated track surveying systems are normally applied. The track surveying system RACER II (rapid automated control equipment for rails) determines the track geometry by contact-free measurement of the rail surface based on laser triangulation sensors and thereby represents a fast and low-wear multi sensor system. The RACER II was specially developed for the high accuracy requirements for monitoring the installation of the slab track within the Gotthard base tunnel.

The relative orientation of the four integrated laser triangulation sensors on the measuring platform, whose knowledge has to be assumed, is described by 6 parameters (3 translations, 3 rotations) for each sensor (6 DoF, degrees of freedom). As neither the point of origin, nor the direction of the coordinate axis of the laser triangulation sensors can be signaled directly, the 6-DoF parameters have to be determined indirectly. Within this thesis, approaches to solve the determination of 6-DoF parameters from different reference geometries as well as the practical implementation for the RACER II are described.

Another focus is the deduction of the track geometry from measuring data of the laser triangulation sensors linked with tachymetric measurements for the georeferencing. For this, this thesis makes a contribution concerning data handling, segmentation and modeling as well as implemented procedures for quality assurance for the measurement data of the laser triangulation sensors by the example of the RACER II. The compliance of project-specific accuracy requirements is confirmed by extensive validation measurements.

Keywords: multi sensor system, laser triangulation sensor, calibration, track control, 6 DoF

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Gleisvermessung	6
2.1	Allgemeine Grundlagen.....	6
2.2	Gleisoberbau.....	7
2.2.1	Gleisbett.....	7
2.2.2	Gleisarten.....	9
2.2.3	Schienenabnutzung.....	10
2.3	Kontrolle der Gleislage.....	12
2.3.1	Gleisvermarkungssysteme.....	12
2.3.2	Ablauf einer Gleisvermessung.....	14
2.3.3	Relative und absolute Gleisvermessung.....	15
2.4	Gleisvermessungssysteme.....	17
2.4.1	Toleranzvorgaben in der Gleisvermessung.....	17
2.4.2	Unterteilung von Gleisvermessungssysteme.....	21
3	Multisensorsysteme	26
3.1	Allgemeines.....	26
3.2	Anforderungen.....	26
3.3	Anwendungsbeispiele für MSS.....	28
3.3.1	Polarmesssysteme.....	28
3.3.2	Mobile Mapping Systeme.....	30
3.4	Konzeption des RACER II.....	31
3.4.1	Allgemeines.....	31
3.4.2	Multisensorplattform.....	35
3.4.3	Eingesetzte Sensorik.....	37
3.4.3.1	Positionierungssensor.....	37
3.4.3.2	Lasertriangulationssensoren.....	39
3.4.3.3	Inklinometer.....	40
3.4.3.4	Meteorologiesensorik.....	40
4	Komponentenkalibrierung	42
4.1	Grundsätzliches.....	42
4.2	Referenzsysteme.....	45
4.3	Sensormodule des RACER II.....	48
4.3.1	Tachymeter.....	48
4.3.2	Lasertriangulationssensoren.....	50

4.3.3	Inklinometer	53
4.3.4	Meteorologiesensorik	54
5	Systemkalibrierung von Lasertriangulationssensoren	56
5.1	Zielgrößen einer 6-DoF-Kalibrierung	56
5.2	6-DoF-Kalibrierung von Lasertriangulationssensoren	58
5.3	Wahl der Referenzgeometrie	61
5.4	Aufstellung des Ausgleichsmodells	64
5.4.1	Stochastisches Modell	65
5.4.2	Messunsicherheitsanalyse nach GUM	65
5.4.3	Aufstellen der Normalgleichungen	68
6	Umsetzung der Systemkalibrierung für den RACER II	69
6.1	Tachymeter	70
6.2	Lasertriangulationssensoren	74
6.2.1	Kalibriervorrichtung	74
6.2.2	Messdatenerfassung	77
6.2.3	Aufbereitung der Messdaten	80
6.2.4	Implementierung des Ausgleichsalgorithmus	86
6.2.5	Genauigkeitsabschätzung der 6-DoF-Parameter	89
6.3	Temperaturausdehnung der Multisensorplattform	94
6.4	In-situ-Prüfung der Multisensorplattform RACER II	97
7	Auswertetechniken von Lasertriangulationssensoren	100
7.1	Objekterkennung	100
7.1.1	Segmentierung	101
7.1.2	Klassifizierung	103
7.2	Anwendungsbeispiele zur automatischen Objekterkennung	104
7.2.1	Autonome Navigation	104
7.2.2	Modellierung von Bauwerksgeometrien	106
7.2.3	Modellierung von Straßenfahrbahnen	107
8	Auswertung der Lasertriangulationssensoren beim RACER II	109
8.1	Stellung im Auswerteprozess	109
8.2	POI-Auswertung	111
8.2.1	Aufbereitung der Messdaten	113
8.2.2	Modellierung der Messdaten über Teilpolynome	115
8.2.3	Vergleich der Messdaten mit einer Soll-Geometrie	122
8.2.4	Ermittlung der POI	126
8.3	Ermittlung der Zielgrößen	129

8.4	Verwendung der Zielgrößen.....	134
8.5	Qualitätsmanagement	136
9	Validierung des RACER II	139
9.1	Laborversuche	139
9.2	Teststrecke Krailling	141
9.3	Versuchsstrecke Lötschberg-Basistunnel.....	142
9.3.1	Konzept einer Validierungsmessung.....	143
9.3.2	Durchführung der Validierungsmessung	145
9.3.3	Vergleichsmessung RACER ⇔ RACER II.....	147
10	Schlussbemerkungen	149

Verzeichnisse

Abkürzungsverzeichnis	152
Literaturverzeichnis	154
Internetquellen	161
Abbildungsverzeichnis	162
Anlagen	165
4.1: 6-DoF Field Check.....	165
4.2: Tracker Field Check.....	166
6.1: Kalibrierung der Lasertriangulationssensoren, A-Matrix	167
6.2: Kalibrierung der Lasertriangulationssensoren, B-Matrix	168
8.1: Beispiel einer Stellgrößendatei	169
8.2: Beispiel einer Kalibrierparameterdatei	171
8.3: BF-Algorithmus, A-Matrix	173
8.4: BF-Algorithmus, B-Matrix	174
9.1: Unsicherheiten des RACER II, Untersuchung GeoLab	175
9.2: Unsicherheiten des RACER II, Untersuchungen Lötschberg-Basistunnel.....	176
Lebenslauf	177
Danksagung	178

1 Einleitung

Um den heutigen, an die Ingenieurgeodäsie gestellten Anforderungen einer Aufnahme, Steuerung oder Kontrolle gerecht zu werden, stellt die Entwicklung eines individuell konzipierten Multisensorsystems (MSS) eine Option zur Lösung derartiger Aufgaben dar. Im Besonderen gilt dies, wenn sich die einzelnen Messabläufe in hoher Anzahl wiederholen, wie es z.B. bei der Gleisvermessung (Kapitel 2) der Fall ist.

Speziell für die Kontrolle des Einbaus der Festen Fahrbahn (FF) im Gotthardt-Basistunnel (GBT) wurde das innovative Gleisvermessungssystem RACER II in Kooperation zwischen dem Schweizer Ingenieurbüro „Ristag Ingenieure AG“ [Ristag 2015] und dem Geodätischen Labor (GeoLab) der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) entwickelt. Die geometrischen Anforderungen an die Trassenführung im GBT sind aufgrund der Bauweise als Hochgeschwindigkeitsstrecke derart, dass die Gleisgeometrie im gesamten Trassenverlauf mit Unsicherheiten im Submillimeterbereich bestimmt werden muss (Kapitel 2.4.1). Um dies zu erreichen, sind die auf der Multisensorplattform (MSP) verbauten Sensormodule des RACER II entsprechend zu wählen und zu kalibrieren (Kap. 3.4). Die MSP repräsentiert die Rahmenkonstruktion und gewährleistet die stetige Beibehaltung der inneren Orientierung der Sensormodule und ist damit ein wesentlicher Bestandteil eines MSS. Sowohl die Parameter der inneren Orientierung der Sensormodule, als auch die der äußeren Orientierung des RACER II müssen mit hoher Güte bestimmt werden (Kapitel 4.1), damit der RACER II als MSS für die Einhaltung der Genauigkeitsforderungen beim Einbau der FF im GBT einsetzbar ist.

Die Zielsetzungen der Entwicklung sind:

- ein weitgehend automatisiertes Messsystem
- optimierte Messzyklen im Hinblick auf eine effiziente Erfassung von Querprofilen in dichter Folge, unter anderem durch:
 - berührungslose Erfassung der Schienenoberfläche durch Lasertriangulationssensoren
 - ein zielsuchendes, auf der MSP integriertes Tachymeter

Innovatives Novum des RACER II, der wie andere Gleismesssysteme auch in Trolley-Bauweise konstruiert ist (Kapitel 2.4.2), ist, dass die Schienenoberfläche berührungslos mit insgesamt vier Lasertriangulationssensoren erfasst wird und das System dadurch weitgehend verschleißfrei und schnell operiert. Durch Profildaten können optional zudem Informationen über die Abnutzung der Schieneninnenkante gewonnen werden. Mit den hochfrequent messenden Lasertriangulationssensoren ist auch eine kinematische Datenerfassung prinzipiell möglich, wobei aber der RACER II im „Stop & Go“-Modus (SGM) arbeitet.

Die Bestimmung der Gleisgeometrie erfolgt durch die aus den Messdaten der Sensormodule abgeleiteten Zielgrößen (Kapitel 2.1), welche als Messprofile in festen Intervallen entlang der Trasse erfasst werden. Dieser wiederkehrende Messprozess erfordert eine weitgehende Automatisierung, um eine effiziente Erfassung und eine gleichbleibende Qualität der Messergebnisse zu gewährleisten.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der indirekten Bestimmung der 6-DoF-Parameter (DoF = Degree of Freedom) der Lasertriangulationssensoren. Bei Lasertriangulationssensoren sind weder der Koordinatenursprung noch die Ausrichtung der Koordinatenachsen direkt signalisierbar. Die entsprechenden 6-DoF-Parameter lassen sich jedoch über Referenzgeometrien bestimmen (Kapitel 5.3, Kapitel 6.2.1), wobei der geometrische Bezug zwischen den Referenzgeometrien und dem MSS über ein Referenzmesssystem hergestellt wird (Kapitel 4.2). Dabei müssen neben der Bestimmung der Parameter der relativen Orientierung (Systemkalibrierung, Kapitel 5) auch die einzelnen Sensormodule separat überprüft und gegebenenfalls kalibriert werden (Komponentenkalibrierung, Kapitel 4).

Die Ermittlung der Zielgrößen des RACER II erfolgt über die Bestimmung repräsentativer Punkte einer Schiene, den Points of Interest (POI), welche aus den Messprofilen der Lasertriangulationssensoren gewonnen werden (POI-Auswertung, Kapitel 8.2), in Verbindung mit den tachymetrischen Messungen für die Georeferenzierung. Die Auswertung der Messprofile inklusive des Abgleichs mit der Soll-Geometrie der Trasse erfolgt zeitnah und steht dem Anwender unmittelbar während der Messung zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Möglichkeiten zur Auswertung der Messprofile (Kapitel 7, 8) sowie Maßnahmen zur Gewährleistung einer gleichbleibenden Qualität der Zielgrößen behandelt. Die Ausführungen des Kapitels 9 belegen, dass mit dem entwickelten MSS RACER II die an die Gleiskontrolle im GBT gestellten Genauigkeitsanforderungen erfüllt werden.

2 Gleisvermessung

2.1 Allgemeine Grundlagen

Unter dem Begriff Gleisvermessung werden alle Vermessungsaufgaben zusammengefasst, welche die erstmalige Erstellung eines geplanten oder die Feststellung von Veränderungen an einem bestehenden Gleiskörper ermöglichen. Der Gleiskörper selbst besteht im Wesentlichen aus dem Gleisunterbau (Untergrund, Unterbau und Schutzschichten), dem Gleisoberbau (Gleisbett, Schwelle und Gleis) und der Bahntechnik (Leitungssysteme, Funkssysteme, Fahrleitsysteme, etc.). Detaillierte Informationen hinsichtlich der einzelnen Komponenten des Gleiskörpers können beispielsweise in [Lichtberger 2003] nachgeschlagen werden.

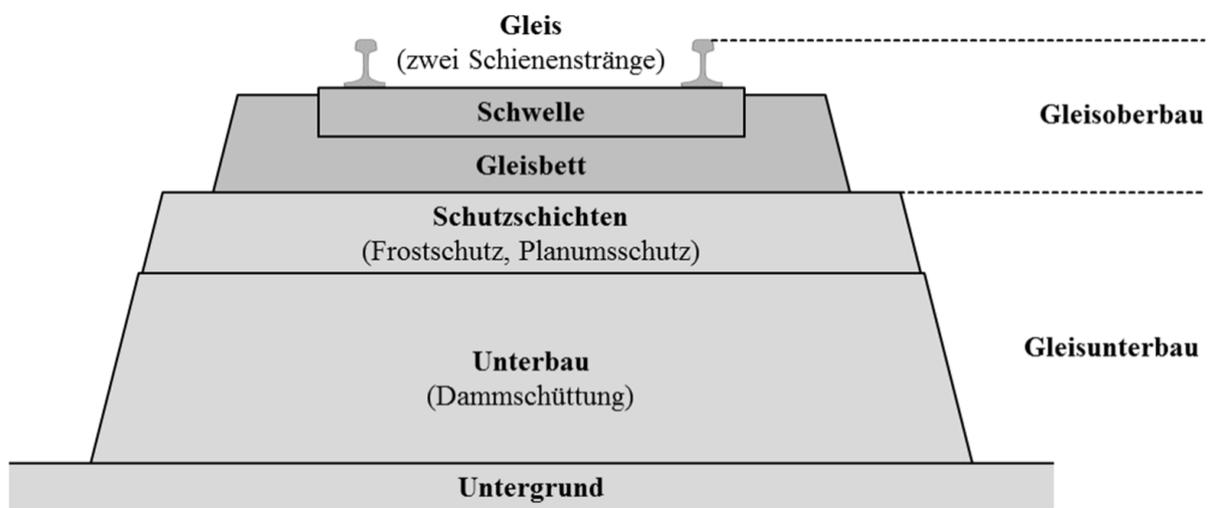


Abb. 2.1: Wesentliche Bestandteile eines Gleiskörpers nach [Lichtberger 2003]

Abbildung 2.1 zeigt die wesentlichen Bestandteile eines Gleiskörpers ungeachtet der Bahntechnik. Unter dem Begriff Gleis werden nachfolgend zwei durch Schwellen miteinander verbundene Schienenstränge verstanden, wobei ein einzelner Schienenstrang als Schiene bezeichnet wird. Schienenfahrzeuge bilden den Oberbegriff für sämtliche schienengebundenen Objekte, die sich innerhalb eines Gleises bewegen. Dazu gehören neben Personen-, Güter-, Bau- und Wartungszügen auch schienengebundene Gleisvermessungssysteme (Kapitel 2.4.2).

Um die breite Thematik der Gleisvermessung zu begrenzen, konzentrieren sich die folgenden Kapitel auf Vermessungsaufgaben hinsichtlich der Erstellung und Kontrolle der Gleislage. Die Gleislage wird durch geometrische Parameter (Gleisparameter) beschrieben, welche die Position und Orientierung eines Gleises an einer konkreten Stelle entlang der Gleismittelachse (GMA, hier im Sinne der Stationierung) in einem übergeordneten Bezugssystem definieren (Gleisvermarkungssystem, GVS, Kapitel 2.3.1). Darüber hinaus können durch Gleisparameter weitere Informationen wie Materialeigenschaften oder die Abstände benachbarter Objekte zum Gleis (Lichttraumprofil) beschrieben werden. Die Summe der Gleisparameter aller Stationierungen beschreibt den Verlauf der gesamten Trasse (Kapitel 8.4).

Um den räumlichen Verlauf eines Gleises an einer beliebigen Stationierung zu beschreiben, werden folgende Gleisparameter bestimmt:

- Lage und Höhe der GMA im GVS
- Überhöhung (Querneigung) bezüglich des GVS
- Gradiente (Längsneigung) bezüglich des GVS
- Spurweite (vom GVS unabhängig)

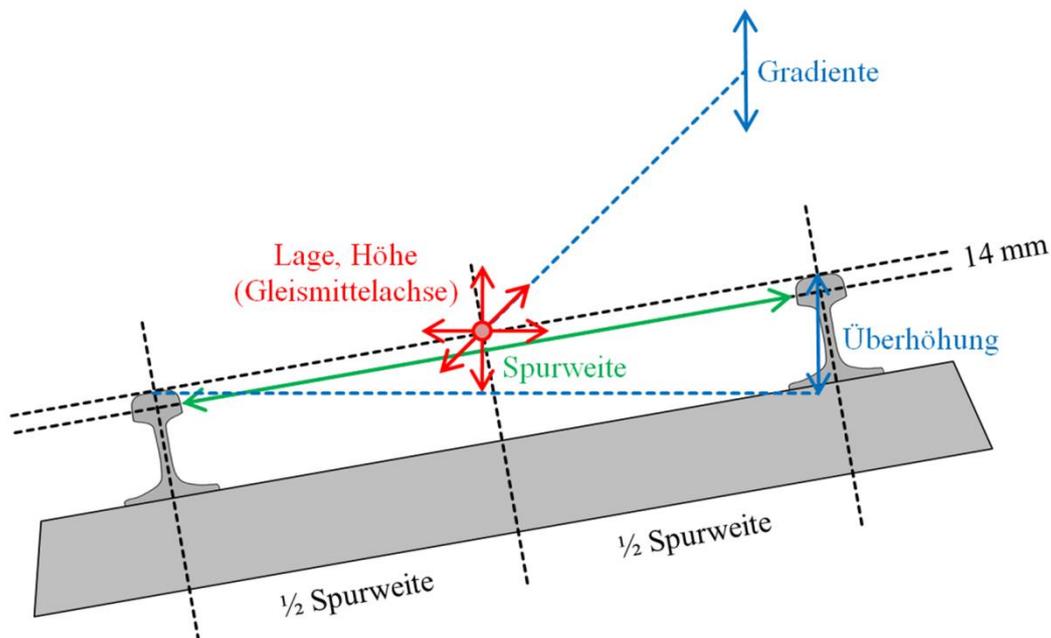


Abb. 2.2: Definition der Gleisparameter

Die einzelnen Gleisparameter sind in Abbildung 2.2 für die Erfassung eines einzelnen Messprofils dargestellt. Die GMA wird durch den Mittelpunkt der Schnittpunkte der Schienenmittellachsen (SMA) mit der Tangentialgeraden der Schienenoberkanten definiert und über die Lage (X, Y) und Höhe (Z) im übergeordneten GVS koordiniert. Durch Verschiebung der Tangentialgeraden der beiden Schienenoberkanten um einen festen Betrag (in der Regel 14 mm) ist die Spurweite definiert. Sie entspricht der Raumstrecke entlang der Tangentialgeraden und wird durch die beiden Schieneninnenkanten begrenzt. Die Querneigung des Gleises gegenüber dem GVS wird als Überhöhung bezeichnet. Die Ermittlung der Querneigung oder auch Überhöhung erfordert den Bezug zu einem nivellierten GVS (Kapitel 2.3.1). Analog dazu repräsentiert die Gradiente die Längsneigung des Gleises.

2.2 Gleisoberbau

2.2.1 Gleisbett

Die Basis des Gleisoberbaus bildet der Gleisunterbau als Tragschicht zur Aufnahme des Gleisbettes. Als Gleisbett haben sich zwei grundsätzliche Verfahren etabliert: der Schotterbau und die FF. Beim Schotterbau besteht das Gleisbett aus Schotterkörnern, in denen die Schwellen und das

Gleis „schwimmend“ gelagert sind. Der Schotter wird zumeist in gebrochener Form aus Steinbrüchen gewonnen. Die Korngröße richtet sich nach Betriebsart und Oberbauverhältnissen. Mit der Zeit verlieren die Körner durch Absplitterung und Abrieb ihre Scher- und damit auch die Tragfestigkeit. Als Gegenmaßnahme sind wiederkehrende Instandhaltungsarbeiten durchzuführen. Neben Stopf- und Richtarbeiten muss der Schotter gewaschen und Pflanzenbewuchs durch den Einsatz von Pestiziden verhindert werden. Das Schottergleis dominiert vor allem beim Bau von Hauptstrecken, aber auch bei Nebenstrecken im außerstädtischen Bereich. Tabelle 2.1 zeigt die wichtigsten Vor- und Nachteile des Schottergleises im Überblick.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - günstige Instandhaltung mit vollautomatisierten Oberbaumaschinen - gute Aufnahme dynamischer Kräfte (Gewährleistung der Gleiselastizität) - gute Luft- und Wasserdurchlässigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - dynamische Kräfte führen zu einer Verschlechterung der Gleislage - Elastizitätsverlust durch Verunreinigungen oder Absplitterungen - anfällig für Verunreinigungen (Pflanzenwuchs, Ladegutverlust) - Gefahr durch Schotterflug

Tab. 2.1: Vor- und Nachteile des Schottergleises

Bei der FF wird der Schotter durch lastbeständigeres Material wie Beton oder Asphalt ersetzt. Damit wird die Gleislage langfristig fixiert, was allerdings dazu führt, dass das Gleis eine geringere Dynamik gegenüber der Kraftaufnahme des Schienenverkehrs ausweist. In Folge dessen kann es bei Überbeanspruchung zu Brüchen in Schienen, Schwellen oder Tragschicht kommen, was wiederum hohe Instandsetzungskosten oder womöglich die Entgleisung eines Schienenfahrzeugs verursachen kann. Wegen der starren Konstruktion müssen verstärkt Einwirkungen von Grundwasserspiegelabsenkungen, Bodenfrost und sonstige Setzungserscheinungen berücksichtigt werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - gleichbleibende Gleislage durch geringe, plastische Verformung - hohe Belastbarkeit, hohe Stabilität - geringere Instandhaltungs- und Betriebs-hinderungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> - kostenintensives Verfahren - erfordert setzungsfreien Untergrund - geringe Flexibilität bei der Aufnahme von Kraftspitzen - hohe Kosten im Schadensfall - hohe Schallemission

Tab. 2.2: Vor- und Nachteile der FF

Die FF wird vorzugsweise bei Hochgeschwindigkeitsstrecken eingesetzt, bei denen das Setzungsverhalten des Untergrunds als äußerst gering angesehen werden kann und die Stabilität der Gleislage Vorrang hat. Sie wird primär im Tunnelbau eingesetzt. Ferner kann im Tunnelbau im

Vergleich zum Schotterbau eine geringere Bauhöhe eingehalten und auf die Verwendung von Unterschottermatten verzichtet werden [Lichtberger 2003]. Tabelle 2.2 zeigt die wichtigsten Vor- und Nachteile der FF im Überblick.

Das Bindeglied zwischen Gleisbett und Gleis bilden die Schwellen, welche die Schienen über entsprechende Befestigungen (in der Regel Spannklemmen) fixieren und die dort aufgenommenen Kräfte in den Untergrund ableiten. Daneben dient die Schwelle der Herstellung und Beibehaltung der Spurweite. Die gebräuchlichsten Materialien sind Holz, Stahl und Stahlbeton, wobei die Verwendung von Stahlbeton überwiegt. Holzschwellen sind für Hochgeschwindigkeitsstrecken über 160 km/h ungeeignet, da sie einen geringeren Querschiebewiderstand aufweisen [Lichtberger 2003]. Zudem ist Holz anfälliger gegenüber Witterungsbedingungen und Verformungen, was die notwendigen Instandhaltungsarbeiten gegenüber einer Stahlbetonschwelle erhöht.

Stahlschwellen zeichnen sich durch geringes Gewicht und geringe Einbauhöhen, sowie eine hohe Lebensdauer aus. Sie werden vorwiegend in Weichen wegen ihrer hohen Spurrhaltung verwendet. Stahlbetonschwellen bilden den derzeitigen Standard. Sie sind witterungsbeständig, relativ pflegeleicht und kostengünstig. Stahlbetonschwellen können sowohl im Schottergleis als auch in der FF verwendet werden.

2.2.2 Gleisarten

Der am häufigsten verwendete Schientyp ist die Vignolschiene, die Standard-Eisenbahnschiene mit Kopf, Steg und Fuß. Die Deutsche Bahn AG (DB) setzt heute überwiegend Vignolschienen des Typs 60E1 beziehungsweise UIC60 (UIC = Internationaler Eisenbahnverband, franz. Union Internationale des Chemins de Fer [UIC 2014]) mit einer Schienenhöhe H von 172 mm, einer Fußbreite B von 150 mm, einer Kopfweite C_1 von 72 mm und einem Gewicht von 60,3 kg/m ein (vgl. Abbildung 2.3). Weitere Schientypen wie beispielsweise Doppelkopf-, Rillen-, oder Kranschienen sollen an dieser Stelle nicht behandelt werden [Lichtberger 2003].

Die wachsenden Anforderungen an den Schienenverkehr führten im Laufe der Zeit zu immer größeren und damit belastbareren Schienenprofilen. [Lichtberger 2003] stellt exemplarisch einige Varianten aus Deutschland, England und Amerika sowie die UIC-Profile entsprechend den Parametern aus Abbildung 2.3 tabellarisch gegenüber. Für die Erprobung und den Messeinsatz des Gleisvermessungssystems RACER II waren bislang nur drei Schientypen relevant (Kapitel 9, Abbildung 9.2). Das Profil der Teststrecke Krailling entspricht dabei dem deutschen Profil 49E1 (S49), beim Lötschberg-Basistunnel wird UIC60 eingesetzt.

Gegenwärtig werden überwiegend lückenlosen Gleise verlegt, wobei die einzelnen Schienenabschnitte von 60 bis 180 m Länge miteinander verschweißt werden. Hierbei kommen unterschiedliche Verfahren wie beispielsweise das aluminothermische Schweißen oder die Widerstandsschweißung zum Einsatz [Fastenrath 1977]. Beim aluminothermischen Schweißen oder auch Thermit-Schweißen wird rund 2500 °C heißes Eisen durch einen exothermen Oxidationsprozess (Aluminium und Eisenoxid) erzeugt und in die 20 – 22 mm breite Schienenlücke gegossen. Beim

Widerstandsschweißen in Form des Abbrennstumpfschweißens werden die beiden Schienenenden aneinandergespresst und mittels Starkstrom zur Weißglut gebracht, ohne einen Zusatzwerkstoff verwenden zu müssen.

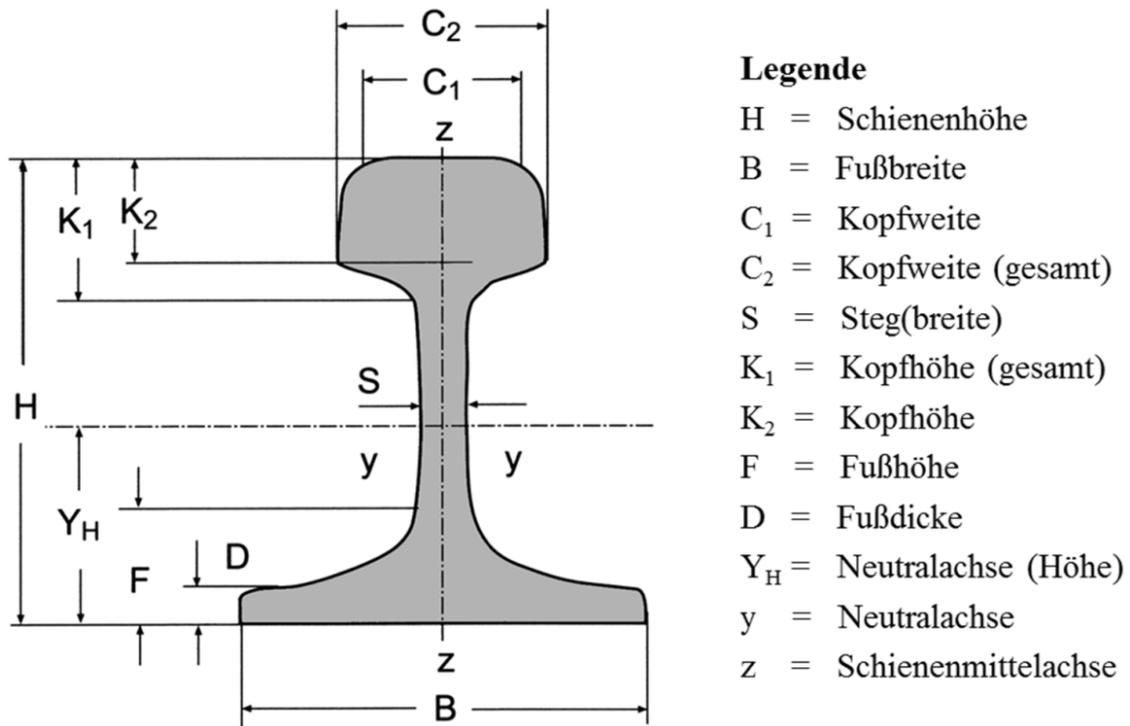


Abb. 2.3: Schienenprofil einer Vignolschiene nach [Lichtberger 2003]

2.2.3 Schienenabnutzung

Durch den Schienenverkehr ist das Gleis und vor allem die Schiene als direkte Kontaktfläche physikalischen Kräften ausgesetzt, die gegebenenfalls zu einer Veränderung der Gleislage und zwangsläufig zur Abnutzung des Schienenkopfs führen (Schienenabnutzung). Veränderungen der Gleislage wirken sich insbesondere auf die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort aus. Die Schienenabnutzung reduziert die Tragfähigkeit und Stabilität des Gleises. Zudem werden durch die wachsende Spurweite die Führungskräfte der Schienenfahrzeuge verstärkt beansprucht, was die seitliche Schienenabnutzung in Folge dynamisch auftretender Querkräfte beschleunigt.

Abbildung 2.4 zeigt, in welchen Bereichen der Schienenkopf abgenutzt wird und wie hoch die maximal zulässige, seitliche Schienenabnutzung nach [Lichtberger 2003] sein darf. Die wesentlichen, ursächlichen Kräfte werden im Folgenden auszugsweise dargestellt. Da die Gleisdynamik ein umfangreiches Themengebiet darstellt, wird für weitere Details auf die einschlägige Literatur verwiesen wie [Lichtberger 2003], [Knothe 2001] und [Goldschmidt 2003].

Vertikalbelastungen werden durch das Eigengewicht der Schienenfahrzeuge verursacht und führen zu einer Abnutzung der Schienenlauffläche. Ferner können Unregelmäßigkeiten im Fahrkantenverlauf der Schienen das Schienenfahrzeug ins Wanken bringen, was in Folge der wechselnden Belastung (Radlastverlagerung) zu einer unterschiedlich starken Abnutzung der Schienenlauffläche führt. Bei Bogenfahrten kommt es ebenfalls zu einer einseitigen Vertikalbelastung der

äußeren Schiene aufgrund der Zentripetalkraft. Durch eine geeignete Überhöhung des Gleises kann die auftretende Kraft gemindert und in der Folge wiederum die Fahrtgeschwindigkeit erhöht werden [Knothe 2001].

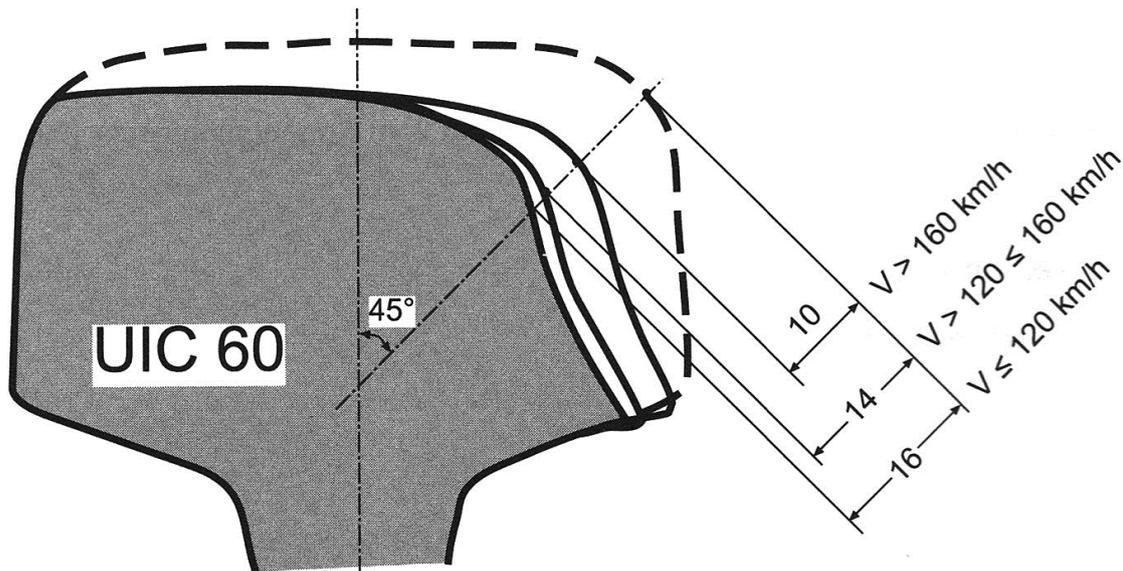


Abb. 2.4: Maximal zulässige, seitliche Schienenabnutzung (Längenangaben in mm) [Lichtberger 2003]

Durch den verbleibenden Spielraum zwischen Radinnenkranz und Spurweite treten Querkräfte auf. Die dadurch verursachte horizontale Bewegung des Schienenfahrzeugs erzeugt Führungskräfte, welche orthogonal zur Gleisachse wirken. Die schräg am Schienenkopf angreifende Kraft bewirkt neben dem linearen Anteil auch ein Torsionsmoment an der Schiene. Führungskräfte sind fahrzeugabhängig und führen zur Abnutzung der Radinnenkränze und der Schienenauflflächen [Knothe 2001].

Vor allem Schienen, die der täglichen Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, erfahren durch den natürlichen Tages- und Jahresgang Temperaturunterschiede. Diese Spannungen werden über die Schienenbefestigungen an die Schwellen übertragen, welche die auftretenden Kräfte (Schienenlängskräfte) in das Gleisbett ableiten. Um die Spannungen im Gleisbett möglichst gering zu halten, ist beim Verlegen des Gleises darauf zu achten, dass die Arbeiten möglichst zu mittleren Jahrestemperaturen durchgeführt werden. Anfahr- und Bremskräfte der Schienenfahrzeuge wirken infolge der Haftreibung der Räder zusätzlich in Längsrichtung der Schiene. Die Schienenauflfläche wird in diesen Bereichen verstärkt abgenutzt [Lichtberger 2003].

Dynamisch auftretende Kräfte werden beispielsweise durch Schwingungsanregungen hervorgerufen. Schwingungsanregungen entstehen überwiegend durch Oberflächenfehler der Schienen. Dabei handelt es sich vor allem um periodische Erscheinungen wie Riffeln, Schlupfwellen oder Wellen, verursacht durch Herstellungsungenauigkeiten im Walzwerk. Ferner können Eigenschwingungen sowohl durch die Schienenfahrzeuge als auch durch den Gleisoberbau selbst erzeugt werden. Das Schwingungsverhalten der Schienenfahrzeuge ist im Wesentlichen vom Feder-Dämpfer-System der Laufwerke abhängig. Beim Schienenoberbau leitet sich die Eigenfrequenz von den verwendeten Materialien und den Dimensionen der einzelnen Bauteile ab. Analog

zu den Schwingungsanregungen wirken Eigenschwingungen als dynamische Vertikalkräfte mit den gleichen Konsequenzen [Knothe 2001].

2.3 Kontrolle der Gleislage

2.3.1 Gleisvermarkungssysteme

Die Grundlage einer Gleisvermessung bildet ein übergeordnetes Bezugssystem, in dem die einzelnen Trassen in Lage und Höhe koordiniert werden können. Dabei handelt es sich im Regelfall um örtlich vermarkte Festpunktsysteme, die von den Betreibern des Schienenverkehrs vorgehalten werden. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf entsprechende Umsetzungen für Deutschland (DB) und die Schweiz (Schweizer Bundesbahn, SBB). Beide Nationen setzen Gleisvermarkungspunkte (bei der SBB Gleisversicherungspunkte), kurz GVP, als örtliche Vermarkung ihres Festpunktfelds ein. Das Festpunktfeld wird fortan als Gleisvermarkungssystem beziehungsweise Gleisversicherungssystem, kurz GVS, bezeichnet. Das GVS bildet die geodätische Grundlage für die Übertragung der Gleisgeometrie in die Realität: „Unter dem Begriff Gleisvermarkung versteht man die Anordnung von standsicheren Punkten in Gleisnähe, von denen aus die absolute Gleislage und –höhe rekonstruiert werden kann.“ [Möser u.a. 2000].

In Deutschland ist die DB Netz AG für den Unterhalt des GVS zuständig. Gemäß [Ril. DB 2007] ist das GVS für alle durchgehenden Hauptgleise einschließlich Weichen anzuwenden, „(...) die neu zu trassieren oder abzustecken sind oder deren Trassierung / Absteckung einer Änderung bedarf. Die übrigen Gleise können nach Bedarf festgelegt und / oder vermarkt werden.“ [Ril. DB 2007]. Die alternative Gleisvermessung durch satellitengestützte Verfahren unter Wegfall der örtlichen Gleisvermarkung ist nach [Ril. DB 2007] für Hauptstrecken nebst Weiche zulässig, sofern es sich um geeignete Streckenabschnitte handelt. Diese Möglichkeit ist allerdings umstritten, weil satellitengestützte Verfahren zumindest gegenwärtig nicht die erforderliche Höhen Genauigkeit erreichen [Schmidt 2015].

Aufgrund der föderalen Landesstruktur der Bundesrepublik Deutschland, bei der die Vermessungsaufgaben in den Zuständigkeitsbereich der einzelnen Bundesländer fallen, verwendet die DB das bundeseinheitliche, dreidimensionale Referenznetz DB_REF als GVS. Es basiert auf dem ETRF 89 (European Terrestrial Reference Frame 1989) für die Lage und dem DHHN 92 (Deutsches Haupthöhennetz 1992) für die Höhe. Dabei handelt es sich um „(...) eine dreidimensionale Gebrauchsrealisierung des ETRF 89 mit einer höheren inneren (nachbarschaftlichen) Genauigkeit als das ETRF 89 selbst.“ [Ril. DB 2011-1]. Der Datumsübergang vom ETRF 89 zum DB_REF wird durch einen bundesweit einheitlich festgesetztem Parametersatz einer 7 Parameter Transformation realisiert. Als ebenes kartesisches Abbildungssystem werden soweit die Gauß-Krüger-Koordinaten (GK) verwendet.

Die einzelnen GVP werden parallel zur GMA jedes Gleises in Abständen von 60 – 80 m vermarkt. In der Regel werden GVP als horizontale Bolzen in Masten und Wänden oder als Bodenpunkte neben dem Gleis auf Bahnsteigen oder in Betonfundamente eingebracht. Abbildung 2.5 zeigt beispielhaft die Gleisvermarkung eines horizontal eingebrachten Bolzens am Betonfunda-

ment eines Fahrleitungsmastens. Auf den Bolzen wird bei der Messung ein Prismenadapter aufgesetzt, der das geometrische Zentrum des GVP in Lage und Höhe eindeutig und reproduzierbar definiert.

Die SBB nutzt seit 1987 ebenfalls ein national einheitliches GVS namens SBB03. Es basiert auf der schweizerischen Landesvermessung von 1903 (LV03) und „(...) wird auf den Lagefixpunkten der Landesvermessung und den Höhen der nivellierten Gleisversicherungspunkte gelagert.“ [Maron 2015]. Das LV03 ist eine Mercatorprojektion, dessen Ausgangspunkt der Fundamentpunkt bei der alten Sternwarte in Bern ist. Der Höhenbezugsrahmen ist durch das Landesnivellement-Netz von 1902 (LN02) gegeben.

Die Schweizer Landesvermessung ist bis 2020 verpflichtet, den Lagebezugsrahmen der neuen Landesvermessung 1995 (LV95) einzuführen. Als Höhenbezugsrahmen bleibt das LN02 bestehen. Das LV95 löst die über 100-jährige Landestriangulation durch ein mittels GNSS bestimmtes, spannungsfreies Grundlagennetz ab. Die SBB will die Umstellung auf den neuen Bezugsrahmen bis 2016 vollziehen. Dabei stellt die Transformation der Gleis- und Weichenanlagen eine besondere Herausforderung dar, weil die Transformation der verbundenen Trassenelemente ohne Verlust der Stetigkeit praktisch unmöglich ist. Zur Lösung dieses Konflikts wurde ein modifiziertes Transformationsmodell entwickelt (RailTra95). Für weitere Details wird auf [Maron 2015] verwiesen.

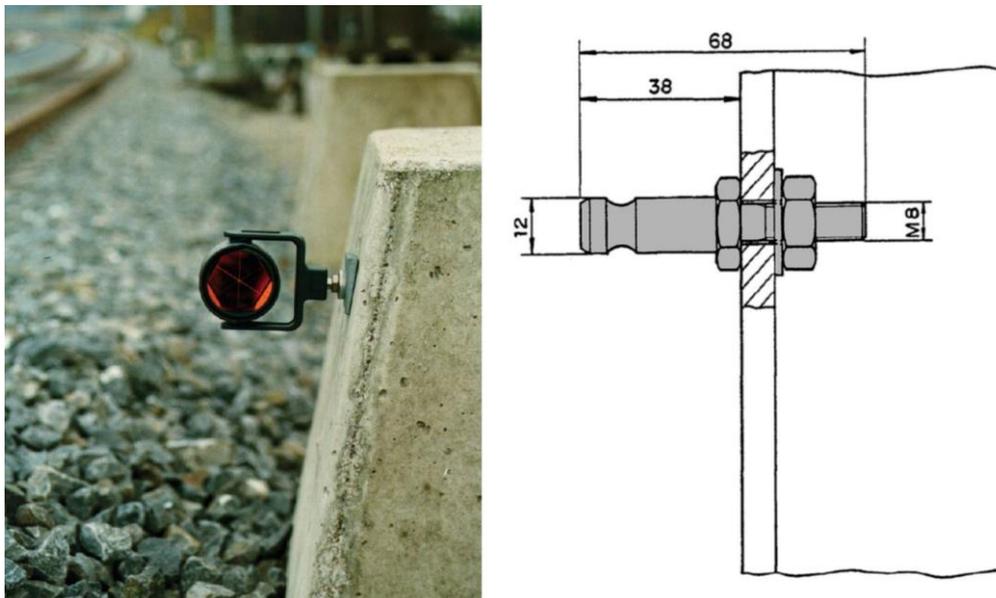


Abb. 2.5: Beispiel einer Gleisvermarkung – Bolzenmontage mit Prisma (SBB, Längenangaben in mm), nach [Maron u. Beda 2004]

Das GVS der SBB umfasst rund 147.000 GVP, wobei im Rahmen der Netzpflege jährlich rund 10% der Punkte überprüft werden. Die Vermarkung der GVP erfolgt analog zur DB an stabilen Bauteilen, wobei vorzugsweise Fahrleitungsmasten, Stützmauern, Bahnsteigkanten oder Tunnelwände genutzt werden. Die Punktzentren der GVP werden durch die Verwendung von Leica Rundprismen vom Typ GPR 1 definiert. Die Vermarkung selbst wird durch einen normierten Bolzen realisiert (Abbildung 2.5), [Maron 2015].

2.3.2 Ablauf einer Gleisvermessung

Im Folgenden wird hinsichtlich der für die Gleisvermessung durchzuführenden Arbeitsschritte zwischen der Erstellung und Kontrolle der Gleislage unterschieden. Die Erstellung der Gleislage umfasst neu zu bauende Streckenabschnitte (Neubaustrecken) inklusive einer abschließenden Abnahmevermessung. Bei der Kontrolle der Gleislage werden bereits vorhandene Streckenabschnitte (Bestandsstrecken) vermessen und hinsichtlich ihrer Soll-Gleislage überprüft. Dies umfasst sowohl die Ermittlung der durch den Schienenverkehr verursachten Fehllagen der Gleise als auch Maßnahmen zur Verbesserung des Fahrbetriebs (Linienverbesserungen).

Zur Bestimmung der Ist-Gleislage wird im Allgemeinen ein Messsystem eingesetzt (Kapitel 3), welches Messwerte erfasst, aus denen Ablagewerte zur Soll-Gleislage berechnet werden. Überschreiten die Ablagewerte vorgegebene Toleranzen (Kapitel 2.4.1), muss die Fehllage des Gleises über einen Gleisrichtvorgang korrigiert werden. Dabei kommen automatisierte Baumaschinen zum Einsatz, wobei die Verschiebung des Gleises in der Lage als Richtvorgang und die entsprechende Verschiebung in der Höhe als Stopfvorgang bezeichnet wird [Riebold 2000].

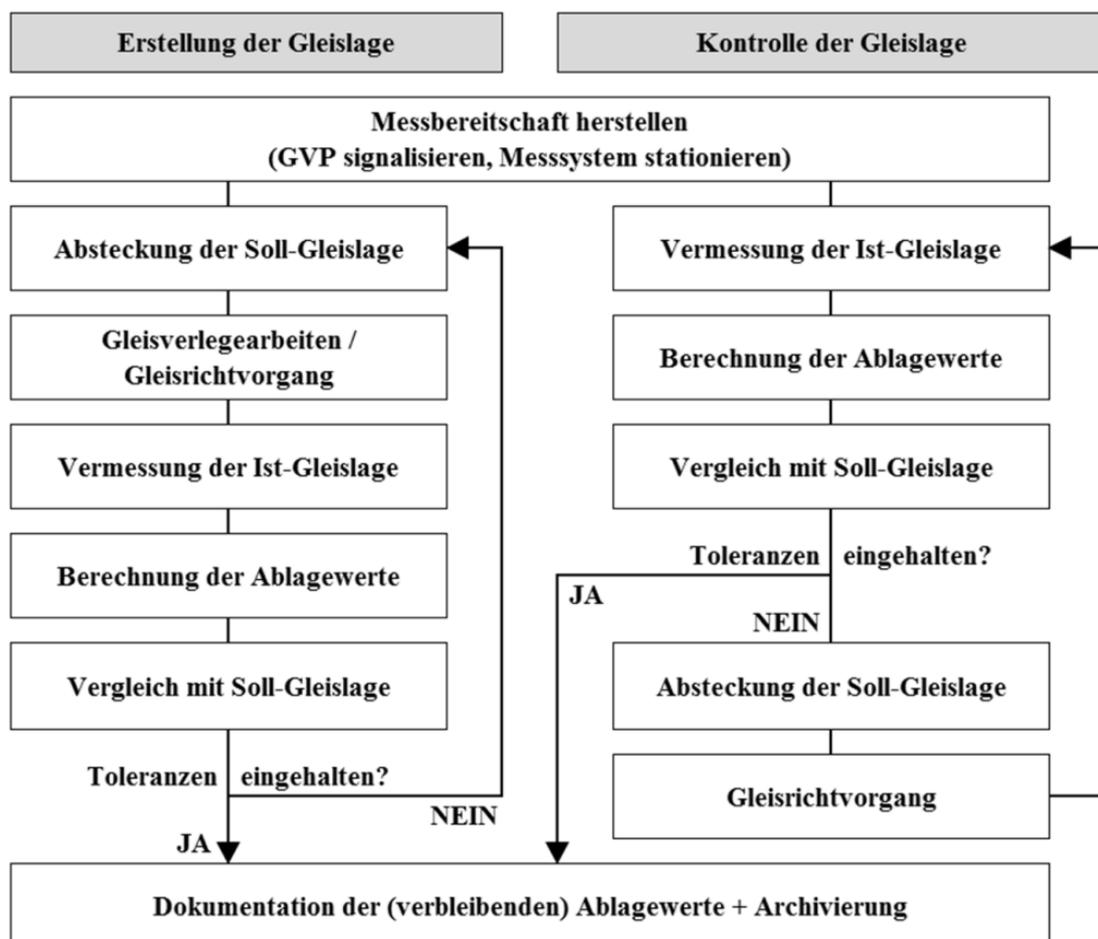


Abb. 2.6: Ablaufschema einer Gleisvermessung hinsichtlich der Erstellung und Kontrolle der Gleislage

Die Abbildung 2.6 zeigt schematisch den Ablauf einer Gleisvermessung für Neubaustrecken und Bestandsstrecken. In beiden Fällen muss zunächst das eingesetzte Messsystem initialisiert werden, indem die 6-DoF-Parameter der MSP innerhalb des übergeordneten GVS bestimmt werden.

Die folgenden Arbeitsschritte sind hinsichtlich Inhalt und Reihenfolge grundsätzlich identisch, sie unterscheiden sich lediglich durch eine zeitliche Verschiebung. Bei vorhandenem Gleis wird die Ist-Gleislage vermessen und Ablagewerte zur Soll-Gleislage berechnet. Bei Einhaltung der Toleranzen werden die Ablagewerte in Messprotokollen dokumentiert und in Datenbanken archiviert. Bei Überschreitung der Toleranzen wird auf Basis der Ablagewerte zur Soll-Geometrie ein Gleisrichtvorgang durchgeführt und das Verfahren durch Vermessung der veränderten Ist-Gleislage wiederholt.

2.3.3 Relative und absolute Gleisvermessung

Bei der Gleisvermessung gibt es unterschiedliche Zielsetzungen und Genauigkeitsanforderungen für die relative und absolute Gleislage. Ziel der relativen Gleislage ist eine hohe Nachbarschaftstreue zur Gewährleistung gleichförmiger Trassenverläufe, insbesondere der Krümmungsverläufe. Eine hohe relative Genauigkeit ermöglicht hohe Streckengeschwindigkeiten, erhöht den Fahrkomfort sowie die Stabilität des Gleises aufgrund geringerer Gleisdeformationen. Des Weiteren lässt sich durch die Reduktion dynamisch auftretender Kräfte der Verschleiß der Schienenfahrzeuge hinsichtlich der Radkränze und Federungen reduzieren. Unabhängig davon dient die absolute Gleislage der Verortung des Trassenverlaufs innerhalb der unmittelbaren Umgebung. Sie gewährleistet die Einhaltung von Mindestabständen zu Zwangspunkten des Trassenverlaufs wie beispielsweise Fahrleitungsmasten, Gebäuden oder Tunnelwänden [Möser u.a. 2000], [Retscher 1996].

Relative Verfahren

Die Verfahren der relativen Gleisvermessung orientieren sich stets an benachbarten Punkten eines bestehenden Gleises. Bei relativen Verfahren kann das deformierte Gleis mittels Gleisrichtverfahren ohne Bezug zum GVS korrigiert werden. Aufgrund des fehlenden GVS-Bezugs ist lediglich eine Glättung der lokalen Gleisdeformationen möglich. Dabei wird eine Sehne entlang des bestehenden Gleises aufgespannt, die über zwei Endpunkte definiert wird (Abbildung 2.7, grün). Die Sehnenendpunkte werden durch die gegenwärtige Geometrie der GMA (Abbildung 2.7, schwarz) definiert. Die rot dargestellten Pfeilhöhen stellen die orthogonale Abweichung der GMA zur Sehne dar und können in beliebig hoher Dichte entlang der Sehne bestimmt werden. Bei den Pfeilhöhen handelt es sich um Vektoren mit Lage- und Höhenkomponenten. Abbildung 2.7 zeigt exemplarisch die Lagekomponenten.

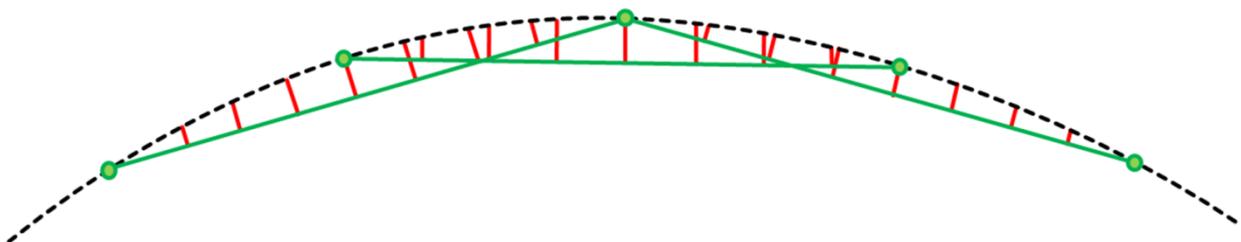


Abb. 2.7: Grundprinzip der relativen Gleisvermessung

[Möser u.a. 2000] und [Retscher 1996] stellen verschiedene Verfahren zur Bestimmung der relativen Gleisgeometrie vor. Das Vierpunktverfahren kann beispielsweise bei unbekannter Gleisgeometrie angewendet werden, wobei die Sehne zusätzlich zu den Sehnenendpunkten über zwei weitere Zwischenpunkte entlang der Sehne vermessen wird, aus denen die lokale Krümmung berechnet wird. Aufgrund der unbekanntenen Gleisgeometrie kann es zu Spannungen und Lageabweichungen kommen. Als Variante des Vierpunktverfahrens bezieht das Dreipunktverfahren die bekannte Gleisgeometrie mit ein, so dass die zuvor beschriebenen Nachteile minimiert werden.

Die einzelnen Sehnen werden im Laufe des Gleisrichtvorgangs in Arbeitsrichtung verschoben. Dabei werden im Regelfall Überlappungsbereiche genutzt, um die Nachbarschaft des Gleises bestmöglich zu berücksichtigen. Abbildung 2.7 zeigt beispielsweise einen Überlappungsbereich von 50 %. Die kontinuierliche Verschiebung einer Sehne wird auch als Wandersehnenverfahren bezeichnet.

Absolute Verfahren

Bei den Verfahren der absoluten Gleisvermessung wird die Lage und Höhe der GMA im übergeordneten GVS bestimmt (Abb. 2.2). [Möser u.a. 2000] und [Retscher 1996] stellen auch hier verschiedene Verfahren vor. So kann beispielsweise die absolute Gleislage durch die Absteckung der Geometriehauptpunkte (Übergänge zwischen einzelnen Trassenelementen wie Bogenhauptpunkte, Neigungswechsel oder Ausrundungsanfänge) mit anschließender Verdichtung erfolgen. Ein weiteres gebräuchliches Verfahren ist das Langsehnenverfahren (Abbildung 2.8).

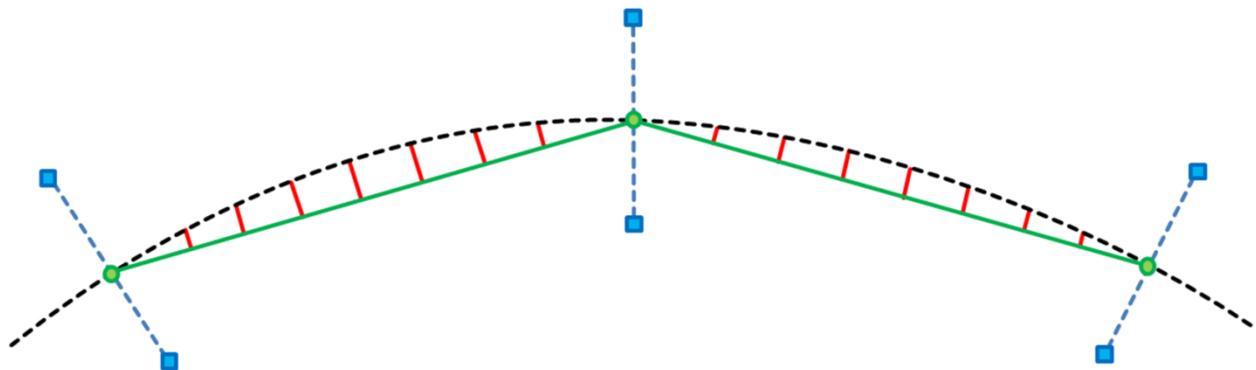


Abb. 2.8: Grundprinzip der absoluten Gleisvermessung am Beispiel des Langsehnenverfahrens

Als Bindeglied zur relativen Gleisvermessung wird beim Langsehnenverfahren eine Sehne aufgespannt, von der aus Pfeilhöhen zur GMA bestimmt werden. Die Farbgebung der Abbildung 2.8 entspricht dabei der Abbildung 2.7. Im Gegensatz zum relativen Verfahren werden die Sehneneknpunkte über die blau dargestellten GVP in das GVS eingebunden, wobei die Sehneneknpunkte als Schnittpunkte der Verbindungslinie eines GVP-Paars mit der Soll-GMA definiert sind. Die Langsehne selbst wird mit einem Laser oder einer optischen Ziellinie in die Örtlichkeit übertragen [Möser u.a. 2000]. Problematisch bei diesem Verfahren sind jedoch die Übergänge benachbarter Sehneneknpunkte, die sich durch Netzspannungen im GVS als Unstetigkeitsstellen auf den ansonsten gleichförmigen Gleisverlauf auswirken können.

Die Verbindung relativer und absoluter Messverfahren in einem Arbeitsschritt wird nach [Ret-scher 1996] als kombiniertes Verfahren bezeichnet. Es wird von den meisten modernen Messsystemen angewendet (Kapitel 2.4.2). Basierend auf dem Verfahren zur Bestimmung der absoluten Gleislage wird der Trassenverlauf um den dreidimensionalen Krümmungsverlauf des Schienenpaares hinsichtlich Spurweite, Überhöhung und Gradienten erweitert. Das Ergebnis ist eine vollständige Bestimmung der Gleisparameter nach Abbildung 2.2 in einem Arbeitsschritt.

2.4 Gleisvermessungssysteme

Neben den Genauigkeitsanforderungen an die Bestimmung der Gleisparameter (Kapitel 2.4.1) muss bei der Entwicklung und dem Einsatz von Gleisvermessungssystemen (Kapitel 2.4.2) beachtet werden, dass die Vermessungsarbeiten in laufende Prozesse wie Bauarbeiten oder den regulären Schienenverkehr integriert werden müssen. Dem entsprechend sind insbesondere Rüstzeiten und die Messdauer einer Stationierung möglichst gering zu halten, um eine hohe Arbeitsleistung zu erzielen. Ferner muss bei wiederholtem Räumen des Gleises aufgrund von Zugdurchfahrten auf ein moderates Gewicht geachtet werden. Moderne Gleisvermessungssysteme müssen zusätzlich über eine Auswerteeinheit verfügen, welche die Messdaten der einzelnen Sensoren unmittelbar in Ablagewerte zur Absteckung der Soll-Gleislage umwandeln und archivieren kann. Des Weiteren müssen zu jeder Zeit die Bestimmungen des Arbeitsschutzes eingehalten werden, um die fortwährende Sicherheit von Schienenverkehr und Arbeitskräften zu gewährleisten.

2.4.1 Toleranzvorgaben in der Gleisvermessung

Die Anforderungen an die Bestimmung der Gleisparameter werden durch die Vorgabe von Toleranzen in den entsprechenden Richtlinien der Netzbetreiber definiert, wobei im Allgemeinen jeder Netzbetreiber individuelle und detaillierte Vorgaben erstellt. Stellvertretend sind die wichtigsten Vorgaben der DB zusammengestellt, bei denen der verwendete Ausdruck „Genauigkeit“ im Sinne einer Standardabweichung der Koordinaten mit einem Vertrauensbereich von einem Sigma zu interpretieren ist [Ril. DB 2011-1, Seite 3]. Die einzelnen Anforderungen sind anwendungsbezogen für die verschiedenen Vermessungsaufgaben geregelt.

Punktstatus	absolute Genauigkeit	relative Genauigkeit	Bemerkung
0	10 mm	5 mm	dreidimensional
1	15 mm	10 mm	dreidimensional
2	15 mm	10 mm	Lagegenauigkeit
3	5 mm	$D_{\Delta H} \leq 5\sqrt{R}$ $\Delta H \text{ in mm}$ $R: \text{Abstand in km}$	zulässige Abweichung des beobachteten Höhenunterschieds zwischen benachbarten Punkten
4	keine Angabe	keine Angabe	je nach Anforderung an die sonstigen Festpunkte

Tab. 2.3: Punktstatus und Punktgenauigkeiten im DB_REF [Ril. DB 2011-1, Seite 3]

Die Basis für die absolute Gleislage bildet das DB_REF als GVS. Ergänzend zum Kapitel 2.3.1 richtet sich die Genauigkeitsanforderung eines GVP nach dessen Verwendungszweck, Entstehung und Punktdichte [Ril. DB 2011-1]. Tabelle 2.3 zeigt eine Zusammenstellung der geltenden Anforderungen, die mit ansteigendem Punktstatus zunehmen. Punktstatus 4 schafft darüber hinaus einen Freiraum für individuell gestaltbare Genauigkeitsanforderungen. Diese müssen im Einzelfall zwischen dem Auftraggeber und den beteiligten Baufirmen nebst Subunternehmer verhandelt werden.

Aufmessung und Absteckung

geforderte Genauigkeit...	Aufmessung	Absteckung
...für die Lage:		
- bei Gleisen in Längsrichtung	± 50 mm	± 30 mm
- bei Weichen in Längsrichtung	± 5 mm	± 5 mm
- bei Gleisen und Weichen in Querrichtung	± 5 mm	± 5 mm
...für die Höhe:	± 5 mm	± 3 mm

Tab. 2.4: Genauigkeitsanforderungen bei der Aufmessung und Absteckung nach [Ril. DB 2011-2, Seite 1], [Ril. DB 2006-1, Seite 2 f.]

Die Aufmessung vorhandener Bahnanlagen (Bestandserfassung) ist die Voraussetzung für die gleisgeometrische Bearbeitung. Bei Neubaustrecken ist dagegen eine Absteckung vorzunehmen. Für die Aufmessung von Bahnanlagen gelten Anforderungen nach [Ril. DB 2011-2], für die Absteckung entsprechende Vorgaben nach [Ril. DB 2006-1] (vgl. Tabelle 2.4). Dabei bildet die Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) im Allgemeinen die Rechtsgrundlage für Verträge mit den Baufirmen.

Für die FF gelten hingegen besondere Anforderungen, um den erhöhten Ansprüchen an Fahrdynamik und Langzeitstabilität der Gleisgeometrie gerecht zu werden. Vor diesem Hintergrund wurde der umfangreiche „Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn“ erstellt [Ril. DB 2008]. Der Katalog enthält Herstellungs- und Abnahmekriterien aller am Bau der FF beteiligten Fachsparten. Die Anforderungen hinsichtlich der Absteckung der FF wurden in [Ril. DB 2011-3] zusammengefasst. Für die GVP des DB_REF gelten folgende Regelungen (Punktstatus 4, vgl. Tabelle 2.3):

Lagegenauigkeit:

- Standardabweichung durchschnittlich < 5 mm

Höhengenauigkeit:

- Standardabweichung durchschnittlich < 1 mm

Neben der absoluten Gleislage, welche aus den GVP abgeleitet wird, ist vor allem die relative Gleislage von entscheidender Bedeutung. Sie wird in [Ril. DB 2011-3] wie folgt definiert:

Gegenseitige Höhenlage der Schienen:

- Abweichung des Ist-Höhenunterschieds vom Soll-Höhenunterschied < 2 mm

Längshöhe der Schienen:

- Abweichung des Ist-Höhenunterschieds zweier benachbarter Messpunkte im Abstand von 5 m vom Soll-Höhenunterschied < 2 mm
- Abweichung der Ist-Höhe eines Einzelpunkts von der Soll-Höhe < 5 mm

Spurweite:

- Abweichung der Ist-Spurweite (1,435 m) < 2 mm

Richtung:

- Abweichung des Ist-Lageunterschieds zweier benachbarter Messpunkte im Abstand von 5 m vom Soll-Lageunterschied < 2 mm
- Abweichung der Ist-Lage eines Einzelpunkts von der Soll-Lage < 5 mm

Abnahmevermessung

Im Anschluss an den Neu- oder Umbau von Gleisen folgt die Abnahmevermessung. Analog zur Absteckung gibt es Vorschriften für den konventionellen Schotterbau [Ril. DB 2006-2] und für die FF [Ril. DB 2003]. Die dort definierten Toleranzen sind sehr detailliert und richten sich nach dem verwendeten Messsystem und den angestrebten Streckengeschwindigkeiten. Für jedes Messsystem werden Längshöhe, gegenseitige Höhenlage (Überhöhungsdifferenz), Richtung und Spurweite als Prüfgrößen eingeführt. Für die daraus entstehenden Matrizen werden Beurteilungsmaßstäbe in Form der sogenannten Störgröße/Reaktion-Werte (SR-Werte) definiert, bei deren Überschreitung Maßnahmen von den Verantwortlichen zu treffen sind. Die Prüfung der Abnahmetoleranz wird als SR_0 bezeichnet. Weitere Details sind in [Ril. DB 2003] nachschlagbar. Aufgrund der verschiedenen Messverfahren werden für die einzelnen Prüfgrößen lediglich die Wertebereiche für den Schotterbau zusammenfassend dargestellt:

absolute Gleisgeometrie:

- Lage (Gleisabstand): $SR_0 = +10$ mm
- Höhe: $SR_0 = -20$ bis $+10$ mm

relative Gleisgeometrie:

- Längshöhe: $SR_0 = 2$ bis 5 mm
- gegenseitige Höhenlage: $SR_0 = 2$ bis 3 mm
- Richtung: $SR_0 = 3$ bis 5 mm
- Spurweite: $SR_0 = -2$ bis $+4$ mm

Für die Abnahmevermessung der FF gilt [Ril. DB 2011-3]. Dabei handelt es sich um eine geplante Richtlinie, so dass davon ausgegangen werden muss, dass zwischenzeitlich entsprechende Abnahmetoleranzen im Einzelfall über die VOB vereinbart werden müssen. Als fachliche Ausgangsbasis werden die oberbautechnischen Anforderungen aus [Ril. DB 2008] verwendet. Der Abschnitt „Gleisgeometrische Abnahme“ definiert für die Abnahme der äußeren Geometrie:

absolute Gleisgeometrie:

- Lage und Höhe: ≤ 10 mm (Standardabweichung)

relative Gleisgeometrie:

- hor. und vertikales Profil: $SR_0 = \pm 4$ mm für alle Messwerte sowie
 ± 3 mm für 95% der Messwerte auf einer Streckenlänge von 50 m mit einer Schrittweite von 25 m
- gegenseitige Höhenlage: $SR_0 = \pm 3$ mm
- Spurweite: $SR_0 = \pm 2$ mm
- Verwindung: $SR_0 = < 1$ ‰

Bei der Abnahmevermessung werden die SR-Werte aus diskreten Messungen entlang der Trasse bestimmt. Die Dichte der Einzelmessungen wird von Auftraggeber vorgegeben. Bei den Messungen des RACER II im GBT wurde beispielsweise die Bestimmung der Gleisparameter entsprechend Abbildung 2.2 alle 2,5 m entlang der GMA verlangt. Bei 114 km Gleis entspricht das rund 45.000 Einzelmessungen. Eine entsprechende Anzahl von wiederkehrenden Messungen kann nur mit einem automatisierten Messsystem mit gleichbleibender Qualität geleistet werden.

Messgenauigkeit

Die vorgegebenen Toleranzen der anwendungsbezogenen Vermessungsaufgaben müssen mit einem Messsystem nachgewiesen werden. Die Genauigkeit des Messsystems wird durch die Messunsicherheit u nach [DIN-13005 1999] beschrieben, wobei u unter bestimmten Umständen ([Heunecke 2014], [Hennes 2013]) mit einer (Vergleichs-)Standardabweichung σ gleichgesetzt werden kann. Für weitere Details zur Messunsicherheit eines Messsystems wird auf Kapitel 5.5.2 verwiesen.

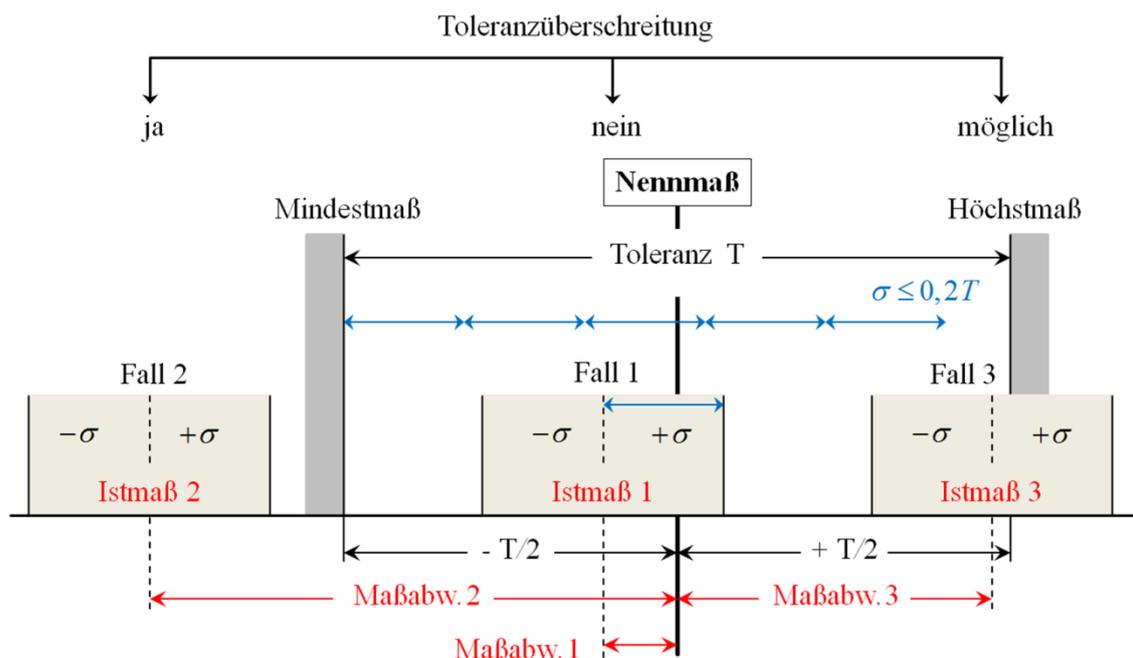


Abb. 2.9: Prüfung auf Toleranzüberschreitung [Heunecke 2014]

Abbildung 2.9 zeigt beispielhaft ein Nennmaß (vorgegebenes Sollmaß) mit zugehörigem Toleranzbereich T. Ferner liegen drei Messungen vor (Istmaß 1-3) mit der Standardabweichung σ , welche die Messunsicherheit des Messsystems repräsentiert. Diese Gleichsetzung gilt allerdings nur dann, wenn bei der Ermittlung einer Standardabweichung auch die Ermittlungsmethode B berücksichtigt wird (Kapitel 5.4.2). Die Entscheidung, ob ein Istmaß innerhalb von T liegt kann nur dann getroffen werden, wenn σ deutlich kleiner als T ist. In der Praxis hat sich folgendes Verhältnis etabliert, was allerdings symmetrische Verhältnisse unterstellt:

$$V = \frac{\sigma}{T} \leq 0,2 \quad (2.1)$$

[Heunecke 2014], [DIN-18710 2010], wobei V stellenweise mit $V = 0,1$ und verschiedentlich auch mit $V = 0,3$ angeführt wird. Bezogen auf Abbildung 2.9 ist die Entscheidung in den Fällen 1 und 2 eindeutig, im Fall 3 jedoch ungewiss. Bei der Auswahl und Konzeptionierung von Messsystemen muss V entsprechend berücksichtigt und es muss σ zur Kennzeichnung der Qualität des Messsystems ermittelt werden (Kapitel 6, Kapitel 9).

2.4.2 Unterteilung von Gleisvermessungssysteme

Gleisvermessungssysteme sind MSP (Kapitel 3), welche die Gleisparameter einer Trasse durch die Auswertung der Messdaten der integrierten Sensoren bestimmen. Sie sind gleisgebunden und führen die Bestimmung der Gleisparameter weitestgehend automatisiert durch. Gleisvermessungssysteme werden unterteilt in:

- Mobile Mapping Systeme
- Messtriebwagen
- Gleismesswagen

Mobile Mapping Systeme

Mobile Mapping Systeme (MMS) sind MSS, welche unmittelbare Umgebung von einem mobilen Trägersystem aus erfassen. Aufgrund unterschiedlichster Anwendungsfelder für kinematische MSS gibt es verschiedene mobile Trägersysteme wie straßen-, luft- oder schienengebundene Fahrzeuge. Bei luftgestützten Systemen setzen sich verstärkt unbemannte Luftfahrzeuge (unmanned aerial vehicle, UAV) durch. Daneben gibt es eine Vielfalt tragbarer MMS (Kapitel 3.3.2).

Als Sensoren werden meist Profilsensoren und Videokameras eingesetzt. Die kinematische Messdatenerfassung ermöglicht hohe Fahrtgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h, allerdings ist die Genauigkeit der Messdaten aufgrund der Trajektorienbestimmung der Sensoren im übergeordneten Bezugssystem begrenzt. MMS eignen sich bei der Gleisvermessung insbesondere für die Bestimmung des Lichttraumprofils oder die Dokumentation von Tunnelwänden.

An dieser Stelle werden lediglich die MMS der Gleisvermessung behandelt. Grundsätzlich ist jedes MMS für die Gleisvermessung einsetzbar, sofern das mobile Trägersystem auf die Gleisführung adaptierbar ist. Dabei können beispielsweise straßengebundene Messsysteme wie MOSES [Gräfe 2003] auf einem Wagon transportiert werden (Abbildung 2.10, Variante 2). Alternativ bietet sich die Montage spezieller Ausleger mit Spurführungsrädern an, mit denen sich Straßenfahrzeuge innerhalb des Gleises mit eigenem Antrieb bewegen können (Abbildung 2.10, Variante 3). Ein Beispiel hierzu stellt die Firma IGI mit ihrem Messsystem Railmapper vor [Minten 2011].

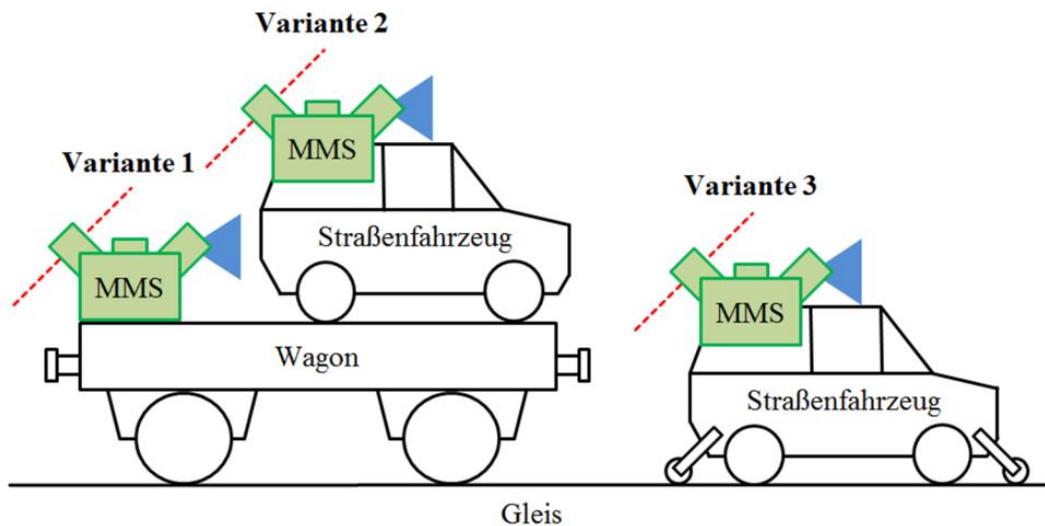


Abb. 2.10: Einsatzmöglichkeiten eines MMS bei der Gleisvermessung

Die zuvor genannten MMS sind fest mit einem Straßenfahrzeug als mobiles Trägersystem verbunden. Mittlerweile sind viele MMS auch in eigenständiger, kompakter Bauweise und damit unabhängig vom Transportsystem erhältlich. Sie können direkt auf ein beliebiges Schienenfahrzeug montiert werden (Abbildung 2.10, Variante 1). StreetMapper Portable von IGI [IGI 2012] und Pegasus:Two von Leica Geosystems [Leica 2014] sind Vertreter solcher MMS.

Messtriebwagen

Schienenfahrzeuge mit eigenem Antrieb und Sensoren zur Bestimmung der Gleisparameter werden als Messtriebwagen bezeichnet. Sie sind gleisgebunden und können aufgrund des hohen Eigengewichts grundsätzlich nicht für den laufenden Schienenverkehr aus dem Gleis geräumt werden. Das Eigengewicht bietet jedoch den Vorteil, dass das Gleis unter Last vermessen werden kann. Zudem erfolgt die Messdatenerfassung kinematisch und in einer vergleichbaren Fahrtgeschwindigkeit wie beim MMS. Gleissperrungen sind aufgrund der Fahrgeschwindigkeit nicht oder nur eingeschränkt erforderlich. Nachteilig sind die hohen Kosten eines solchen Messsystems, weshalb es nur in geringer Stückzahl produziert und lediglich auf Hauptstrecken und viel befahrenen Strecken eingesetzt wird.

Der Umfang und die Art der Sensoren eines Messtriebwagens sind anwendungsbezogen und daher individuell unterschiedlich. Die DB setzt beispielsweise zwei Ultraschall-Prüfzüge ein, um Materialfehler an den Schienenköpfen zu detektieren. Zur Erfassung des Lichtraums wird der

Licht-raumprofil-Messtriebwagen LiMez III eingesetzt [Wirth 2008]. Der Messtriebwagen wurde 2005 entwickelt und erlaubt eine maximale Arbeitsgeschwindigkeit von 100 km/h. Sämtliche Sensoren sind auf einem separaten Trägerrahmen montiert (MSP), der mittels Schwingungsdämpfung mit dem Schienenfahrzeug verbunden ist (Abbildung 2.11). Die Dämpfungsbewegung wird über einen Schienenprofilscanner mathematisch kompensiert.

Die Detektion von Lichtraumengstellen auf Basis der Lichtraumprofile erfolgt über zwei 2D-Rotationlaser und ein Videomesssystem (Abbildung 2.11) mit einer Punktgenauigkeit von < 20 mm bezogen auf das lokale Gleiskoordinatensystem. Hochfrequent messende Sensoren ermöglichen die kinematische Bestimmung der 6-DoF-Parameter der MSP als Trajektorie (Odometer + Inertial Measuring Unit (IMU) / Global Navigation Satellite System (GNSS)). Ebenfalls kinematisch werden die Spurweite (Profilscanner), die Überhöhung (IMU / GNSS) und der Abstand des befahrenen Gleises zum Nachbargleis bestimmt. Die Ermittlung sämtlicher Gleisparameter erfolgt alle 2 m mit einer Stationierungsgenauigkeit von 0,1 m. Die Synchronisation der Messwerte wird über das Odometer gewährleistet.

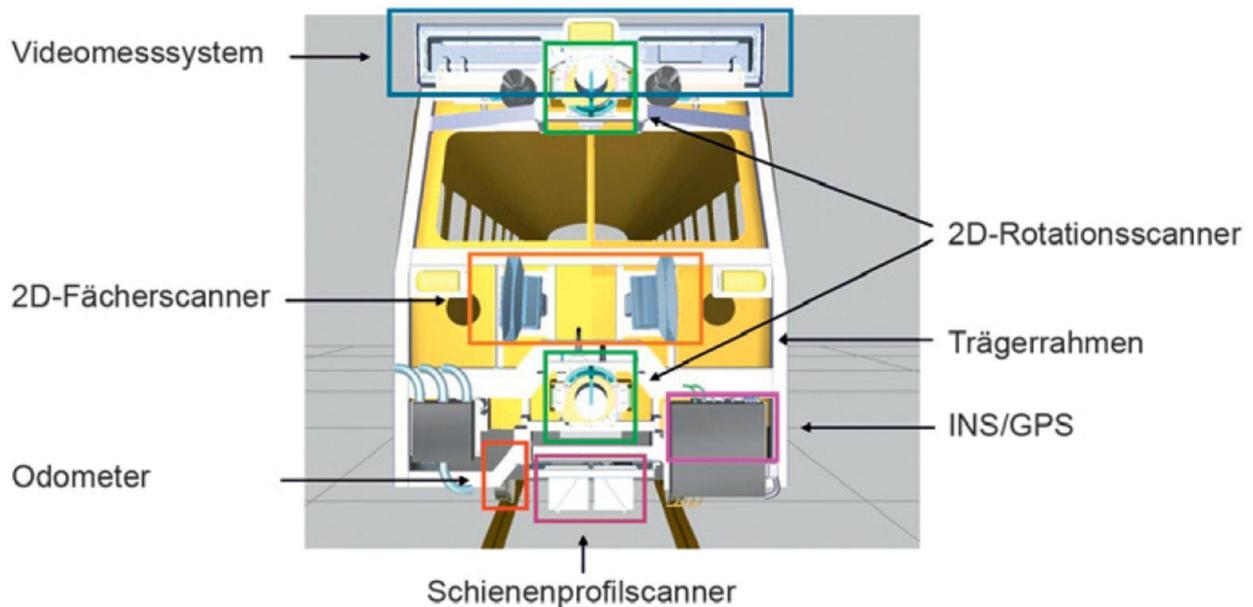


Abb. 2.11: Sensoren des Lichtraumprofil-Messtriebwagens LiMez III, [Wirth 2008]

Für eine millimetergenaue Erfassung der Gleisparameter entsprechend Abbildung 2.2 wird beispielsweise die Gleisvormessmaschine EM-SAT 120 von Plasser & Theurer eingesetzt [Plasser u. Theurer 2015]. Der Messtriebwagen wurde 2005 in Dienst gestellt und erlaubt eine maximale Arbeitsgeschwindigkeit von 10 km/h. Die Bestimmung der Gleisparameter erfolgt über eine bis zu 200 m lange Sehne (vgl. Abbildung 2.8), die über einen selbstfahrenden, sogenannten Satelliten mit integrierter Laser-Sendeeinheit auf die aktive Zieltafel des Messtriebwagens projiziert wird. Die absolute Gleislage wird über tachymetrische Bestimmung der GVP hergestellt, wobei mehrere Tachymeter am Messtriebwagen montiert sind, die manuell über Videokameras auf die GVP ausgerichtet werden können. Die ermittelten Gleisparameter der Ist-Gleislage können unmittelbar per Funk an eine nachfolgende Gleisrichtmaschine übertragen werden.

Gleismesswagen

Genau wie Messtriebwagen sind Gleismesswagen während der Datenerfassung gleisgebunden. Ihre kompakte Bauweise ermöglicht jedoch die schnelle Räumung und Wiedereinsetzung des Messsystems in das befahrene Gleis. Gleismesswagen werden meist in Trolley-Bauweise hergestellt. Dabei handelt es sich um eine verformungsstabile Trägerplattform mit fest installierter Sensorik (MSP, Kapitel 3), die sich mittels Rädern und Spurführungssystem im Gleis bewegt. Der Antrieb der Trolleys erfolgt manuell über eine Schubstange mit Bremse oder motorgetrieben.

Gleismesswagen in Trolley-Bauweise sind vielfältig einsetzbar. Die meisten Hersteller konzipieren ihr Produkt als modulares Messsystem, wobei die einzelnen Module auf die Anforderungen der unterschiedlichen Anwendungen zugeschnitten sind. So gibt es beispielsweise für den Gleismesswagen GEDO CE 2.0 der Firma Trimble [Trimble 2013] Module für die Integration von beispielsweise Tachymetern, Prismen, Laserscannern und GNSS-Empfänger, die auch teilweise miteinander kombiniert werden können.



Abb. 2.12: Bestimmung der Gleisparameter über eine Langsehne (iGW, intermetric) [intermetric 2015]



Abb. 2.13: Bestimmung der Gleisparameter mittels IMU (Amberg IMS 1000), [Amberg 2015]

Je nach sensorischer Ausstattung und Konzipierung können Gleismesswagen für Aufgaben der Absteckung, Aufmessung, Kontrollmessungen, Materialprüfung und zur Bestimmung des Lichtraumprofils verwendet werden. Entsprechend umfangreich ist die Bestimmung der möglichen Gleisparameter. Gleismesswagen können je nach Konzipierung kinematisch oder im SGM betrieben werden. Im Gegensatz zu Messtriebwagen sind Gleismesswagen kostengünstiger, erzielen jedoch auch wesentlich geringere Arbeitsgeschwindigkeiten.

Beim Gleismesswagen iGW der Firma intermetric [intermetric 2015], [Möser u.a. 2000] erfolgt die Bestimmung der Gleisparameter entsprechend Abbildung 2.2 über das Langsehenverfahren (Abbildung 2.8). Die Langsehne wird wie beim Messtriebwagen EM-SAT 120 mittels Laseralignment über eine aktive Zieltafel auf dem Gleismesswagen realisiert (Abbildung 2.12). Die Einrichtung der Laserlinie erfolgt über ein im GVS stationiertes Tachymeter, das sich außerhalb des

Gleismesswagens befindet. Das Messsystem ist sowohl kinematisch als auch im SGM einsetzbar und ermittelt die Ablagewerte zur Soll-Gleislage.

Im Gegensatz zum iGW nutzen die meisten Gleismesswagen alternative Verfahren zur Bestimmung der Gleisparameter. Die Bestimmung der absoluten Gleislage erfolgt im Regelfall über ein Tachymeter, welches sich außerhalb des Gleismesswagens befindet oder fest mit der MSP verbunden ist. Bei geringen Genauigkeitsanforderungen kann die Stationierung des Gleismesswagens auch über einen sogenannten Profiler erfolgen, einem orthogonal zur Fahrtrichtung montierten Distanzmesser, der manuell auf einen naheliegenden GVP ausgerichtet wird, [Trimble 2013], [Amberg 2015]. Die Firma Amberg bietet darüber hinaus die Möglichkeit zur Integration einer IMU [Amberg 2015]. Allerdings müssen die entstehenden Driften der IMU über eine regelmäßige Stützung innerhalb des GVS mittels Tachymeter (Abbildung 2.13) oder Profiler kompensiert werden.

3 Multisensorsysteme

3.1 Allgemeines

Als Sensoren (auch Detektor, Aufnehmer, Fühler) werden technische Bauteile verstanden, die physikalische oder chemische Eigenschaften der Umgebung erfassen und in ein quantitatives elektrisches Signal umwandeln. Sie stellen das erste Glied einer Messkette dar. Oftmals bestehen die Standardmesssysteme der Instrumentenhersteller ihrerseits aus mehreren Sensoren und bilden bereits ein MSS. Bei MSS werden Sensormodule und / oder Sensoren in einem gemeinsamen Messsystem integriert mit dem Ziel, aus den Messdaten Informationen der unmittelbaren Umgebung abzuleiten. Die Informationen (Zielgrößen) können beispielsweise für Fahrer-Assistenzsysteme [UDV 2015], Precision Farming [SenGIS 2014] oder militärische Zwecke (Verfolgung ballistischer Flugbahnen, akustische Ortung, etc.) [Rheinmetall Defence 2015] verwendet werden. Für weitere Anwendungsbeispiele wird auf Kapitel 3.3 verwiesen.

Nach [Vennegeerts 2011] ist die Voraussetzung für die gemeinsame Auswertung der Messdaten in einem MSS „(...) ein bekannter räumlicher und zeitlicher Bezug zwischen den Systemkomponenten, der mittels Kalibrierung und Synchronisation hergestellt werden kann.“, wobei der zeitliche Bezug lediglich bei kinematischen MSS berücksichtigt werden muss (Kapitel 3.3.2). Aufgrund unterschiedlicher Messfrequenzen und Latenzzeiten treffen die Messdaten der einzelnen Sensormodule und Sensoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der zentralen Recheneinheit des MSS ein. Die Messdaten kinematischer MSS müssen daher mit Zeitstempeln versehen und durch Interpolation untereinander synchronisiert werden. Dieser Schritt entfällt bei MSS, die während der Messdatenerfassung örtlich fixiert sind.

Der räumliche Bezug der Systemkomponenten zum MSS muss als relative Orientierung in jedem Fall durch die Ermittlung der 6-DoF-Parameter bestimmt werden (Kapitel 5). Im Gegensatz zu Geosensornetzen sind die Sensormodule eines MSS über eine MSP fest miteinander verbunden. Die MSP muss die erforderliche Steifigkeit und Langzeitstabilität aufweisen, um die 6-DoF-Parameter der relativen Orientierung aller Sensormodule zu garantieren. Können diese Forderungen nicht gänzlich erfüllt werden, müssen die verbleibenden Einflüsse mathematisch modellierbar sein und entsprechend korrigiert werden.

3.2 Anforderungen

Die Anforderungen eines MSS richten sich nach den Genauigkeitsanforderungen der Zielgrößen, aus denen sich wiederum die Anforderungen an die verwendeten Sensormodule ergeben. Als Bestandteil der Messunsicherheit müssen ferner die Eigenschaften der MSP und des zugehörigen Trägersystems berücksichtigt werden.

Anforderungen an die Sensormodule

Je nach Anwendung sind insbesondere folgende Eigenschaften relevant:

- Messprinzip
 - taktile \Leftrightarrow berührungslose Messung
 - statische \Leftrightarrow kinematische Messung
- Sensoreigenschaften
 - Reichweite
 - Auflösung
 - Messfrequenz
- Genauigkeit
- Robustheit
 - Umgebungstemperatur (insbesondere bei berührungslosen Sensoren), Materialtemperatur (insbesondere bei taktilen Sensoren)
 - Luftfeuchtigkeit, Spritzwasser, Regen (insbesondere bei berührungslosen Sensoren, Elektronik allgemein)
 - Lichtverhältnisse (insbesondere bei Fremdlichteinflüssen auf optischen Sensoren)

Darüber hinaus müssen im Einzelfall noch weitere Eigenschaften wie beispielsweise Gewicht, Material oder Kosten berücksichtigt werden.

Die Zielgrößen eines MSS werden aus den Messdaten der Sensormodule entweder direkt oder indirekt über einen funktionalen Zusammenhang berechnet. Die Genauigkeiten der Messdaten sind im Regelfall als Messunsicherheiten u_{MD} oder als Standardabweichungen s_{MD} in Form von Herstellerangaben gegeben. Alternativ kann s_{MD} empirisch bestimmt und u_{MD} durch Erfahrungswerte ergänzt werden. Durch Einsetzen von u_{MD} in den funktionalen Zusammenhang lassen sich die Messunsicherheiten der Zielgrößen u_{ZG} bestimmen, indem u_{MD} im stochastischen Modell berücksichtigt wird. Für weitere Details wird auf Kapitel 5.5.2 verwiesen.

Anforderungen an die MSP

Die Konstruktion der MSP muss vor allem stabil und verformungsfrei sein, um die relative Anordnung und Orientierung der einzelnen Sensoren zu wahren. Dabei müssen temporäre Belastungen berücksichtigt werden, sofern sie im Laufe der Messung auftreten. So können beispielsweise beim transportbedingten Anheben des MSS Verformungen der MSP entstehen. Hierbei

muss gewährleistet sein, dass die Verformungen bei Wiederaufnahme der Messtätigkeiten vollständig in ihren Ausgangszustand zurückgehen.

Ferner muss die mechanische Beanspruchung des Trägersystems berücksichtigt werden. Bei fahrzeuggestützten Trägersystemen treten meist Vibrationen auf, die an die MSP übertragen werden. Insbesondere hochfrequente Schwingungen und Stöße können die Stabilität der MSP gefährden oder die Sensoren beschädigen. In solchen Fällen müssen zusätzliche Dämpfungssysteme an der Schnittstelle zwischen MSP und Trägersystem integriert werden.

Die MSP muss zudem äußere Störeinflüsse von den Sensoren fernhalten. Dies können beispielsweise durch das Trägersystem verursachte elektromagnetische Felder sein, welche die Elektronik der Sensoren beeinflussen. Sofern die eigene Abschirmung der Sensoren nicht ausreicht, müssen Fremdlichteinflüsse, Feuchtigkeit und die Umgebungstemperatur berücksichtigt und gegebenenfalls reguliert werden. Abhängig vom verwendeten Material muss der Temperaturexpansionskoeffizient der MSP bestimmt und bei der Berechnung der Zielgrößen entsprechend berücksichtigt werden (Kapitel 6.3).

Anforderungen an das Messobjekt

Als Messobjekt werden alle Oberflächen und Strukturen verstanden, die von den Sensoren aufgenommen werden. Dabei muss die Sensorik auf die Eigenschaften des Messobjektes abgestimmt sein, wobei insbesondere folgende Aspekte zu prüfen sind:

- Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes
(z.B. Reflektivität, Rauigkeit, Farbe, Material oder Temperatur der Oberfläche)
- Entfernung des Sensors zum Messobjekt
(Reichweite und Auflösungsvermögen des Sensors)

Bei der Datenaufnahme muss sich das Messobjekt im Ruhezustand befinden. Gegebenenfalls kann sich auch das Messobjekt am ruhenden MSS vorbei bewegen. Sofern sich beide Systeme simultan bewegen, sind Kenntnisse über die Trajektorie des Messobjektes erforderlich. Letzteres erfordert die präzise Prädiktion der Trajektorie aus vergangenen Messungen oder das Anbringen und Kalibrieren zusätzlicher Sensoren am Messobjekt.

3.3 Anwendungsbeispiele für MSS

3.3.1 Polarmesssysteme

Polare Messsysteme wie beispielsweise Tachymeter, Laserscanner oder Lasertracker sind eigenständige MSS, die gleichzeitig Bestandteil eines anderen MSS wie beispielsweise MMS (Kapitel 3.3.2) oder Gleisvermessungssysteme (Kapitel 2.4.2) sein können. Als eigenständige MSS müssen polare Messsysteme unabhängig kalibriert werden (Kapitel 4.3.1), bevor sie über die Bestimmung der 6-DoF-Parameter in ein übergeordnetes MSS integriert werden können (Kapitel

6.1). Stellvertretend für eine Vielzahl polarer Messsysteme wird im Folgenden das universell einsetzbare Tachymeter vorgestellt.

Aus den für den Nutzer eines Tachymeters originären Messgrößen Horizontalrichtung (Hz), Vertikalwinkel (V) und Distanz (D) als polare Messelemente werden je nach Anwendung Zielgrößen wie beispielsweise 3D-Koordinaten (X, Y und Z) im lokalen, achsenzentrisch gelagerten Koordinatensystem des Tachymeters erzeugt. Die diesbezüglich primären Sensoren zur Bestimmung der originären Messgrößen sind folglich:

- Winkelmesssystem (Hz)
- Winkelmesssystem (V)
- elektrooptisches Distanzmesssystem (D)

Hinzu kommen sekundäre, teilweise optionale Sensoren wie beispielsweise:

- Kompensator (Zweiachs-Inklinometer zur Kompensation der Stehachsschiefe)
- automatische Zielerfassung
 - o Grobzielung (Zielerkennung)
 - o Feinzielung (Maximumpeilung)
- Übersichtskamera (Weitwinkelkamera, Umgebungserfassung)
- koaxiale Teleskopkamera (Video-Livestream, Ziel-Identifikation)
- GNSS-Anbindung (globale Koordinaten)

Die sekundären Sensoren liefern zusätzliche Informationen der Messumgebung, die zur Optimierung des Messprozesses genutzt werden. Die automatische Zielerfassung ermöglicht die automatische Zielfindung und Messung durch Prismen signalisierter Objektpunkte. Ergänzend kann die Übersichtskamera in Kombination mit der koaxialen Teleskopkamera dazu verwendet werden, das Fernrohr auf ein beliebiges Ziel auszurichten, ohne dass sich der Anwender am Messsystem aufhalten muss. Gleichzeitig können mit dieser Technik anvisierte Ziele mit Bildinformationen dokumentiert werden.

Sekundäre Sensoren dienen auch zur Korrektur der Messwerte. Der Kompensator bestimmt beispielsweise die Abweichungen der Stehachse gegenüber der Lotrichtung, wodurch die polaren Messelemente Hz und V entsprechend korrigiert werden. Über integrierte Thermometer werden zudem interne Gerätetemperaturen an Bauteilen gemessen, deren Erwärmung Auswirkungen auf die Messergebnisse der betroffenen Sensoren haben.

Abschließend können über Schnittstellen weitere Sensoren zur Messdatenerfassung mit der MSP verbunden und damit in den Messprozess der MSS eingebunden werden. Ein Beispiel hierzu

bildet die Adaption eines GNSS-Empfängers, mit dem die Stationierung des Tachymeters flexibler gestaltet werden kann.

3.3.2 Mobile Mapping Systeme

Die Nutzung satellitengestützter Messverfahren wie beispielsweise des Global Positioning Systems (GPS) Anfang der 90er Jahre schuf eine attraktive Möglichkeit zur Positionsbestimmung eines MSS, woraufhin die Entwicklung der Mobile Mapping Systeme einsetzte. Die frühen MMS erfassten die unmittelbare Umgebung mit Kameras und Videosystemen [Toth 2009]. Nach [Vennegeerts 2011] sind MMS MSS mit folgenden, wesentlichen Eigenschaften:

- (massenhafte) Erfassung von Umgebungsdaten
- (globale) Georeferenzierung

Dabei kommen im Regelfall monofunktionale Sensoren zum Einsatz, das heißt Sensoren, die entweder für die Erfassung der Umgebungsdaten (Aufnahmesensoren) oder für die Bestimmung der Parameter der absoluten Orientierung der MSP (referenzierende Sensoren) allein nutzbar sind. Zu den 6-DoF-Parametern der absoluten Orientierung gehören die 3 Translationsparameter (Georeferenzierung) sowie die 3 Rotationsparameter (Orientierung) der MSP im übergeordneten Bezugsrahmen. Die bevorzugten Aufnahmesensoren im terrestrischen Anwendungsbereich sind Laserscanner und Kamera- beziehungsweise Videosysteme. Als referenzierende Sensoren werden zumeist GNSS, IMU, MEMS (micro electronic mechanical system), Inklinometer und Odometer verwendet.

Im Gegensatz zur monofunktionalen Sensorik stellt [Vennegeerts 2011] eine Methode zur kombinierten, kinematischen Georeferenzierung vor. Mit dem Ansatz SLAM (simultaneous localisation and mapping) wird das Ziel verfolgt, ein Bezugssystem ausschließlich aus den Messdaten der lokalen Umgebung zu schaffen. Basierend auf SLAM beschreibt [Vennegeerts 2011] einen Ansatz, der die integrierte Auswertung hochauflösender Aufnahmesensoren mit ausschließlich referenzierenden Sensoren speziell für den kinematischen Anwendungsfall optimiert.

MMS können sowohl im statischen (SGM) als auch im kinematischen Messmodus betrieben werden. In beiden Fällen ist die auf einem mobilen Trägersystem befindliche MSP beweglich, wobei die überwiegende Mehrheit der MMS die Erfassung der Umgebung kinematisch durchführt. Im Gegensatz zu statischen Messsystemen stellen kinematische MMS zusätzliche Anforderungen an die Synchronisation der Messwerte. Die 6-DoF-Parameter der MSP beschreiben eine Trajektorie und müssen abhängig von der Messfrequenz der Aufnahmesensoren wiederholt generiert werden. Neben den Messunsicherheiten der einzelnen Sensoren müssen deren unterschiedliche Messfrequenzen sowie die Latenzzeiten der eintreffenden Signale bei der gemeinsamen Auswertung berücksichtigt werden. Die integrierte Auswertung kinematischer Messsysteme erfordert unter anderem den Einsatz von Echtzeitbetriebssystemen, die Interpolation der Messdaten sowie die Prädiktion der Trajektorie z. B. durch die Verwendung eines KALMAN-Filters

[Haykin 2001], [Eichhorn 2005]. Weiterführende Informationen können beispielsweise unter [Hesse 2008] und [Vennegeerts 2011] nachgeschlagen werden.

Die meisten MMS benötigen ein mobiles Trägersystem wie Kraftfahrzeuge, Flugzeuge / UAVs, Schienenfahrzeuge oder Schiffe, wobei das MSS im Regelfall fest im Trägersystem integriert ist. Beispiele für fahrzeuggebundene MMS sind MoSES [Gräfe 2007], StreetMapper 360 [IGI 2012] oder VISAT [Hassan u.a. 2008]. Daneben wird eine Vielzahl mobiler MMS angeboten, die aufgrund ihrer kompakten Bauweise flexibel auf unterschiedlichen Trägersystemen eingesetzt werden können, wie beispielsweise Pegasus:Two [Leica 2014] oder StreetMapper Portable [IGI 2012]. Die Firma p3d systems stellt darüber hinaus mit ProScan ein MMS bereit, bei dem das Trägersystem mit Hilfe einer Tragevorrichtung durch eine Person ersetzt werden kann [P3D Systems 2015]. Damit wird beispielsweise der fließende Übergang zwischen Indoor- und Outdoorvermessung möglich. Ein terrestrischer Laserscanner bildet hierbei den Aufnahmesensor, die Georeferenzierung erfolgt über GNSS, Tachymetrie oder durch den Laserscanner erfasste Passmarken.

3.4 Konzeption des RACER II

3.4.1 Allgemeines

Das Gleisvermessungssystem RACER II wurde im Zeitraum 06/2010 bis 12/2011 im GeoLab der UniBwM in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Ingenieurbüro Ristag Ingenieure AG [Ristag 2015] entwickelt. Hintergrund war die Abnahmevermessung von 114 km FF im GBT, die innerhalb eines Vermessungskonsortiums für die AlpTransit Gotthard AG (ATG) [AlpTransit Gotthard 2015] als Bauherrn durchzuführen war.

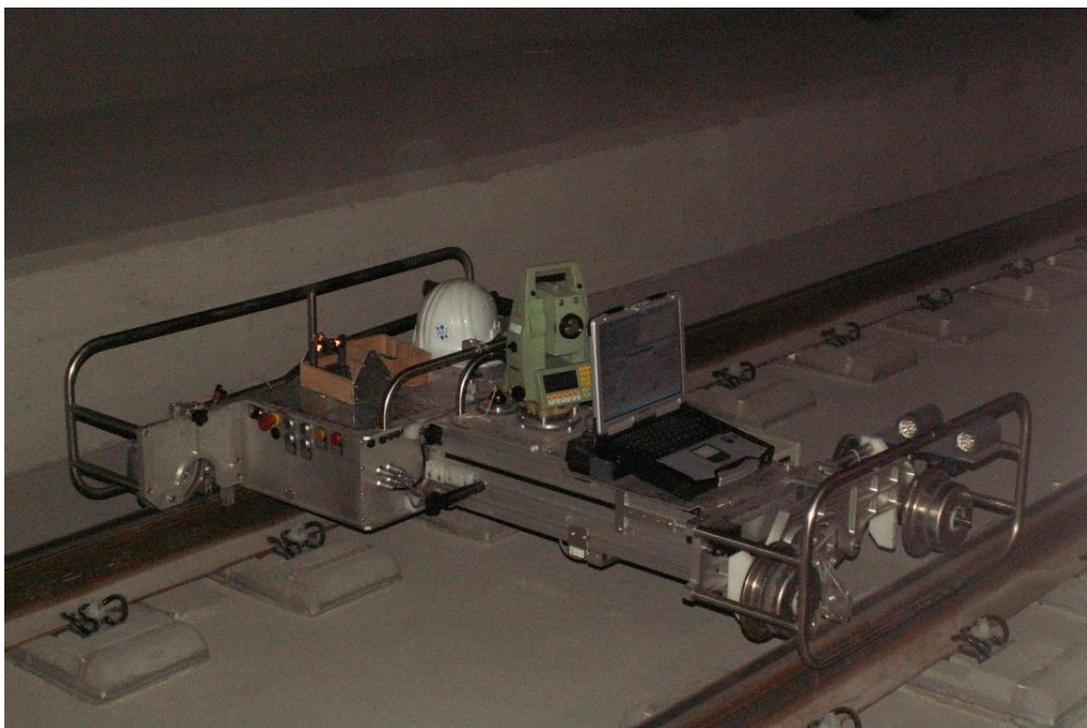


Abb. 3.1: Gleisvermessungssystem RACER

Beim RACER II handelt es sich um eine Neukonstruktion auf Basis des Vorgängersystems RACER (Abbildung 3.1), das ebenfalls in Kooperation mit Ristag Ingenieure AG entwickelt wurde. RACER wurde für die Abnahmevermessung des Lötschberg-Basistunnels eingesetzt, sollte jedoch für das Projekt GBT hinsichtlich der erzielbaren Arbeitsleistung optimiert werden, wobei eine Beschleunigung eines Stationierungszyklus mit durchschnittlich 60 – 65 Sekunden bei 2,5 m Stationsintervallen um 20% angestrebt wird. Im Rahmen der Konzeptionierung fiel die Entscheidung gegen eine Umrüstung des bestehenden Systems zu Gunsten der Neukonstruktion des RACER II.

Das Vorgängersystem RACER ist ein Gleismesswagen in massiver Trolley-Bauweise (Abbildung 3.1). Die Zielgrößen (Kapitel 2.1) werden im SGM bestimmt, wobei das MSS für das Verfahren hydraulisch angehoben und für die Messung auf drei Auflagepunkte abgesetzt wird. Anschließend wird der Gleismesswagen über eine Gasdruckfeder an eine der Schieneninnenkanten herangezogen, so dass die MSP an zwei kugelförmigen Anschlagpunkten mit einer Basis von 80 cm anliegt. Die Spurweite wird an der gegenüberliegenden Seite mittels eines Lasertriangulationssensors indirekt über einen gefederten Hebelarm mit kugelgelagerter Stahlrolle gemessen. Die 6-DoF-Bestimmung des MSS im übergeordneten GVS erfolgt über die Messung von vier GVP mittels eines Präzisionstachymeters, welches fest mit der MSP verbunden ist. Die Zielgrößen Überhöhung und Gradienten werden durch ein Zweiachs-Inklinometer redundant bestimmt. Für weitere Informationen zum Gleisvermessungssystem RACER siehe [Heister u.a. 2007].



Abb. 3.2: Gleisvermessungssystem RACER II

Obwohl der RACER vorwiegend aus Aluminium besteht, beträgt das Leergewicht rund 80 kg. Zum Transport muss das Gleisvermessungssystem in zwei Bauteile zerlegt werden. Hinzu kommen rund 50 kg für die 12/24V Spannungsversorgung und das Gewicht des Tachymeters [Heister u.a. 2007]. Das Heben/Senken und Klemmen der MSP war ein wesentlicher Grund für die Neukonstruktion des RACER II (Abbildung 3.2). Durch die Einführung von Lasertriangulations-

sensoren zur beidseitigen, berührungslosen Erfassung der Schienengeometrie wird das Gleisvermessungssystem auch hinsichtlich Gewicht, Energieverbrauch und Messgeschwindigkeit deutlich verbessert.

Eine weitere Grundsatzentscheidung betrifft die Aufspaltung des Gesamtsystems in einen separaten Mess- und Antriebswagen, wobei der Messwagen vom Antriebswagen über zwei Kupplungen geschoben wird. Die Vorteile liegen im geringen Gewicht der einzelnen Komponenten. Zudem können die zusätzlichen Ablageflächen des Antriebswagens zum Transport von Messzubehör oder die Montage zusätzlicher Sensoren genutzt werden, wobei die Gewichtsverteilung der zusätzlichen Lasten keinen Einfluss auf die Dreipunktauflage des Messwagens hat. Jedoch müssen bei Gleisräumung und Transport zwei Komponenten bewegt werden.

Darüber hinaus werden für den RACER II folgende Anforderungen gestellt, die insbesondere für die Abnahmevermessung der FF im GBT erfüllt werden müssen:

- Genauigkeitsforderungen an den Einbau der FF (speziell für die Abnahmevermessung)
- Soll-Ist-Vergleich während der Messung
- redundante Datenerfassung (Qualitätskontrolle)
- Erhöhung der Messgeschwindigkeit um 20%

Für den Einbau der FF im GBT gelten die in den Projektanforderungen definierten Verlegetoleranzen. Basierend auf den Projektanforderungen beim Lötschberg-Basistunnel, siehe [Heister u.a. 2007], wurden die Verlegetoleranzen beim GBT weiter reduziert. Für die Zielgrößen des RACER II ergeben sich nach [Völter 2011] sowie persönlicher Mitteilung durch [Ristag 2015] folgende Anforderungen, so wie sie in der ursprünglichen Ausschreibung definiert wurden:

- absolute Lage und Höhe: $\pm 0,5$ mm (Mittelwertabweichung)
Standardabweichung zum Mittelwert $\leq 1,0$ mm
Zulässige Abweichung vom Sollwert gegenüber den GVP der ATG, bezogen auf eine gleitende Streckenbasis von 5000 m bei Messpunkt-
abständen $\leq 0,5$ m
- Toleranz Überhöhung: $\pm 0,3$ mm (Mittelwertabweichung)
Standardabweichung zum Mittelwert $\leq 0,3$ mm
Zulässige Abweichung vom Sollwert bezogen auf eine gleitende
Streckenbasis von 5000 m bei Messpunkt-
abständen $\leq 0,5$ m
- Toleranz Spurweite: $-0,5$ bis $+1,5$ mm (Mittelwertabweichung)
Standardabweichung zum Mittelwert $\leq 0,5$ mm
Zulässige Abweichung vom Sollwert bezogen auf eine gleitende
Streckenbasis von 5000 m bei Messpunkt-
abständen $\leq 0,5$ m

Aus den gegebenen Verlegetoleranzen T_V beträgt die Genauigkeit des Gleisvermessungssystems RACER II im Rahmen der bei geodätischen Anwendungen üblichen Standardabweichung $s_v = 0,2 \cdot T_V$ (Kapitel 2.4.1). Entsprechend hoch sind die Genauigkeitsforderungen an die eingesetzte Sensorik und die Kalibrierung des Gesamtsystems (Tabelle 3.1). Die letzte Spalte belegt mit den Ergebnissen der Validierungsmessungen (Kapitel 9), dass diese Anforderungen auch erreicht werden.

Toleranz	T_V [mm]	s_v [mm]	s_G [mm]
absolute Lage und Höhe	$\pm 0,5$ mm	0,2 mm	0,18 mm
Überhöhung	$\pm 0,3$ mm	0,12 mm	0,15 mm
Spurweite	- 0,5 bis + 1,5 mm	0,4 mm	0,23 mm

Tab. 3.1: Toleranzvorgaben des GBT (T_V), Anforderungen des RACER II (s_v), Validierungsergebnisse des RACER II (s_G) nach Anlage 9.2

Um die geforderten Genauigkeiten s_v einhalten zu können, wurde bewusst auf die Entwicklung eines kinematischen Messsystems verzichtet. Die Messdatenerfassung während der Bewegung der MSP führt zu zusätzlichen Restriktionen, deren zuverlässige Lösung vor dem Hintergrund des vorgegebenen Projektzeitraums, dem Budget und der zur Verfügung stehenden Sensortechnik nicht gewährleistet werden konnte. Für Umsetzungen kinematischer MSS und der damit verbundenen Schwierigkeiten wird exemplarisch auf [Hesse 2008] und [Vennegeerts 2011] verwiesen.

Um vor Ort möglichst zeitnah auf die Ergebnisse der Vermessung reagieren zu können, muss ein in situ Soll-Ist-Vergleich der ermittelten Zielgrößen mit der vorgegebenen Trasse durchgeführt werden. Beim RACER II wird dabei die gleiche Verfahrensweise angewandt wie beim RACER. Die ermittelten Zielgrößen werden nach jedem Messquerschnitt über eine Schnittstellendatei an die Trassierungssoftware Toporail übergeben, die daraufhin über eine spezielle Applikation die Abweichungen zur Soll-Trasse berechnet und visualisiert. Näheres hierzu wird in Kapitel 8.4 beschrieben.

Analog zum Vorgängersystem wird beim RACER II ein Zweiachs-Inklinometer eingesetzt, um die Zielgrößen Querneigung und Gradienten kontrollieren zu können. Die Zielgrößen Lage und Höhe der GMA werden durch die redundante Bestimmung von vier GVP überprüft. Zusätzlich können beim RACER II durch die Verwendung von vier Lasertriangulationssensoren zwei unabhängige Spurweiten bestimmt werden, wodurch ebenfalls eine Kontrolle möglich ist unter der Voraussetzung, dass sich die Spurweiten auf einem Gleisabschnitt von 60 cm nicht signifikant ändern.

Auf die Gesamtlänge beider Tunnelröhren des GBT von 114 km müssen bei einer Schrittweite von 2,5 m 45.600 Messprofile im SGM erfasst werden. Entsprechende Datenmengen lassen sich nur mit einem hochgradig automatisierten MSS effizient gewinnen. Das Gleisvermessungssystem RACER II arbeitet nach einmaliger Initialisierung vollautomatisch. Beim Anwender ver-

bleibt die Aufgabe, die GVP durch Präzisionsprismen zu signalisieren und auf das Gleisvermessungssystem auszurichten. Die Verwendung von 360° -Prismen wurde vorab untersucht und verworfen, da es beim Übergang der einzelnen Prismenkörper zu Lage- und Höhensprüngen kommt, so dass in der Folge die vorgegebenen Genauigkeiten des Gleisvermessungssystems nicht eingehalten werden können [Wagner 2011].

Die Optimierung der Messgeschwindigkeit wird vorwiegend durch den Einsatz der Lasertriangulationssensoren erreicht, wodurch das Heben/Senken und Klemmen des Vorgängersystems entfällt. Zudem erfordert die berührungslose Erfassung der Schienenoberfläche keine zusätzliche Mechanik, so dass das Gleisvermessungssystem nahezu verschleißfrei arbeitet, der Energiebedarf gesenkt und das Gewicht entscheidend reduziert wird. Die Verwendung spezieller 48V-Batterien, welche ursprünglich für Fahrräder mit Elektroantrieb (Pedelects) entwickelt wurden, verringert zusätzlich das Gesamtgewicht unter gleichzeitiger Erhöhung der Einsatzdauer.

3.4.2 Multisensorplattform

Die Abbildungen 3.3 und 3.4 zeigen die Sensoranordnung innerhalb des Messwagens des RACER II. Auf eine Darstellung des Antriebswagens wird verzichtet, da dieser lediglich die Motorensteuerung mit eigener Stromversorgung umfasst. Die Verbindung zwischen Mess- und Antriebswagen erfolgt über zwei Kupplungsstäbe, die in Nähe der Passbohrungen (PB) (11) und (12) montiert sind. Die Motorsteuerung des Antriebswagens erfolgt über eine separate USB-Schnittstelle von der zentralen Recheneinheit (7) des Messwagens aus.

Die Rahmenkonstruktion (1) besteht aus zwei Längsträgern (1440 x 40 x 80 mm), die über zwei Querträger (40 x 40 x 710 mm) fest miteinander verschraubt sind. Der äußere Rahmen definiert auch die Dreipunktauflage der MSP über drei Laufräder (2). In einem der Längsträger ist der Temperatursensor (6) zur Erfassung der Materialtemperatur mit einer speziellen Leitpaste integriert. Weiter innen befinden sich zwei Querträger (50 x 50 x 710 mm), auf denen jeweils zwei Lasertriangulationssensoren (3) montiert sind. Die Querträger enthalten zudem den Temperatursensor zur Erfassung der Außentemperatur (6) und die Remote-Verbindung (8) zum externen Laptop. Die Bodenplatte des RACER II dient der Aufnahme der Meteorologiesensorik (6), der zentralen Recheneinheit (7) und der Stromversorgung (9). Ein weiterer Querträger (790 x 180 x 45 mm) wird für die Montage des Tachymeters (4) und des Inklinometers (5) benötigt.

Die Abbildungen 3.3 und 3.4 zeigen zudem die Orientierungen der unterschiedlichen Koordinatensysteme innerhalb des MSS. Die Basis bildet dabei das Messwagen-Koordinatensystem (MWS, grün), das über die PB (12) – (11) – (13) definiert ist. Bei den PB handelt es sich um kugelradiale Einfräsungen innerhalb der beiden Längsträger der Rahmenkonstruktion, wodurch sie als Nester für die Aufnahme von Corner-Cube-Reflektoren (CCR) nutzbar sind. Das ermöglicht eine Punktdefinition ohne die Notwendigkeit spezieller Adaptervorrichtungen. Das MWS definiert sich über die Reflexionszentren eines in die PB eingesetzten 1,5“ CCR und ist damit stabil rekonstruierbar.

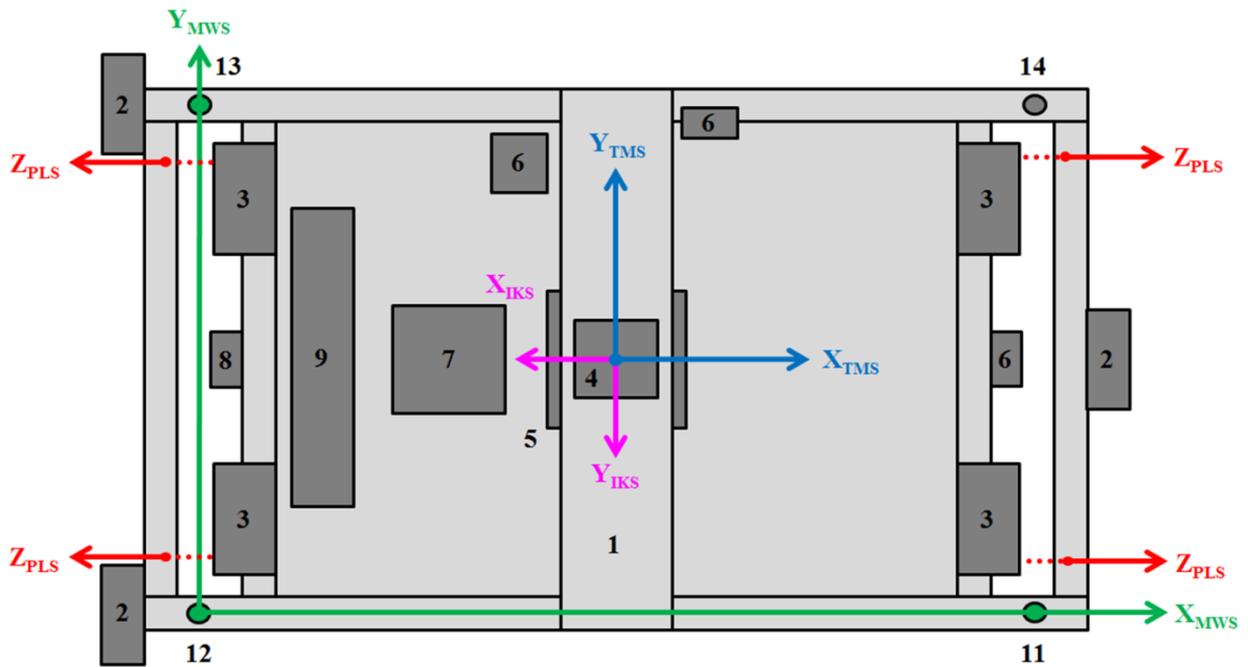


Abb. 3.3: Messwagen (Draufsicht)

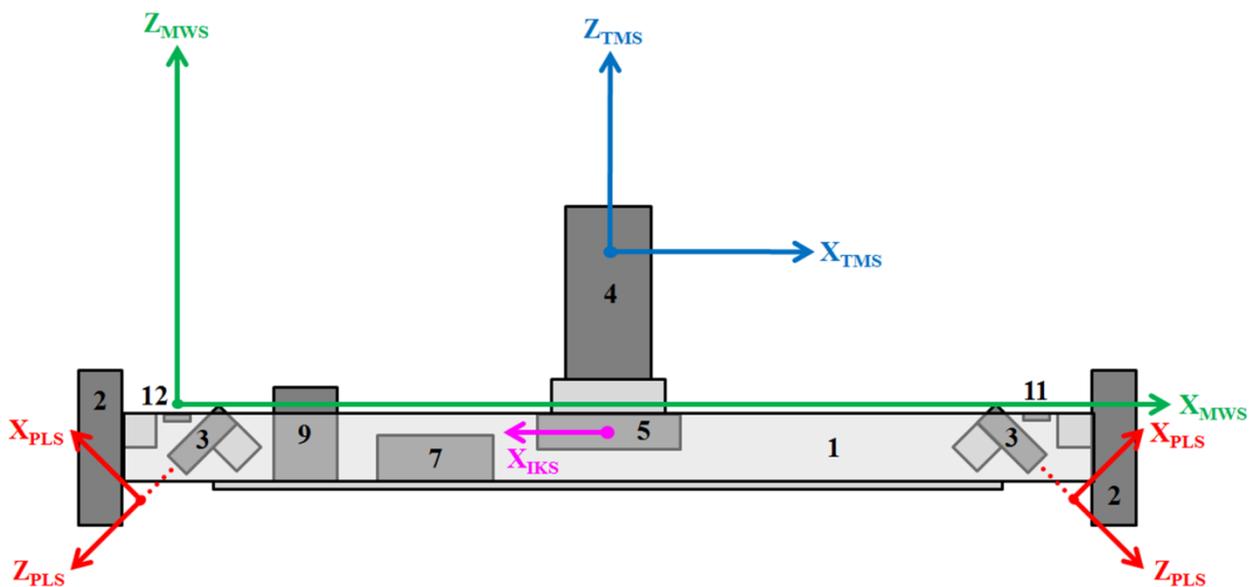


Abb. 3.4: Messwagen (Seitenansicht)

Legende:

(1)	Rahmenkonstruktion	(6)	Außentemperatur
(2)	Laufräder	(7)	zentrale Recheneinheit
(3)	Lasertriangulationssensoren	(8)	Remote-Verbindung
(4)	Tachymeter	(9)	Stromversorgung
(5)	Inklinometer	(11) bis (14)	Passbohrungen (PB)

Das Tachymeter hat als unabhängiges MSS ein eigenes Tachymeter-Koordinatensystem (TMS, blau), dessen Ursprung durch den Schnittpunkt von Steh-, Ziel- und Kippachse definiert wird. Da das Tachymeter von der Dreifußauflage der MSP getrennt werden kann, muss bei jedem Wiedereinsetzen die relative Orientierung des Tachymeters gegenüber dem MWS wiederhergestellt werden (Kapitel 6.1).

Unterhalb des Tachymeters befindet sich das Zweiachs-Inklinometer, dessen X-Achse für die Bestimmung der Überhöhung und dessen Y-Achse zur Bestimmung der Gradienten parallel zu den korrespondierenden Achsen des MWS ausgerichtet ist. Beide Achsen bilden das Inklinometer-Koordinatensystem (IKS, magenta).

Die Koordinatensysteme der vier Lasertriangulationssensoren (PLS) sind in Rot dargestellt. Sie befinden sich an den inneren Querträgern der Rahmenkonstruktion, wobei die Z-Achsen der PLS mit einem Auftreffwinkel von etwa 45° zur Schnittkante der Schienenoberkante mit der Schieneninnenkante orientiert sind. Diese Anordnung gewährleistet die optimale Erfassung der für die Bestimmung der Zielgrößen relevanten Abschnitte der Schienenoberflächen.

3.4.3 Eingesetzte Sensorik

Das Gleisvermessungssystem RACER II basiert auf dem Einsatz monofunktionaler Sensorik. Die vier Lasertriangulationssensoren stellen die Aufnahmesensoren dar, das Tachymeter das referenzierende Sensormodul. Inklinometer und Meteorologiesensorik bilden die sekundären Sensoren entsprechend Kapitel 3.3.1 und ergänzen das MSS hinsichtlich Korrekturen oder Kontrollen der Messwerte.

3.4.3.1 Positionierungssensor

Tachymeter

Um die Verlegetoleranzen beim Einbau der FF im GBT überprüfen zu können (Kapitel 3.4.1), müssen die referenzierenden Sensormodule des RACER II eine entsprechende Genauigkeit bei der 6-DoF-Bestimmung des MSS im übergeordneten GVP gewährleisten. Beim RACER II wird ein Präzisionstachymeter eingesetzt, das mit der MSP verbunden ist. Bei ausgeschaltetem Kompensator kann das Tachymeter die absolute Orientierung der MSP im GVS bestimmen, da seine relative Orientierung im MWS durch eine Kalibrierung bekannt ist (Kapitel 6.1).

Die Software des RACER II ist ausgerichtet auf Tachymeter der Firma Leica Geosystems. Im GBT wurde ein Leica TM30 eingesetzt [Leica 2009], (Abbildung 3.2). Grundsätzlich können auch Tachymeter anderer Hersteller eingesetzt werden, sofern sie folgende Bedingungen erfüllen:

- Montage auf einem Dreifuß mit Klauenaufnahme (ggf. mit Adapter)
- offene Schnittstelle für die Steuerung des Tachymeters

Ein großer Vorteil bei der Verwendung von Tachymetern der Firma Leica Geosystems ist die offene Schnittstelle GeoCOM (Software), welche die vollständige Kontrolle des Tachymeters, z.B. über eine RS-232-Schnittstelle (Hardware) ermöglicht. Der Zugriff auf sämtliche Befehle des Tachymeters kann eingeschränkt sein, weshalb vorab geprüft werden muss, ob die sogenann-

te Robotik-Lizenz für das verwendete Tachymeter freigeschaltet ist. Andernfalls ist beispielsweise die Ausrichtung des Fernrohrs auf eine vorberechnete Position über GeoCOM nicht möglich.

iGPS

Parallel zur Entwicklung des RACER II wurden die Möglichkeiten zur Verwendung des Indoor-Positionierungssystems iGPS der Firma Nikon Metrology Group untersucht, deren Umsetzung jedoch nicht weiter verfolgt wurde und zukünftigen Entwicklungen vorbehalten bleibt. Beim iGPS werden im Arbeitsbereich mindestens zwei Transmitter aufgestellt, die mit einem rotierenden Laserfächer die Umgebung erfassen (Abbildung 3.5). Dabei kann der Arbeitsbereich um beliebig viele Transmitter erweitert werden, um beispielsweise abgeschattete Bereiche zu kompensieren. Integrated Detector Units (IDU) dienen als Empfangseinheiten und können Bestandteil eines Messwerkzeugs sein oder beispielsweise direkt an Messobjekten montiert werden. Je nach Konfiguration von Transmittern und IDUs ist mit dem iGPS neben der reinen Positionsbestimmung auch die 6-DoF-Bestimmung der IDUs mit einer Messunsicherheit hinsichtlich der 3D-Punktbestimmung von $< 0,2 \text{ mm} + 10 \text{ ppm}$ möglich [Nikon 2010]. Mit dem Verfahren können sowohl statische als auch kinematische 6-DoF-Bestimmungen durchgeführt werden.

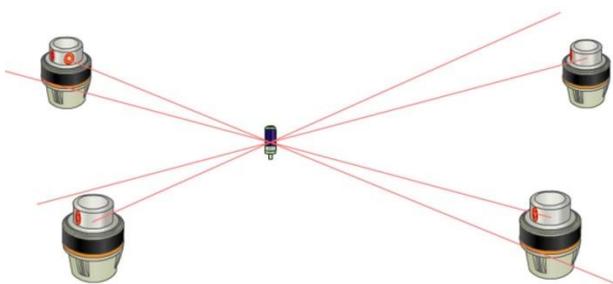


Abb. 3.5: iGPS mit vier Transmittern,
[Nikon 2011]



Abb. 3.6: „inverses iGPS“ mit vier IDUs,
[Nikon 2011]

[Wagner 2012] verfolgt hingegen mit dem „inversen iGPS“ den Ansatz, die 6-DoF-Parameter eines Transmitter mittels räumlichen Rückwärtsschnitts über mehrere IDUs zu ermitteln (Abbildung 3.6). Diese Verfahrensweise hat für mobile Plattformen wie den RACER II folgende Vorteile:

- Kostenersparnis, da IDUs deutlich günstiger sind als Transmitter
- Transmitter ersetzt Tachymeter (etwa gleiche Größe, Gewicht und Energiebedarf)
- IDUs ersetzen Präzisionsprismen (etwa gleiche Größe, Adaption auf GVP möglich, keine Ausrichtung der IDUs auf den RACER II erforderlich)

Er kommt zu dem Schluss, dass die Methode des inversen iGPS für den RACER II möglich ist, sofern das Gleisvermessungssystem weiterhin im SGM betrieben wird. Bei kinematischen Vermessungen konnten die angestrebten Genauigkeiten des RACER II nicht erreicht werden. Zudem war es zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht möglich, die einzelnen IDUs kabellos untereinander zu verbinden, wodurch das Verfahren für die praktische Anwendung im GBT un-

tauglich wird. Mittlerweile bietet der Hersteller aber IDUs mit kabelloser Datenübertragung an. Vor diesem Hintergrund sollten weitere Untersuchungen in Erwägung gezogen werden. Ferner wäre die Möglichkeit kinematischer Vermessungen unter Verwendung eines zweiten Transmitters auf dem Gleismesswagen zu untersuchen.

3.4.3.2 Lasertriangulationssensoren

Die verwendeten Lasertriangulationssensoren der Firma MEL [MEL 2010] vom Typ M2-ILAN 120/60 (Abbildung 3.7) lassen sich bei einem Gewicht von 540 g und einer Größe von 186 x 84 x 36 mm platzsparend in die MSP des RACER II integrieren. Hinzu kommen der geringe Energiebedarf von 3 W sowie die flexible Versorgung mit 8 bis 30 V. Die Laserdiode emittiert sichtbares Rotlicht mit einer Wellenlänge von 658 nm und ist der Laserschutzklasse 2M zugeordnet, so dass keine weiteren Schutzmaßnahmen im laufenden Betrieb beachtet werden müssen.



Abb. 3.7: Lasertriangulationssensor MEL M2-ILAN 120/60 innerhalb der MSP des RACER II

Als Nahbereichsscanner hat der M2-ILAN 120/60 einen Messbereich von 120 mm in Z-Richtung (vgl. Abbildung 5.1) und eine maximale Reichweite von 79 + 120 mm. Mit einer Abtastrate von 100 Hz können bis zu 27.000 Messpunkte pro Sekunde als Profillinie entlang der Oberflächenstruktur des Messobjekts erfasst werden. Der Datentransfer erfolgt über eine Ethernet-Schnittstelle, wobei die Daten der Lasertriangulationssensoren über einen Switch an die zentrale Recheneinheit des RACER II übertragen werden. Weitere Details siehe [MEL 2010].

Im Vorfeld durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass der M2-ILAN 120/60 unter Laborbedingungen auch glänzende Oberflächenstrukturen zuverlässig erfassen kann. Probleme bei der Messdatenerfassung treten allerdings auf, wenn die Fremdlichteinstrahlung 5.000 Lux überschreitet [MEL 2010]. Feldversuche bei direkter Sonneneinstrahlung zeigen in den betroffenen Bereichen Fehlmessungen. Der Einfluss kann jedoch mit Schutzblenden eliminiert werden (Kapitel 9.2).

3.4.3.3 Inklinometer



Abb. 3.8: Inklinometer der Firma MEAS, Typ NS-15/DMG2-U [MEAS 2010]

Zusätzlich wird beim Gleisvermessungssystem RACER II ein zweiachsiger Neigungssensor der Firma Measurement Specialties (MEAS) vom Typ NS-15/DMG2-U eingesetzt (Abbildung 3.8). Bei einem Gewicht von 290 g kann der 84 x 70 x 46 mm große Sensor platzsparend unterhalb des Tachymeter-Querträgers befestigt werden. Der Messbereich beträgt $\pm 15^\circ$ bei einer Auflösung $0,001^\circ$ und einer Einspielzeit von 3,5 Sekunden. Die Messdaten können über eine RS-232 Schnittstelle abgerufen werden. Weitere Details sind unter [MEAS 2010] einsehbar.

3.4.3.4 Meteorologiesensorik

Verschiedene Korrekturfunktionen des RACER II benötigen die atmosphärischen Parameter Temperatur und Luftdruck (Abbildung 3.9). Daher verfügt das Gleisvermessungssystem über zwei Temperatursensoren (Material- und Lufttemperatur) und einem Drucksensor zur Erfassung des Luftdrucks. Luftdruck und -temperatur gehen in die Korrektur der EDM-Strecke des Tachymeters ein (1. Geschwindigkeitskorrektur, Kapitel 8.3). Die Lufttemperatur wird ferner für die Korrektur des Inklinometers genutzt (Kapitel 4.3.3). Für die Bestimmung des Rahmenausdehnungskoeffizienten muss die Materialtemperatur der MSP erfasst werden (Kapitel 6.3).

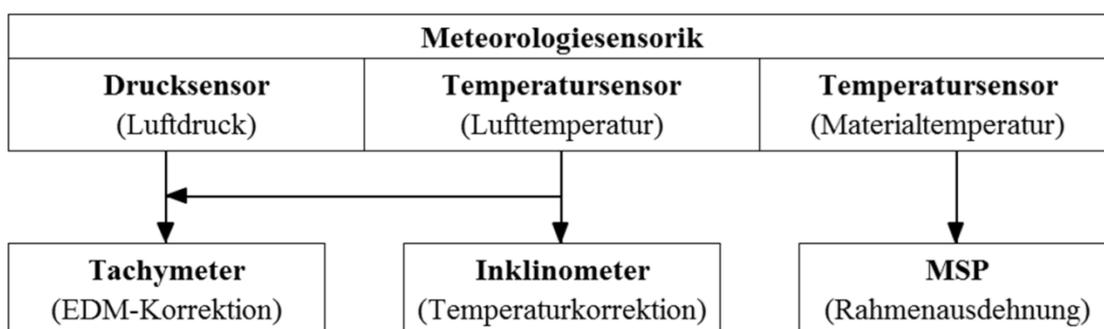


Abb. 3.9: Einfluss der Meteorologiesensorik auf die Sensormodule des RACER II

Zur Erfassung der Temperatur sind beim RACER II zwei Temperatursensoren der Firma Farnell vom Typ TSic 506 verbaut. Der Hersteller gibt für die Sensoren eine Genauigkeit von $< \pm 0,3^\circ\text{C}$ bei einer Auflösung von $0,034^\circ\text{C}$ und einem Temperaturbereich von -10°C bis $+60^\circ\text{C}$ an. Weitere Details siehe [ZMD 2006].

Zur Erfassung des Luftdrucks wird der Sensor DRMOD-I²C vom Typ PA1B1 der Firma Hygrosens Instruments eingesetzt. Das piezoresistive Drucksensormodul misst den absoluten Luftdruck gegenüber dem Vakuum innerhalb eines Messbereichs von 100 bis 1100 mbar bei einer Genauigkeit von $< \pm 0,3\%$ (Restfehler Linearität / Hysterese). Ein integrierter Temperatursensor korrigiert die Messwerte für einen Temperaturbereich von -40 bis $+100$ °C. Weitere Details sind unter [Hygrosens Instruments 2009] einsehbar.

4 **Komponentenkalibrierung**

4.1 **Grundsätzliches**

In der Photogrammetrie wird der Begriff Orientierung wie folgt differenziert:

- innere Orientierung \Leftrightarrow äußere Orientierung
- relative Orientierung \Leftrightarrow absolute Orientierung

Als innere Orientierung wird die Position des Projektionszentrums bezogen auf die Bildebene verstanden und, wenn auf Verzeichnungskorrekturen verzichtet wird, durch die Parameter der Koordinaten des Bildhauptpunkts und der Kammerkonstante definiert. Die äußere Orientierung beschreibt dagegen Position und Orientierung einer einzelnen Aufnahme (6-DoF-Parameter) bezogen auf das Koordinatensystem, in dem das Messobjekt bestimmt werden soll. Bei der relativen Orientierung wird die Position und Ausrichtung mehrerer Bilder zueinander durch 6-DoF-Parameter hergestellt. Die Transformation der relativ orientierten Bilder in ein übergeordnetes Koordinatensystem stellt die absolute Orientierung des Bildverbands dar. Diese Begriffe können auf MSS übertragen werden.

Im Folgenden wird zwischen der Komponenten- (Kapitel 4) und der Systemkalibrierung (Kapitel 5) unterschieden. Bei der Komponentenkalibrierung werden Sensoren und Sensormodule für sich allein betrachtet untersucht. Die Systemkalibrierung umfasst dagegen die Untersuchungen der Sensoren und Sensormodule hinsichtlich der relativen Position und Ausrichtung innerhalb des MSS. Nach Anwendung der Ergebnisse einer Kalibrierung liegen die Messdaten der Sensoren und Sensormodule im gemeinsamen Koordinatensystem des MSS vor, was in der Analogie dem Bildverband in der Photogrammetrie entspricht. Die Transformation der Messdaten in das übergeordnete Bezugssystem wird demnach als absolute Orientierung (Georeferenzierung) verstanden.

Die individuelle Prüfung und Kalibrierung der Sensormodule eines MSS sowie ihre Anordnungen zueinander sind elementare Voraussetzungen zur Gewährleistung einer hohen, gleichbleibenden Qualität der Messergebnisse. Der gesamte Vorgang lässt sich in folgende Aspekte gliedern:

- Überprüfung
- Kalibrierung
 - Komponentenkalibrierung
 - Systemkalibrierung
- Justierung

Überprüfung

Bei der Überprüfung eines Sensors handelt es sich um ein Feld- oder Laborverfahren, bei dem Messabweichungen des zu untersuchenden Sensors oder Messsystems zu bestimmen sind. Dabei sollte die vorgegebene Messkonfiguration möglichst einfach und umgebungsneutral sein. So lassen sich beispielsweise die Achsfehler eines Tachymeters im Feldverfahren durch Messung von Zielen in zwei Fernrohrlagen überprüfen. Die Überprüfung eines Lasertrackers ist dagegen nur als Laborverfahren durchführbar (Kapitel 4.2). Die ermittelten Messabweichungen bilden eine Entscheidungsgrundlage für die Kalibrierung. Eine Kalibrierung sollte vorgenommen werden, sofern die Messabweichungen die Herstellerspezifikationen beziehungsweise die Anforderungen an die Messaufgabe überschreiten [Hesse 2008].

Kalibrierung

Die Kalibrierung ist im Regelfall ein Laborverfahren. Oftmals kommen spezielle Instrumente und Hilfsmittel zum Einsatz, um den Bezug zu Sollgrößen herzustellen. Das Ziel der Kalibrierung ist die Ermittlung einer Korrekturfunktion, bei der ein funktionaler Zusammenhang zwischen einer oder mehreren physikalischen Einflussgrößen und der beobachteten Messabweichung hergestellt wird. Sofern die Modellierung der Korrekturfunktion aufgrund fehlender Kenntnisse über Einflussgrößen oder das Systemverhalten nicht möglich oder mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden ist, können die Messabweichungen alternativ durch ein Look-Up-Table (LUT) dargestellt werden, wobei jedem Messwert eine oder mehrere Korrekturwerte zugewiesen werden [Staiger 2001], [Hesse 2008].

Durch eine Kalibrierung sollen die systematischen Anteile der Messabweichungen eines Sensors oder Sensormoduls eliminiert werden. Zu beachten sind nicht modellierbare Störgrößen wie beispielsweise montage- oder transportbedingte Materialspannungen. Problematisch ist die zeitliche Variation dieser Störgrößen, wodurch sich deren Auswirkung auf die einzelnen Komponenten sprunghaft oder zeitverzögert entwickeln kann. Störgrößen können insbesondere durch fehlerreduzierende Maßnahmen und besondere Sorgfalt im Umgang reduziert werden [Staiger 2001].

Im Gegensatz zur Überprüfung sollten Kalibrierungen grundsätzlich unter kontrollierten äußeren Bedingungen durchgeführt werden. Auf diese Weise lassen sich die physikalischen Einflussgrößen genauer bestimmen. Gleichzeitig wird der Einfluss der nicht modellierbaren Störgrößen auf die Ergebnisgröße minimiert. Kontrollierte äußere Bedingungen stellen beispielsweise klimatisierte Laborräume (gleichbleibende Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Beleuchtung) oder begehbare Klimakammern dar. Allerdings können sensorinterne Wechselwirkungen die Bestimmung der physikalischen Einflussgrößen erschweren [Staiger 2005]. Ferner ist zu beachten, dass eine Kalibrierung in zeitlicher Abhängigkeit von den jeweiligen Laborbedingungen zu sehen ist [Staiger 2001].

Der Umfang einer Kalibrierung hängt insbesondere von der Zugänglichkeit der einzelnen Komponenten ab, wobei in diesem Zusammenhang die einzelnen Sensoren eines MSS als Komponenten verstanden werden. Bei der Komponentenkalibrierung werden die Sensoren hinsichtlich ihrer

relevanten Einflussgrößen isoliert betrachtet. In Abbildung 4.1 besteht ein MSS beispielhaft aus drei Komponenten A, B und C, für die separate Korrekturfunktionen als funktionale Zusammenhänge oder LUT bestimmt werden. Die Komponentenkalibrierung gewährleistet eine Genauigkeitssteigerung, weil die beeinflussten Größen im Gegensatz zur Systemkalibrierung einfacher separiert und modelliert werden können [Staiger 2001].

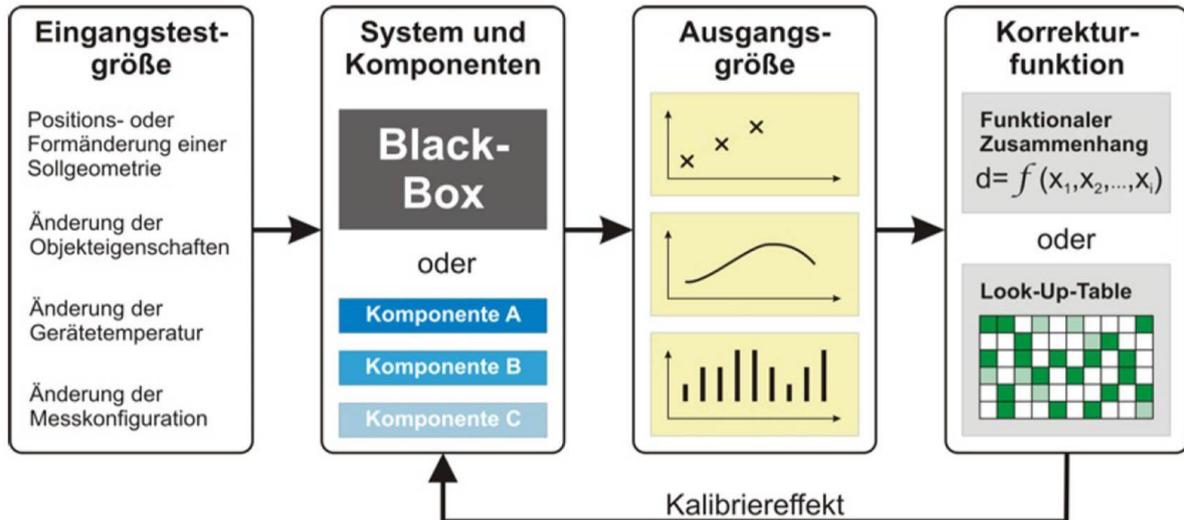


Abb. 4.1: Prinzipskizze eines Kalibrierprozesses [Hesse 2008]

In geodätischen Messsystemen, welche zumeist MSS darstellen, wird jedoch die Zugänglichkeit der einzelnen Komponenten aufgrund sensorinterner Wechselwirkungen zunehmend erschwert. Hinzu kommen die Maßnahmen der Hersteller zur Wahrung des geistigen Eigentums und die Komplexität der MSS hinsichtlich der Vielzahl an Sensoren und der integrierten System- und Applikationssoftware. Die fehlenden Kenntnisse über das genaue Zusammenwirken der einzelnen Komponenten („Black-Box“) können auch aus wirtschaftlichen Überlegungen eine Systemkalibrierung sinnvoll erscheinen lassen [Staiger 2001].

Bei der Systemkalibrierung wird das MSS als Ganzes untersucht, wobei die Systemreaktion auf definierte Eingangsgrößen bestimmt wird. Dazu wird das MSS möglichst in einer kontrollierten Umgebung, das heißt unter Laborbedingungen oder allgemein zu erwartenden Messbedingungen untersucht, um den Einfluss von Störgrößen weitestgehend zu minimieren. Aufgrund mangelnden Wissens über das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten sind die Auswirkungen der physikalischen Einflussgrößen nicht eindeutig trennbar. Die Systemkalibrierung muss daher sorgfältig und vollständig über den gesamten Parameterbereich der Einflussgrößen hinsichtlich der zu erwartenden Messumgebung durchgeführt werden, damit die Wechselwirkungen der Sensoren mit erfasst werden. Deswegen müssen beispielsweise auch Einspielzeiten oder Aufwärmzeiten bestimmter Komponenten berücksichtigt werden [Staiger 2001].

Justierung

Die ermittelten Korrekturfunktionen oder LUT werden oftmals bereits im MSS genutzt, um die originären Messwerte vor Ausgabe an den Anwender zu korrigieren. Alternativ können die Korrekturwerte dazu genutzt werden, die Sensoren zu justieren. Dabei werden die Fehlstellungen

durch mechanische Eingriffe weitestgehend minimiert. Nach der Justierung ist in der Regel eine weitere Kalibrierung erforderlich, um die verbleibenden Abweichungen zu bestimmen.

Justierungen sind zeitintensiv und erfordern abhängig von der Komplexität der Komponenten Hilfsmittel und speziell geschultes Personal. Daher werden im Allgemeinen nur einfache, analoge Komponenten wie beispielsweise Dosen- oder Röhrenlibellen justiert. Die Justierung digitaler Messsysteme kann zumeist nur vom Hersteller durchgeführt werden.

4.2 Referenzsysteme

Bei einem Kalibrierprozess müssen die physikalischen Einflussgrößen wie beispielsweise atmosphärische Parameter (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte) möglichst repräsentativ bestimmt werden. Die Messung erfolgt mit Sensoren, die aufgrund ihrer geringen Messunsicherheit als Normale angesehen werden. Die Normale müssen ihrerseits in regelmäßigen Abständen überprüft und gegebenenfalls kalibriert werden. Dies geschieht im Rahmen einer Rückführung auf die Definitionen der einzelnen Messgrößen. Bei der Kalibrierung der Sensoren des RACER II betrifft dies beispielsweise die Temperatursensoren der begehbaren Klimakammer, welche auf das Referenzthermometer 2804A der Firma Hewlett Packard [Hewlett-Packard 1986] und das Barometer Digiquartz 760 der Firma Paroscientific [Paroscientific 1997] zurückgeführt werden.

Ferner werden bei vielen Kalibrierprozessen Messabweichungen zu Referenzobjekten bestimmt. Die Entfernung und gegebenenfalls die relative Ausrichtung des zu kalibrierenden Sensormoduls oder des MSS zum Referenzobjekt muss mit Hilfe eines Messsystems ermittelt werden, dessen Messunsicherheit kleiner als die angestrebte Genauigkeit der zu kalibrierenden Parameter ist. Für die Kalibrierung der Sensormodule des RACER II, insbesondere für die Bestimmung der 6-DoF-Kalibrierung im Rahmen der relativen Orientierung (Kapitel 6.2), wird der Lasertracker AT-901 der Firma Leica Geosystems / Hexagon Metrology eingesetzt, dessen Messeigenschaften in Kapitel 6.2.2 detaillierter beschrieben sind. An dieser Stelle werden grundlegende Ansätze zur Überprüfung und Kalibrierung des AT-901 [Leica 2013] genannt, da dieses Messsystem für die Kalibrierung des RACER II vorrangig genutzt wird. Ferner wird das Messsystem für die Validierungsmessungen des RACER II eingesetzt (Kapitel 9.3).

Die Übersicht in der Anlage 4.1 dokumentiert die Überprüfung des Lasertrackers als Gesamtsystems mit den Maßnahmen zur Kalibrierung. Die in [Hexagon Metrology 2007] dargestellten Kalibriervorgänge entsprechen im Wesentlichen den Messanordnungen der korrespondierenden Überprüfung. Die Unterschiede liegen in einer Verdichtung der Messpunkte, längeren Beobachtungszeiten und Mehrfachmessungen. Ferner werden abschließend keine Abweichungen zu den Herstellerspezifikationen, sondern konkrete Werte der zu bestimmenden Kalibrierparameter angegeben.

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen sollte die Kalibrierung des AT-901 nur unter Laborbedingungen mit äußerster Sorgfalt oder gegebenenfalls durch den Hersteller selbst durchgeführt werden. Im Softwarehandbuch „emScon“ [Hexagon Metrology 2007] werden dem Anwender sowohl Möglichkeiten zur Überprüfung („Field Check“) als auch zur Kalibrierung

(„Compensation“) vorgestellt, die im Folgenden näher beschrieben werden. Die einzelnen Vorgänge sind gestuft und hängen in ihrer Anwendung von der Sensorkonfiguration des Lasertrackers ab. Die wesentlichen Stufen sind dabei:

- Stufe 1: geometrische Basisprüfung (Scaling Check / Distance Check)
- Stufe 2: Parameter des Lasertrackers (Tracker Field Check)
 - Ball Bar Check
 - Two Face Check
 - IFM Distance Check
 - ADM Instrument Offset Check
- Stufe 3: Parameter der T-Cam und T-Probe, T-Scan, T-Mac (6-DoF Field Check)
 - Probing Check
 - LED Resection Field Check
 - T-Cam to Tracker Field Check

In Stufe 1 (Scaling Check) wird eine bekannte Basis (Scale Bar) in vordefinierten Posen zum Lasertracker orientiert und an den beiden Endpunkten gemessen. Die Messung kann sowohl mittels CCR für den Lasertracker allein als 3-DoF, als auch mit einer speziellen T-Probe Tastspitze für die Systemprüfung Lasertracker + T-Cam + T-Probe als 6-DoF durchgeführt werden. Sofern die ermittelten Abweichungen unterhalb der Herstellerspezifikation liegen, müssen keine weiteren Überprüfungen oder Kalibrierungen vorgenommen werden. Daher wird dieser Vorgang als Basisprüfung bezeichnet.

Stufe 2 (Tracker Field Check) behandelt die Vorgänge, die für die Bestimmung der 3-DoF Parameter des Lasertrackers notwendig sind. Hierbei werden im Wesentlichen vier Messanordnungen durchgeführt. Detaillierte Informationen sind beispielsweise unter [Hexagon Metrology 2007], [Meyer u. Ahrend 2010] oder [Dymel 2004] einsehbar. Die Anlage 4.2 zeigt die einzelnen Vorgänge in zeitlicher Abfolge sowie die entsprechenden Maßnahmen, die bei Überschreiten der Herstellerspezifikationen durchgeführt werden müssen.

Stufe 3 (6-DoF Field Check) beinhaltet die Vorgänge, die ergänzend zum Tracker Field Check für die Bestimmung der 6-DoF-Parameter des Gesamtsystems Lasertracker + T-Cam + T-Probe erforderlich sind, wobei die Vorgehensweise analog für alternative Sensoren wie T-Scan oder T-Mac gilt. Speziell für die 6-DoF-Bestimmung der T-Cam und der Sensoren sind im Wesentlichen drei Messanordnungen vorgesehen. Detaillierte Informationen sind unter [Hexagon Metrology 2007] einsehbar. Die Abfolge der einzelnen Vorgänge ist in Anlage 4.1 dargestellt. Ausgehend von der Basisprüfung müssen für das Gesamtsystem bei Überschreitung der Herstellerspezifikationen alle zuvor beschriebenen Stufen geprüft werden.

Insgesamt werden bei einer vollständigen Kalibrierung des Gesamtsystems entsprechend Anlage 4.1 folgende Kalibrierparameter ermittelt [Hexagon Metrology 2007]:

- Lasertracker:
 - 15 geometrische Parameter
 - Vertical Index Error j
 - Transit Axis Tilt / Offset i / e
 - Mirror Tilt / Offset c / f
 - Beam Tilt / Offset $I_X, I_Y / O_X, O_Y$
 - Cover Plate Offset O_{2X}, O_{2Y}
 - Horizontal / Vertical Encoder Eccentricity $E_X, E_Y / K_X, K_Y$
 - 3 Parameter für die Distanzmessung
(1 IFM, 2 ADM)
- T-Cam: 12 Parameter
 - Bearing Error C_b
 - Collimation Error C_c
 - Roll Angle Error C_r
 - Index error C_j
 - Transit Axis Tilt / Offset / Height C_i, C_D, C_H
 - Translation of Projection Center Curve C_X, C_Y, C_Z
- T-Probe / T-Scan / T-Mac: 30 Parameter
(3D-Koordinaten der 10 LEDs eines Sensors)

Eine weitere Methode zur Überprüfung eines Lasertrackers stellt das National Institute of Standards and Technology (NIST) mit dem Prüfstandard ASME B89.4.19-2006 [NIST 2006] vor. Der NIST-Standard stellt ein unabhängiges Prüfverfahren zur Verfügung, mit dem sowohl der Lasertracker als Gesamtsystem, als auch die Distanzmessbauteile separat überprüft werden können. Dazu werden drei Messkonfigurationen benötigt:

- Längenmesstest:
Messung einer Scale Bar (Endpunkte der Scale Bar) in vier Positionen
=> Messung in den vier Positionen horizontal, vertikal, rechts- und linksdiagonal
- Zwei-Lagen Test:
vertikale Anordnung von drei Reflektoren (A, B, C) in einer Flucht (vertikale Achse)
=> Messung aller Reflektoren in zwei Lagen und in drei Entfernungen

- Entfernungsmesstest:
Horizontale Anordnung von sechs Reflektoren in einer Flucht
(horizontale Achse, vier vorgegebene Distanzen, zwei zufällige Distanzen)
=> Messung aller Reflektoren in zwei Lagen

Als Ergebnis der Überprüfung erhält der Anwender Streckendifferenzen, die er mit den NIST-Vorgaben vergleichen kann, wobei die Überprüfung als bestanden gilt, sofern alle ermittelten Streckendifferenzen unterhalb der NIST-Vorgaben liegen. Für Details wird auf [NIST 2006] und [Meyer u. Ahrend 2010] verwiesen.

4.3 **Sensormodule des RACER II**

4.3.1 **Tachymeter**

Beim Gleisvermessungssystem RACER II stellt das Tachymeter den referenzierende Sensor (Kapitel 3.3.2) dar, welcher durch das Inklinometer (Kapitel 3.4.3.3) als redundanten Sensor hinsichtlich der Bestimmung der Zielgrößen Überhöhung und Gradienten gestützt wird. Als eigenständiges MSS muss das Tachymeter separat kalibriert werden, bevor es in das MSS RACER II integriert werden kann. Nach [Kahmen 1997] und [Deumlich u. Staiger 2002] müssen dabei folgende instrumentelle Fehlerquellen untersucht und gegebenenfalls kalibriert werden, wobei sich die folgende Auswahl auf die für den RACER II relevanten Vorgänge beschränkt.

- Mechanische Komponenten
 - o Achsfehler
 - Zielachsfehler / Kollimationsfehler
 - Kippachsfehler
 - Stehachsfehler
(Aufstellfehler => Kompensatorkalibrierung)
 - o Exzentrizitäten
 - Kreisteilungsexzentrizitäten
 - Exzentrizität der Zielachse
 - o Kreisteilungsfehler
 - o Höhenindexfehler
- Elektrooptischer Distanzmesser (EDM)
 - o Nullpunktkorrektur
 - o Maßstabskorrektur / Frequenzkorrektur
 - o zyklischer Phasenfehler

- Phaseninhomogenitäten
 - automatische Zielerfassung
(Koordinaten des Bildhauptpunkts in Relation zur Fadenkreuzebene)

Bei den mechanischen Komponenten werden Exzentrizitäten und Kreisteilungsfehler in der Regel durch den Hersteller bestimmt und unmittelbar im Instrument korrigiert. Die Achsfehler sowie der Höhenindexfehler müssen jedoch im Hinblick auf den RACER II regelmäßig geprüft werden, da es sich um bewegliche Bauteile handelt, die bei jeder Profilmessung des Gleisvermessungssystems vier GPV anfahren und messen. Zudem befindet sich das Tachymeter auf einer mobilen MSP, welche in der Bewegung, bei der temporären Gleisentnahme oder beim Transport Stößen ausgesetzt sein kann.

Die Kalibrierung des EDM erfolgt vorab durch den Hersteller oder unter Laborbedingungen in einer Prüfstelle (Frequenzkorrektur, Phaseninhomogenitäten und zyklischer Phasenfehler) sowie unter den atmosphärischen Bedingungen einer EDM-Pfeilerstrecke (Nullpunktkorrektur und Maßstab). Die Überprüfung des EDM sollte in regelmäßigen Abständen erfolgen und wird im Allgemeinen durch ein Zertifikat nachgewiesen. Da die Bauteile des EDM fest mit dem Gehäuse des Fernrohrs verbunden sind, ist trotz der Bewegungen des Tachymeters und der Gefahr durch Stöße der MSP nicht davon auszugehen, dass die entsprechenden Einflüsse erkennbare Auswirkungen auf die Kalibrierparameter der EDM haben.

Bei der automatischen Zielerfassung wird zumeist ein zusätzlicher Laserstrahl ausgesendet, der vom Prisma reflektiert und von einer im Fernrohr integrierten CCD-Kamera (charge-coupled device) als Bildaufnehmer für die digitale Zielpunkterkennung detektiert wird. Durch die Bildverarbeitungssoftware wird der Zielpunkt als Mittelpunkt einer Ellipse bestimmt und horizontale sowie vertikale Ablagen des Zielpunkts zum Zielstrahl des Tachymeters abgeleitet. Die relative Position und Orientierung der CCD-Kamera zum Zielstrahl des Tachymeters wird im Rahmen der Kalibrierung bestimmt. Für weitere Details wird beispielsweise auf [Deumlich u. Stai-ger 2002] verwiesen.

Das Tachymeter für den RACER II wird unmittelbar vor den Messeinsätzen gewöhnlich neu adaptiert. Die zuvor genannten instrumentellen Fehlerquellen wurden entsprechend geprüft und gegebenenfalls kalibriert. Ungeachtet dessen verbleiben folgende Fehlerquellen, die während der laufenden Messkampagnen, jedoch vor Beginn der Gleisvermessung überprüft werden:

- Zielachs- und Kippachsfehler
- Höhenindexfehler
- Ablagen des Bildhauptpunktes bei der automatischen Zielerfassung

Eine Kompensation der Achsfehler und des Höhenindexfehlers durch die Messung in zwei Fernrohr-lagen bei jeder Stationierung wird aus Zeitgründen ausgeschlossen. Wie die Erfahrung gezeigt hat, sollte die Bestimmung der Achsfehler und des Höhenindexfehlers sowie der automati-

schen Zielerfassung ca. alle sechs Stunden wiederholt werden. Sämtliche Fehlerquellen bis auf den Kippachsfehler lassen sich in einem gemeinsamen Kalibriervorgang bestimmen, wobei ein Prisma in etwa 100 m Entfernung in horizontaler Visur in zwei Fernrohrlagen gemessen wird. Das Tachymeter wird hierbei von der MSP getrennt und der Kalibriervorgang separat auf einem Stativ durchgeführt. Für die Bestimmung des Kippachsfehlers ist ein entsprechendes Hochziel erforderlich.

Die bisherigen Erfahrungen in den Messeinsätzen haben gezeigt, dass vor allem die Kalibrierung des Höhenindexfehlers anfällig für mechanische Einwirkungen und demnach instabil ist. Denkbar ist ferner eine Korrelation mit den entsprechenden Kalibrierparametern der automatischen Zielerfassung, was aber bislang nicht nachgewiesen werden konnte. Um dem Fehlereinfluss effektiv entgegenzuwirken, müssen die Zielgrößen des RACER II während der Messung sorgfältig bewertet werden. So kann der Messvorgang bei Auffälligkeiten unterbrochen und eine sofortige Rekalibrierung des Tachymeters vorgenommen werden. Sämtliche ermittelten Parameter werden im Tachymeter gespeichert und unmittelbar zur Korrektur der Messwerte verwendet. Daher sind die entsprechenden Kalibrierparameter auch kein Bestandteil der Kalibrierparameterdatei (Anlage 8.2).

4.3.2 Lasertriangulationssensoren

Bei den verwendeten Lasertriangulationssensoren MEL M2-ILAN 120/60 (Kapitel 3.4.3.2) müssen im Hinblick auf den RACER II insbesondere folgende instrumentelle Fehlerquellen untersucht und gegebenenfalls kalibriert werden:

- Achsfehler und Exzentrizitäten
- Distanzmessung
 - Auftreffwinkel
 - Materialeigenschaften
 - Mehrwegeeffekte
 - Temperatureinflüsse
 - Umgebungstemperatur
 - Geräteinnentemperatur

Unter dem Begriff Achsfehler werden in diesem Zusammenhang die Abweichungen der einzelnen Koordinatenachsen von den Definitionen des Herstellers verstanden. Die Abweichungen sind zusammen mit den Exzentrizitäten bereits in den 6-DoF Parametern enthalten, deren Bestimmung in Kapitel 6.2 beschrieben wird und müssen daher nicht weiter untersucht werden.

Das Ergebnis einer Profillinienmessung stellen Punktkoordinaten innerhalb einer Ebene dar, deren Z-Komponente durch die Entfernungsmessung und deren X-Komponente durch die Ausmes-

sung eine CCD-Kamera bestimmt wird. Für die Entwicklung des RACER II wurde lediglich die Z-Komponente überprüft, wobei die unterschiedlichen Einflüsse auf die Distanzmessung untersucht werden müssen.

Für die Genauigkeit der Distanzmessung ist die Intensität des zurückgesendeten Messstrahls (Remission) entscheidend. Nach [Schulz u. Ingensand 2004] nimmt „(...) die Intensität bzw. Beleuchtungsstärke E umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung s ab (...)“. Dabei wird die Intensität der Remission insbesondere von der Entfernung zur Messoberfläche (Strahldivergenz), dem Auftreffwinkel und den Materialeigenschaften beeinflusst.

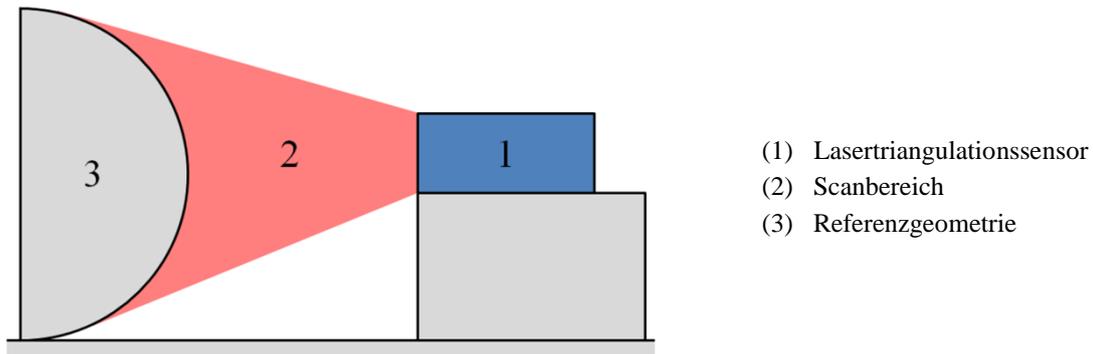


Abb. 4.2: Messaufbau zur Untersuchung des Auftreffwinkels (Seitenansicht)

Die Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft einen Messaufbau zur Überprüfung des Auftreffwinkels für die verwendeten Lasertriangulationssensoren. Entlang der gewölbten Oberfläche kann ein breites Spektrum unterschiedlicher Auftreffwinkel realisiert werden. Ausgehend vom senkrecht einfallenden Messstrahl im mittleren Bereich wird der Auftreffwinkel zu den Rändern der gewölbten Oberfläche hin zunehmend flacher. Allerdings nimmt mit dem flacher werdenden Auftreffwinkel auch die Entfernung zu, wodurch die Auftreffwinkel mit der Entfernung korreliert sind. Zur Trennung der beiden Kriterien kann beispielsweise der in Abbildung 4.3 dargestellte Messaufbau verwendet werden, bei dem Auftreffwinkel und Abstand zum Lasertriangulationssensor unabhängig voneinander eingestellt werden können.

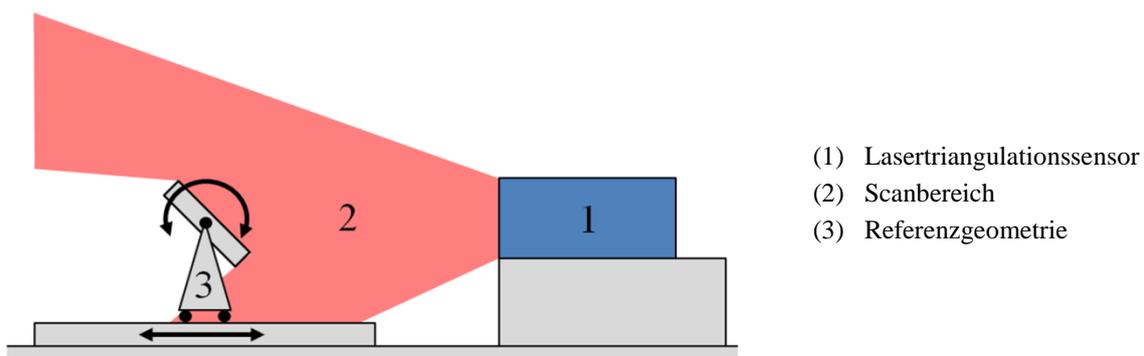


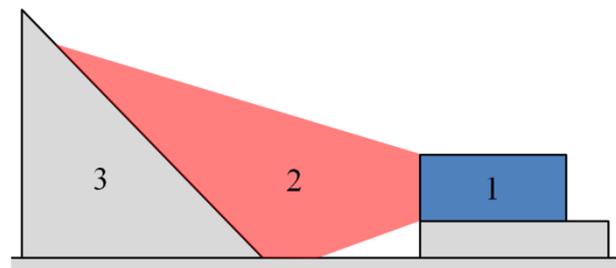
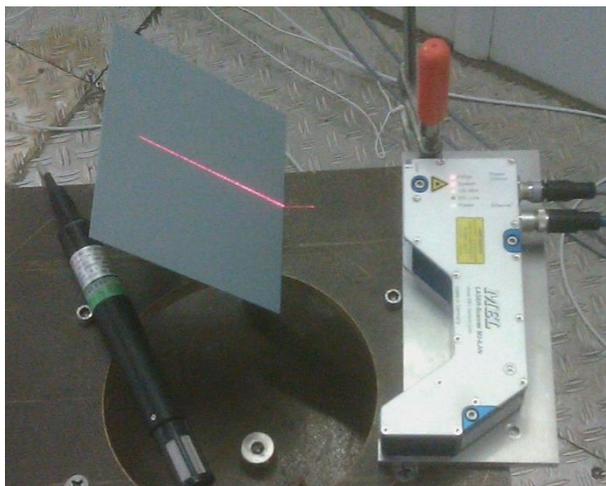
Abb. 4.3: alternativer Messaufbau zur Untersuchung des Auftreffwinkels (Seitenansicht)

Ebenfalls entscheidend für die Güte der Distanzmessung ist die Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes. Die Oberflächenfarbe beeinflusst den Absorptionsanteil und damit die Intensität der Remission. Zudem kann der Messstrahl bei bestimmten Materialien wie beispielsweise Sty-

ropor eindringen und die Entfernungsmessung beeinflussen. Glatte Oberflächenstrukturen können zu anteiligen oder Totalreflexionen führen, wodurch die Remission teilweise oder vollständig reduziert wird. Weitere Informationen sind beispielweise unter [Rietdorf 2005] einsehbar.

Unter Mehrwegeeffekten werden in diesem Zusammenhang Anteile fehlerhafter Entfernungsmessungen verstanden, die entstehen, wenn der Messstrahl zwei örtlich voneinander getrennte Bereiche innerhalb des gemeinsamen Laserspots erfasst. Die unterschiedlichen Entfernungsinformationen werden im Remissionssignal vermischt. In Folge dessen entsteht ein virtueller Messpunkt. Dieser grundsätzliche Einfluss beim Scannen kann jedoch aufgrund der geringen Strahldivergenz des Lasertriangulationssensors und der stetigen Oberflächenform der Schiene nachfolgend beim RACER II vernachlässigt werden.

Obwohl der M2-ILAN 120/60 laut Herstellerangaben über eine geräteinterne Temperaturkorrektur verfügt, wurden zur Überprüfung der Angaben die Temperatureinflüsse untersucht. Da die Umgebungstemperaturen im Bereich des GBT von -10 °C (Portale im Winter) bis 35 °C (Tunnelmitte) betragen können, ist eine entsprechende Untersuchung in der begehbaren Klimakammer des Geodätischen Labors der Universität der Bundeswehr München durchgeführt worden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.4 dargestellt.



- (1) Lasertriangulationssensor
- (2) Scanbereich
- (3) Referenzgeometrie

Abb. 4.4: Messaufbau zur kombinierten Überprüfung des Lasertriangulationssensors

Die Abbildung 4.4 zeigt einen Messaufbau, bei dem die Einflüsse Temperatur, Entfernung und Auftreffwinkel kombiniert betrachtet werden. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Variation der Außentemperatur, wobei die Klimakammer im Bereich von -10 bis 40 °C in Intervallen von 5 °C betrieben wurde. Die ermittelten Standardabweichungen der Abweichungen zur Soll-Geometrie betragen im Mittel etwa $0,04\text{ mm}$. Die maximalen Abweichungen zur Soll-Geometrie liegen in den extremen Temperaturbereichen unterhalb von $0,1\text{ mm}$.

Da die Ergebnisse unterhalb der angestrebten Genauigkeit des RACER II liegen, wurden keine weiteren Studien hinsichtlich der Auswirkungen von Entfernung und Auftreffwinkel durchgeführt. Ferner kann die Untersuchung hinsichtlich der Geräteinnentemperatur vernachlässigt werden, da die Lasertriangulationssensoren während der gesamten Messung mit Strom versorgt werden und damit immer mit Betriebstemperatur laufen. Auch die Messoberfläche kann hinsichtlich

Material und Oberflächenstruktur für die bevorstehenden Messsituationen als konstant angesehen werden, wobei weiterführende Betrachtungen über die bereits getesteten Schientypen hinaus unzweckmäßig erscheinen. Vor diesem Hintergrund gibt es keine Kalibrierfunktionen für die Lasertriangulationssensoren in der Kalibrierparameterdatei (Anlage 8.2). Diesbezügliche Erweiterungen wären jedoch denkbar.

4.3.3 Inklinometer

Das für den RACER II verwendete Inklinometer NS-15/DMG2-U (Kapitel 3.4.3.3) dient als redundanter Sensor vorrangig der Kontrolle der Zielgrößen Überhöhung und Gradiente. Analog zu den Lasertriangulationssensoren werden die wesentlichen instrumentellen Fehlerquellen vorab durch den Hersteller kalibriert. Die entsprechenden Korrekturen sind unmittelbar an den Rohmessdaten des Inklinometers angebracht. Daher sind lediglich folgende verbleibende instrumentelle Fehlerquellen zu untersuchen:

- Nullpunktversatz und Maßstab
- Temperaturabhängigkeit

Der Maßstab wurde nicht detailliert überprüft, da stichprobenhafte Vergleichsmessungen in zwei Lagen mit unterschiedlichen Neigungen keinerlei Auffälligkeiten im Rahmen der angestrebten Messunsicherheit zeigten. Im Nullpunktversatz wurden dagegen deutliche Abweichungen gegenüber der Kalibrierung des Herstellers festgestellt, wobei das Inklinometer in einer genähert horizontalen Ebene über mehrere Stunden lang in zwei Lagen beobachtet wurde. Aus wiederholten Messungen ergaben sich Mittelwerte, die in der Kalibrierparameterdatei (Anlage 8.2) unter dem Kürzel „KFNO“ eingetragen sind.

Aufgrund der stark unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im GBT wurde zusätzlich die Temperaturabhängigkeit des Inklinometers untersucht, wobei sich die Überprüfung aufgrund der untergeordneten Bedeutung des redundanten Messsystems auf die horizontale Ausgangslage beschränkt. Durch die Montage des NS-15/DMG2-U auf einen Messpfeiler innerhalb der Klimakammer konnten Abweichungen zur horizontalen Soll-Lage der Pfeilerplatte entsprechend der Abbildung 4.5 festgestellt werden. Bei einem Temperaturbereich von -10 bis 45 °C können Bewegungen des Messpfeilers nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die entsprechenden Neigungen der Pfeilerplatte wurden mit dem Referenzinklinometer NIVEL 20 der Firma Leica [Leica 1989] überprüft und sind in den Ergebnissen der Abbildung 4.5 bereits berücksichtigt.

In der Abbildung 4.5 sind die Mittelwerte repräsentativer Intervalle für 12 Temperaturbereiche dargestellt, wobei die Intervallbreite jeweils 10 Messwerte enthält bei einer Beobachtungsdauer von einer Sekunde. Bei der Untersuchung wurde die Kammer für alle 12 Temperaturbereiche zweimal vom Kalten ins Warme (aufsteigende Temperaturen, rote Darstellung) und zweimal vom Warmen ins Kalte (absteigende Temperaturen, blaue Darstellung) klimatisiert. Die Streuung bei Mehrfachmessungen konnte im Vorfeld mit einer Standardabweichung von 0,0013° bestimmt werden und entspricht damit der Herstellerangabe.

Die temperaturbedingten Abweichungen der in Abbildung 4.5 dargestellten X-Achse liegen maximal bei $\pm 0,009^\circ$. Das entspricht einer Messabweichung von 0,23 mm/1,5m bei der Überhöhung und 0,16 ‰ bei der Gradiente. Durch Modellierung der Korrekturfunktion als Polynom dritten Grads (grüne Darstellung) sind die verbleibenden Messabweichungen entsprechend geringer. Die Parameter der Kalibrierfunktionen der beiden Achsen sind in der Kalibrierparameterdatei (Anlage 8.2) unter den Kürzeln „KFNTX“ und „KFNTY“ eingetragen.

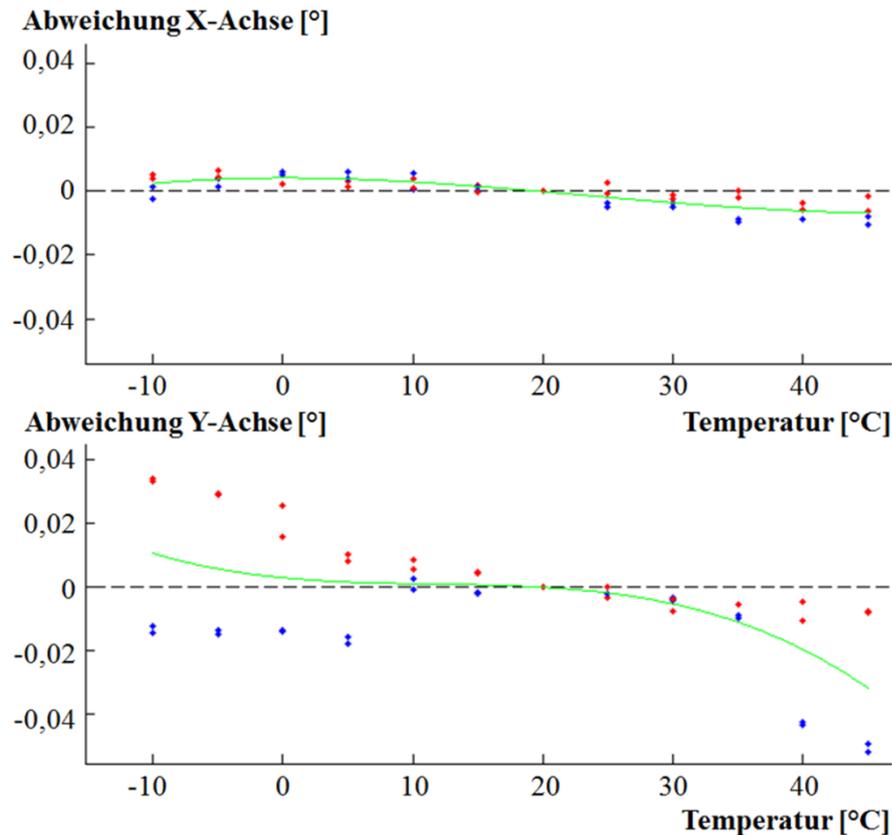


Abb. 4.5: Abweichungen der X- und Y-Achse des Inklinometers zum Nullpunkt bei 20 °C, rot = aufsteigende Temperaturen, blau = absteigende Temperaturen, grün = Polynom dritten Grades

Die temperaturbedingten Abweichungen der Y-Achse zeigen im Vergleich zur X-Achse in den Randbereichen eine deutliche Hysterese. Der Effekt kann durch die Modellierung als Korrekturfunktion als Polynom dritten Grads nur unzureichend kompensiert werden. Die maximalen Messabweichungen nach Anbringen der Korrekturfunktionen betragen etwa 0,6 mm/1,5m bei der Überhöhung und 0,4 ‰ bei der Gradiente und liegen damit außerhalb der angestrebten Genauigkeit der Zielgrößen. Jedoch ist die Gradientenbestimmung für die Gleisabnahme von untergeordneter Bedeutung. Die Ausrichtung des Inklinometers im MWS wurde hinsichtlich der genaueren X-Achse zu Gunsten der Überhöhungsbestimmung gewählt.

4.3.4 Meteorologiesensoren

In der Abbildung 4.6 sind die Mittelwerte repräsentativer Intervalle für 12 Temperaturbereiche dargestellt, wobei die Intervallbreite jeweils 5 Messwerte enthält. Die Messungen wurden parallel zu den Temperaturkalibrierungen des Inklinometers durchgeführt (Kapitel 4.3.3). Analog zur Abbildung 4.5 erfolgte die Untersuchung für alle 12 Temperaturbereiche zweimal vom Kalten

ins Warme (aufsteigende Temperaturen, rote Darstellung) und zweimal vom Warmen ins Kalte (absteigende Temperaturen, blaue Darstellung).

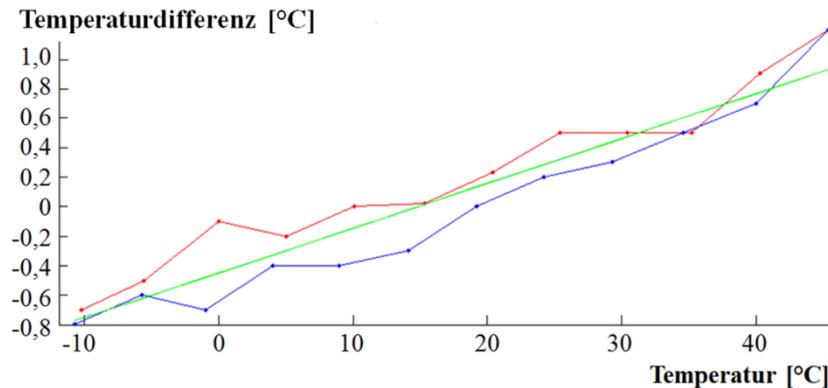


Abb. 4.6: Abweichungen der Temperaturdifferenz gegenüber dem Referenzthermometer, rot = aufsteigende Temperaturen, blau = absteigende Temperaturen, grün = Regressionsgerade

Die in der Abbildung 4.6 dargestellten Werte zeigen exemplarisch die Ergebnisse des Lufttemperatursensors TSic 506 (Kapitel 3.4.3.4), wobei der Materialtemperatursensor ein nahezu identisches Verhalten aufzeigt. Der Vergleich gegenüber dem Referenzthermometer 2804A zeigt eine Übereinstimmung bei etwa 18 °C und zunehmende Differenzen zu den Grenzen des Temperaturbereichs, die sich aufgrund der geringen Hysterese durch eine lineare Regressionsfunktion hinreichend genau modellieren lassen. Die entsprechenden Korrekturfunktionen sind in der Kalibrierparameterdatei (Anlage 8.2) unter den Kürzeln „KFTL“ und „KFTM“ eingetragen.

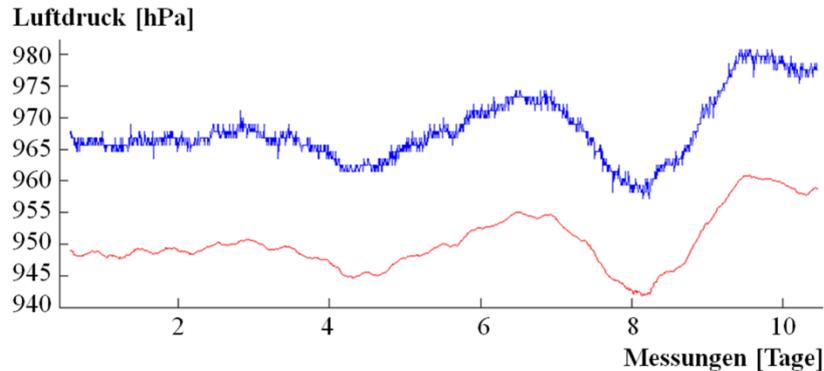


Abb. 4.7: Messergebnisse zur Bestimmung des Luftdruck-Offsets, blau = DRMOD-I²C (RACER II), rot = Digiquartz 760 (Referenz)

Da der verwendete Drucksensor DRMOD-I²C (Kapitel 3.4.3.4) nach Herstellerangaben bereits über eine interne Temperaturkorrektur auf Basis eines integrierten Temperatursensors verfügt, wurde auf eine entsprechende Untersuchung verzichtet. Die Ergebnisse der Abbildung 4.7 zeigen lediglich die Messergebnisse des Drucksensors gegenüber dem Referenzsensor Digiquartz 760 zur Ermittlung des Nullpunktoffsets. Ein vergleichbarer Wert ist in der Kalibrierparameterdatei (Anlage 8.2) unter dem Kürzeln „KFLD“ eingetragen.

5 Systemkalibrierung von Lasertriangulationssensoren

5.1 Zielgrößen einer 6-DoF-Kalibrierung

Eine 6-DoF-Kalibrierung beschreibt allgemein die Bestimmung eines Sensors oder Sensormoduls in einem lokalen gegenüber einem übergeordneten Koordinatensystem mit sechs Freiheitsgraden: den drei Translationen

$$\mathbf{t}_{S-MSS} = \begin{pmatrix} \mathbf{t}_{X,S-MSS} \\ \mathbf{t}_{Y,S-MSS} \\ \mathbf{t}_{Z,S-MSS} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

und den drei Rotationen um die Achsen des lokalen Systems

$$\mathbf{\Phi}_{S-MSS} = \begin{pmatrix} \Phi_{\omega,S-MSS} \\ \Phi_{\varphi,S-MSS} \\ \Phi_{\kappa,S-MSS} \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

Es wird jeweils von rechtshändigen kartesischen Koordinatensystemen ausgegangen, ohne jedoch dass durchgehend identische Punkte für die Transformationen vorhanden sind. Die Transformationsparameter überführen das lokale Koordinatensystem des Sensors (S) in das übergeordnete Koordinatensystem des MSS. Die Transformationsvorschrift ist wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{MSS,i} &= \mathbf{t}_{S-MSS} + \mathbf{R}(\mathbf{\Phi}_{S-MSS}) \cdot \mathbf{x}_{S,i} \\ \begin{pmatrix} X_{X,MSS,i} \\ X_{Y,MSS,i} \\ X_{Z,MSS,i} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{t}_{X,S-MSS} \\ \mathbf{t}_{Y,S-MSS} \\ \mathbf{t}_{Z,S-MSS} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_X(\Phi_{\omega,S-MSS}) \cdot \mathbf{R}_Y(\Phi_{\varphi,S-MSS}) \cdot \mathbf{R}_Z(\Phi_{\kappa,S-MSS}) \cdot \begin{pmatrix} X_{X,S,i} \\ X_{Y,S,i} \\ X_{Z,S,i} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

wobei \mathbf{x}_S die Objektkoordinaten in S und \mathbf{x}_{MSS} die transformierten Koordinaten von S im MSS enthält. Die Objektkoordinaten \mathbf{x}_S werden aus den originären Messwerten des Sensors, in der Regel aus Richtungs- und Entfernungsmessungen, gewonnen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden die Objektkoordinaten \mathbf{x}_S als originäre Messungen verstanden.

Der Index $i = 1, \dots, m$ repräsentiert eine von insgesamt m Messungen des Sensors. Die Rotationsmatrix \mathbf{R} enthält die Rotationsparameter $\mathbf{\Phi}_{S-MSS}$ [Strübing u. Neumann 2013]. Die Drehreihenfolge der Rotationen um die Koordinatenachsen kann grundsätzlich frei gewählt werden. Im Folgenden wird der klassische Ansatz verfolgt, wobei sich die einzelnen Rotationsmatrizen wie folgt ergeben:

$$\mathbf{R}_X(\Phi_{\omega,S-MSS}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Phi_{\omega,S-MSS}) & \sin(\Phi_{\omega,S-MSS}) \\ 0 & -\sin(\Phi_{\omega,S-MSS}) & \cos(\Phi_{\omega,S-MSS}) \end{pmatrix}, \quad (5.4)$$

$$\mathbf{R}_Y(\Phi_{\varphi,S-MSS}) = \begin{pmatrix} \cos(\Phi_{\varphi,S-MSS}) & 0 & -\sin(\Phi_{\varphi,S-MSS}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Phi_{\varphi,S-MSS}) & 0 & \cos(\Phi_{\varphi,S-MSS}) \end{pmatrix} \text{ und} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{R}_Z(\Phi_{\kappa,S-MSS}) = \begin{pmatrix} \cos(\Phi_{\kappa,S-MSS}) & \sin(\Phi_{\kappa,S-MSS}) & 0 \\ -\sin(\Phi_{\kappa,S-MSS}) & \cos(\Phi_{\kappa,S-MSS}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.6)$$

Die Bestimmung der 6-DoF-Parameter wird dann erschwert, wenn Koordinatenursprung und Ausrichtung des Sensormoduls nicht direkt messbar beziehungsweise signalisierbar sind. Diese Problematik ist vor allem bei der Kalibrierung optischer Sensormodule anzutreffen. Abbildung 5.1 zeigt beispielhaft den beim RACER II verwendeten Lasertriangulationssensor M2-iLAN-2-120/60 der Firma MEL (Kapitel 3.4.3.2). Der Koordinatenursprung liegt etwa 80 mm außerhalb des Sensorgehäuses. Die beiden Achsen X_{PLS} und Z_{PLS} verlaufen in Richtung des Laserfächers beziehungsweise orthogonal dazu. Zur Ermittlung der 6-DoF-Parameter müssen indirekte Verfahren angewendet werden, wobei das Sensormodul eine bekannte Referenzgeometrie erfasst, die innerhalb des MSS bekannt ist.

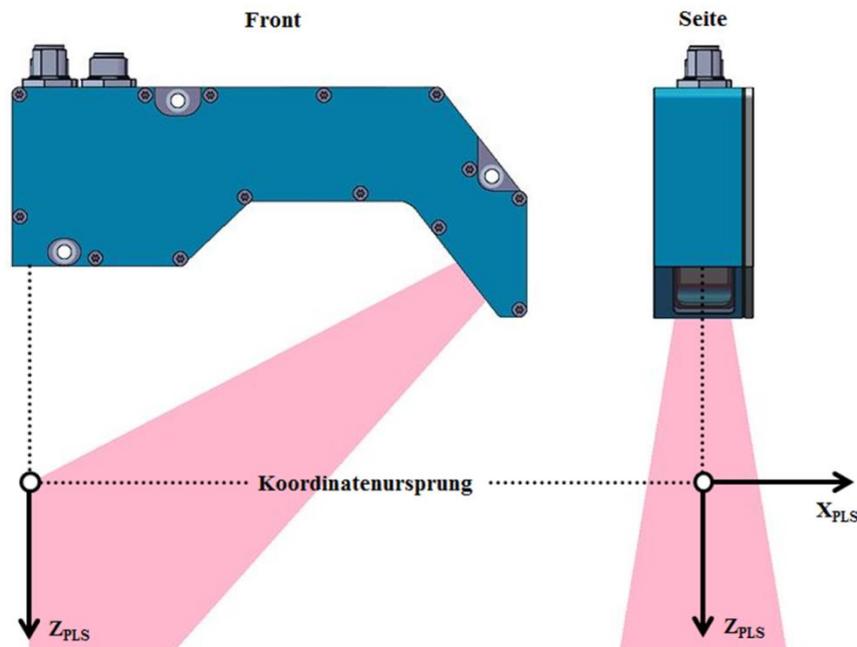


Abb. 5.1: Koordinatensystem eines Lasertriangulationssensors, nach [MEL 2010]

Ein weiteres Beispiel stellen 3D-Laserscanner dar. Im Gegensatz zu Lasertriangulationssensoren ist das Koordinatensystem eines 3D-Laserscanners im Schnittpunkt von Steh-, Kipp- und Zielachse gelagert. Bei einem Tachymeter können die 6-DoF-Parameter über das Messen kon-

kreter Punkte in zwei Fernrohrlagen bestimmt werden (Kapitel 5). 3D-Laserscanner können keine konkreten Punkte anzielen. Sie erfassen Oberflächenstrukturen, wobei der Laserstrahl durch eine Ablenkeinheit ein systematisches Punktraster erzeugt. Hinzu kommen instrumentelle Abweichungen der Ablenkeinheit und objektbezogene Effekte, hervorgerufen durch die reflektorlose Distanzmessung, dem Einfallswinkel des Laserlichts auf die Oberfläche des Messobjekts sowie deren Beschaffenheit. Die Bestimmung der 6-DoF-Parameter bei 3D-Laserscannern ist im Allgemeinen nur indirekt über Referenzgeometrien möglich. Zahlreiche Ansätze sind in diesem Zusammenhang bekannt. Stellvertretend sei an dieser Stelle auf [Dold 2010], [Neitzel u.a. 2010] und [Gielsdorf u.a. 2008] verwiesen.

In der Photogrammetrie werden die Aufnahmen einem gemeinsamen Gesamtsystem zugeordnet (Blockverband). Die gemeinsame Zuordnung erfolgt über die 6-DoF-Parameter der Aufnahmezentren der Einzelaufnahmen. Das Aufnahmezentrum befindet sich innerhalb der Messkamera und ist damit nicht direkt signalisierbar. In Folge dessen müssen die 6-DoF-Parameter sowie gegebenenfalls weitere Kenngrößen einer Kamera indirekt über Referenzgeometrien bestimmt werden. Näheres hierzu kann beispielsweise in [Kraus 2004] oder [Bähr u. Vögtle 2005] nachgeschlagen werden.

5.2 6-DoF-Kalibrierung von Lasertriangulationssensoren

Die generelle Vorgehensweise zur Umsetzung einer 6-DoF-Kalibrierung bei Lasertriangulationssensoren kann nach [Strübing u. Neumann 2013] in drei wesentliche Teilschritte untergliedert werden:

1. Definition einer Referenzgeometrie (Kapitel 5.3, Kapitel 6.2.1)
2. Aufnahme der Referenzgeometrie (Kapitel 6.2.2)
 - Aufnahme mit einem Referenz-Messverfahren
 - Aufnahme mit den Lasertriangulationssensoren des MSS
 - Herstellen des Bezugs zwischen MSS und Referenzgeometrie
3. Aufstellen des Ausgleichsmodells und Bestimmung der 6-DoF-Parameter (Kapitel 5.4, Kapitel 6.2.4)

Die Wahl der Referenzgeometrie hängt insbesondere von der Art der Aufgabenstellung und der verwendeten Sensorik ab. Dabei können sowohl mathematisch definierte Körper (beispielsweise Ebenen, Kugeln), als auch beliebige Geometrien verwendet werden (beispielsweise raue oder unförmige Oberflächenstrukturen), wobei letztere durch Parameter lediglich approximiert werden können. In Kapitel 5.3 werden Beispiele möglicher Ansätze zur Verwendung unterschiedlicher Referenzgeometrien dargestellt. Die einzelnen Referenzgeometrien RFG_j werden über Flä-

chenparameter $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$ beschrieben. Der Index $j = 1, \dots, n$ repräsentiert eine von n Referenzgeometrien (für einen Sensor).

Es folgt die Aufnahme der RFG, j mit dem Lasertriangulationssensoren des MSS. Der Lasertriangulationssensor erzeugt i Messungen respektive in Hinblick auf die Ausgleichung Beobachtungen in S , die zunächst mit (5.3) in das MSS transformiert werden. Aus $\mathbf{x}_{\text{MSS},i}$ entstehen j Teilmengen, die den korrespondierenden RFG, j zugeordnet sind. Eine Teilmenge enthält $k_j = 1_j, \dots, o_j$ Beobachtungen im MSS:

$$\mathbf{x}_{\text{MSS},k_j} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{\text{X,MSS},k_j} \\ \mathbf{x}_{\text{Y,MSS},k_j} \\ \mathbf{x}_{\text{Z,MSS},k_j} \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Die Anzahl o_j ist nicht für alle RFG, j konstant, daher der zusätzliche Index $j = 1, \dots, n$ entsprechend der Anzahl der Referenzgeometrien. Sie hängt von den bestrahlten Oberflächenanteilen der RFG, j und dem Ergebnis der Zuordnung ab. Die Zuordnung der o_j Koordinaten zu den einzelnen RFG, j sollte über automatische Verfahren realisiert werden, was den Auswerteprozess deutlich beschleunigt. Dies kann beispielsweise unter Nutzung der algebraischen, projektiven Geometrie [Rietdorf 2005] oder mit allgemeinen symbolischen Verfahren [Dold 2010] erfolgen. Für den RACER II wird eine weitere Vorgehensweise erläutert (Kapitel 6.2.3). Alle Verfahren benötigen für die 6-DoF-Parameter der Lasertriangulationssensoren im MSS Näherungswerte mit hinreichender Genauigkeit, damit eine ausreichend genaue Zuordnung gewährleistet werden kann.

Der notwendige Bezug zwischen dem übergeordneten Koordinatensystem der RFG, j und dem lokalen Koordinatensystem des MSS kann beispielsweise über die Messung diskreter Passpunkte auf dem MSS hergestellt werden. Die Parameter dieses Datumsübergangs sind analog zu den Formeln (5.1) und (5.2) in drei Translationen

$$\mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}} = \begin{pmatrix} t_{\text{X,MSS-RFG}} \\ t_{\text{Y,MSS-RFG}} \\ t_{\text{Z,MSS-RFG}} \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

und drei Rotationen

$$\mathbf{\Phi}_{\text{MSS-RFG}} = \begin{pmatrix} \Phi_{\theta,\text{MSS-RFG}} \\ \Phi_{\varphi,\text{MSS-RFG}} \\ \Phi_{\kappa,\text{MSS-RFG}} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

gegliedert. RFG bezeichnet in diesem Zusammenhang das übergeordnete Koordinatensystem der Gesamtheit aller RFG,j. Die Transformationsvorschrift ergibt sich entsprechend (5.3):

$$\mathbf{x}_{\text{RFG},k_j} = \mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}} + \mathbf{R}(\Phi_{\text{MSS-RFG}}) \cdot \mathbf{x}_{\text{MSS},k_j}$$

$$\begin{pmatrix} X_{X,\text{RFG},k_j} \\ X_{Y,\text{RFG},k_j} \\ X_{Z,\text{RFG},k_j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{X,\text{MSS-RFG}} \\ t_{Y,\text{MSS-RFG}} \\ t_{Z,\text{MSS-RFG}} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_X(\Phi_{\omega,\text{MSS-RFG}}) \cdot \mathbf{R}_Y(\Phi_{\phi,\text{MSS-RFG}}) \cdot \mathbf{R}_Z(\Phi_{\kappa,\text{MSS-RFG}}) \cdot \begin{pmatrix} X_{X,\text{MSS},k_j} \\ X_{Y,\text{MSS},k_j} \\ X_{Z,\text{MSS},k_j} \end{pmatrix}. \quad (5.10)$$

Die direkte Überführung der originären, jedoch bereits zugeordneten Objektkoordinaten \mathbf{x}_{S,k_j} in entsprechende Koordinaten innerhalb des RFG erfolgt durch Einsetzen von (5.3) in (5.10):

$$\mathbf{x}_{\text{RFG},k_j} = \mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}} + \mathbf{R}(\Phi_{\text{MSS-RFG}}) \cdot (\mathbf{t}_{S-\text{MSS}} + \mathbf{R}(\Phi_{S-\text{MSS}}) \cdot \mathbf{x}_{S,k_j})$$

$$\begin{pmatrix} X_{X,\text{RFG},k_j} \\ X_{Y,\text{RFG},k_j} \\ X_{Z,\text{RFG},k_j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{X,\text{MSS-RFG}} \\ t_{Y,\text{MSS-RFG}} \\ t_{Z,\text{MSS-RFG}} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_X(\Phi_{\omega,\text{MSS-RFG}}) \cdot \mathbf{R}_Y(\Phi_{\phi,\text{MSS-RFG}}) \cdot \mathbf{R}_Z(\Phi_{\kappa,\text{MSS-RFG}}) \cdot \begin{pmatrix} t_{X,S-\text{MSS}} \\ t_{Y,S-\text{MSS}} \\ t_{Z,S-\text{MSS}} \end{pmatrix} + \mathbf{R}_X(\Phi_{\omega,S-\text{MSS}}) \cdot \mathbf{R}_Y(\Phi_{\phi,S-\text{MSS}}) \cdot \mathbf{R}_Z(\Phi_{\kappa,S-\text{MSS}}) \cdot \begin{pmatrix} X_{X,S,k_j} \\ X_{Y,S,k_j} \\ X_{Z,S,k_j} \end{pmatrix}. \quad (5.11)$$

Die in Abbildung 5.2 dargestellten Koordinatensysteme veranschaulichen das Grundprinzip der doppelten Transformation in (5.11). Der Sensor erfasst Messpunkte $\mathbf{x}_{\text{RFG},k_j}$ auf der Oberfläche der Referenzgeometrie im Koordinatensystem des Sensors S. Die innere Transformation beschreibt den Übergang von S nach MSS, die äußere Transformation den Übergang vom MSS zum Koordinatensystem der RFG.

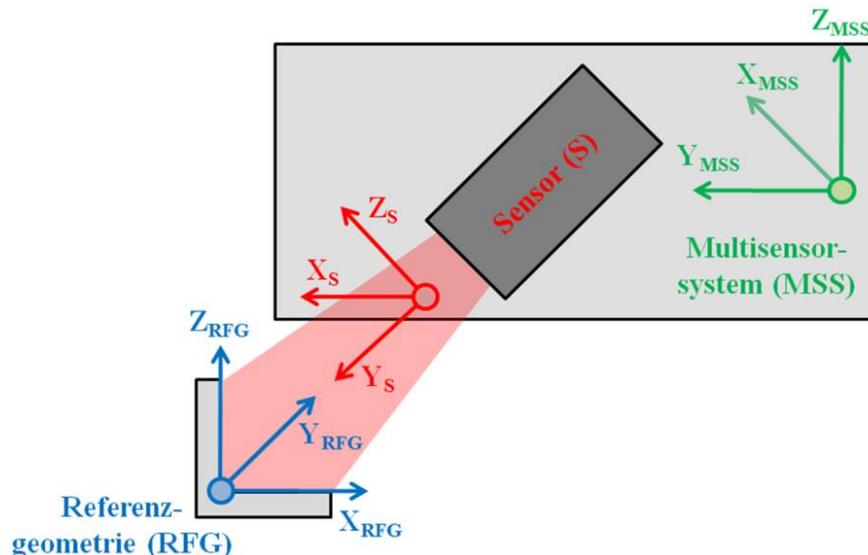


Abb. 5.2: Koordinatensysteme bei der Kalibrierung eines MSS

Der folgende Ansatz beruht auf der Restriktion, dass die Abstände d_{k_j} zwischen den Referenzgeometrien RFG, j und den transformierten Koordinaten $\mathbf{x}_{\text{RFG},k_j}$ Null sein müssen, wobei die 6-DoF-Parameter $\mathbf{t}_{\text{S-MSS}}$ und $\Phi_{\text{S-MSS}}$ den Parametervektor im Ausgleichungsmodell darstellen [Strübing u. Neumann 2013]. Sofern die Flächenparameter $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$ vorliegen, kann das funktionale Modell im Gauß-Helmert-Modell (GHM) wie folgt dargestellt werden:

$$\mathbf{d}_{k_j} = f_{k_j} \left(\mathbf{x}_{\text{S},k_j}, \mathbf{a}_{\text{RFG},j}, \mathbf{t}_{\text{S-MSS}}, \Phi_{\text{S-MSS}}, \mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}}, \Phi_{\text{MSS-RFG}} \right) \stackrel{!}{=} 0 \quad \forall j \quad (5.12)$$

Da die Flächenparameter $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$ ebenfalls aus den Beobachtungen $\mathbf{x}_{\text{ÜMS},p}$ abgeleitet werden, müssen weitere funktionale Zusammenhänge $f_j(\mathbf{x}_{\text{RFG},p})$ berücksichtigt werden. Die $p_j = 1, \dots, r_j$ Beobachtungen sind im übergeordnetem RFG bestimmt und vor dem Hintergrund einer Kalibrierung mit höherer Genauigkeit gemessen als die Beobachtungen in S. Dabei handelt es sich um Messpunkte, mit welchen die einzelnen RFG, j im RFG erfasst werden.

Des Weiteren leiten sich die Transformationsparameter von MSS nach RFG ($\mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}}$ und $\Phi_{\text{MSS-RFG}}$) aus der Beobachtungsgruppe $\mathbf{x}_{\text{ÜMS},q}$ ab, so dass die funktionalen Zusammenhänge $f_t(\mathbf{x}_{\text{RFG},p}, \mathbf{x}_{\text{RFG},q})$ und $f_\omega(\mathbf{x}_{\text{RFG},p}, \mathbf{x}_{\text{RFG},q})$ berücksichtigt werden müssen. Bei $\mathbf{x}_{\text{ÜMS},q}$ handelt es sich um $q_j = 1, \dots, s_j$ Beobachtungen, die den Bezug zwischen MSS und RFG herstellen, beispielsweise den Koordinaten der diskreten Passpunkte der MSS. p_j und q_j wurden im Vorfeld analog zu den Beobachtungen $\mathbf{x}_{\text{S},k_j}$ den korrespondierenden RFG, j zugeordnet. Vor diesem Hintergrund muss die Gleichung (5.12) genauer spezifiziert werden:

$$\mathbf{d}_{k_j} = f_{k_j} \left(\mathbf{x}_{\text{S},k_j}, f_j \left(\mathbf{x}_{\text{RFG},p_j} \right), \mathbf{t}_{\text{S-MSS}}, \Phi_{\text{S-MSS}}, f_t \left(\mathbf{x}_{\text{RFG},p_j}, \mathbf{x}_{\text{RFG},q_j} \right), f_\omega \left(\mathbf{x}_{\text{RFG},p_j}, \mathbf{x}_{\text{RFG},q_j} \right) \right) \stackrel{!}{=} 0 \quad \forall j \quad (5.13)$$

Aus methodischer Sicht ist der Übergang auf die originären Beobachtungen wünschenswert. Aufgrund der Übersichtlichkeit und der numerischen Handhabbarkeit soll jedoch auf die explizite Anwendung von (5.13) sowie der Einführung entsprechender Varianz-Kovarianz-Informationen für $\mathbf{x}_{\text{RFG},p_j}$ und $\mathbf{x}_{\text{RFG},q_j}$ verzichtet werden. Zudem können die erweiterten funktionalen Zusammenhänge nicht verallgemeinert werden. Die Flächenparameter hängen von der geometrischen Form der Oberfläche ab. Die Transformationsparameter vom MSS ins RFG können auf unterschiedliche Weise bestimmt werden.

5.3 Wahl der Referenzgeometrie

Die Referenzgeometrien sind so anzuordnen, dass sowohl eine ausreichende Sichtbarkeit, als auch eine hinreichende Sensitivität hinsichtlich der zu bestimmenden 6-DoF-Parameter der Sensoren gegeben sein muss. Die Anordnung hängt von der Art und Montage der Lasertriangulationssensoren im MSS ab. Das Kapitel 6.2.1 zeigt in diesem Zusammenhang ein Beispiel für die Lasertriangulationssensoren des RACER II. Referenzgeometrien können in einem frei definierbaren Koordinatensystem bestimmt werden, das aber für sämtliche RFG, j einheitlich sein muss.

Verwendung von Kugeln als Referenzgeometrien

Kugeln eignen sich vor allem für die Registrierung scannender dreidimensionaler Messsysteme, da sich das Kugelzentrum aus allen Blickrichtungen über die Kugeloberfläche zurückführen lässt. Beim Scannen ist jedoch zu beachten, dass es an den Kugelrändern zu Fehlmessungen kommen kann, die für die Modellierung der Kugeloberfläche ausgeschlossen werden müssen. Eine Kugel lässt sich über den Flächenparameter

$$\mathbf{a}_{\text{RFG},j} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}_{\text{RFG},j} \\ \mathbf{r}_{\text{RFG},j} \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

beschreiben, wobei

$$\mathbf{m}_{\text{RFG},j} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}_{\text{X,RFG},j} \\ \mathbf{m}_{\text{Y,RFG},j} \\ \mathbf{m}_{\text{Z,RFG},j} \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

den Ortsvektor des Kugelzentrums und $\mathbf{r}_{\text{RFG},j}$ den Kugelradius enthält. Für die Restriktion gemäß Formel (5.12) folgt daraus:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{k_j} \stackrel{!}{=} 0 &= \left| \mathbf{x}_{\text{RFG},k_j} - \mathbf{m}_{\text{RFG},j} \right| - \mathbf{r}_{\text{RFG},j} \\ &= \sqrt{\left(x_{\text{X,RFG},k_j} - m_{\text{X,RFG},j} \right)^2 - \left(x_{\text{Y,RFG},k_j} - m_{\text{Y,RFG},j} \right)^2 - \left(x_{\text{Z,RFG},k_j} - m_{\text{Z,RFG},j} \right)^2} - \mathbf{r}_{\text{RFG},j} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Verwendung von Ebenen als Referenzgeometrien

Ebenen eignen sich sehr gut für die Beschreibung einer Referenzgeometrie, da sie sowohl numerisch als auch in der mechanischen Fertigung leicht zu handhaben sind. Eine Ebene lässt sich beschreiben über den Flächenparameter

$$\mathbf{a}_{\text{RFG},j} = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_{\text{RFG},j} \\ \mathbf{d}_{\text{RFG},j} \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

mit dem Normalenvektor

$$\mathbf{n}_{\text{RFG},j} = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_{\text{X,RFG},j} \\ \mathbf{n}_{\text{Y,RFG},j} \\ \mathbf{n}_{\text{Z,RFG},j} \end{pmatrix} \quad (5.18)$$

und dem Abstand zum Ursprung $\mathbf{d}_{\text{RFG},j}$. Für die Restriktion gemäß (5.12) folgt daraus:

$$\begin{aligned}
\mathbf{d}_{k_j} \stackrel{!}{=} 0 &= \mathbf{x}_{\text{RFG},k_j} \cdot \frac{\mathbf{n}_{\text{RFG},j}}{|\mathbf{n}_{\text{RFG},j}|} - d_{\text{RFG},j} \\
&= \frac{\mathbf{n}_{\text{X,RFG},j} \cdot \mathbf{x}_{\text{X,RFG},k_j} + \mathbf{n}_{\text{Y,RFG},j} \cdot \mathbf{x}_{\text{Y,RFG},k_j} + \mathbf{n}_{\text{Z,RFG},j} \cdot \mathbf{x}_{\text{Z,RFG},k_j}}{\sqrt{\mathbf{n}_{\text{X,RFG},j}^2 + \mathbf{n}_{\text{Y,RFG},j}^2 + \mathbf{n}_{\text{Z,RFG},j}^2}} - d_{\text{RFG},j}
\end{aligned} \tag{5.19}$$

Verwendung von quadratischen Formen als Referenzgeometrien

Gewölbte Oberflächen lassen sich beispielsweise mit Hilfe quadratischer Funktionen beschreiben. Diese Funktionen bilden die Gesamtheit der Flächen zweiter Ordnung (Quadriken) und stellen einen allgemeinen mathematischen Ansatz dar, der Sonderfälle wie die Oberflächen von Kugeln, Zylindern oder Kegeln mit einschließt. Die entsprechenden Flächenparameter der Referenzgeometrien

$$\mathbf{a}_{\text{RFG},j} = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9 \ a_{10})^T \tag{5.20}$$

führen unter Beachtung der Restriktion gemäß Formel (5.12) zu

$$\mathbf{d}_{k_j} \stackrel{!}{=} 0 = \mathbf{x}_{\text{RFG},j}^T \cdot \begin{pmatrix} a_1 & \frac{a_4}{\sqrt{2}} & \frac{a_5}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_4}{\sqrt{2}} & a_2 & \frac{a_6}{\sqrt{2}} \\ \frac{a_5}{\sqrt{2}} & \frac{a_6}{\sqrt{2}} & a_3 \end{pmatrix}_{\text{RFG},j} \cdot \mathbf{x}_{\text{RFG},j} + \mathbf{x}_{\text{RFG},j}^T \cdot \begin{pmatrix} a_7 \\ a_8 \\ a_9 \end{pmatrix}_{\text{RFG},j} + a_{10\text{RFG},j} \tag{5.21}$$

[Strübing u. Neumann 2013], [Drixler 1993], [Kern 2003], [Campbell u. Flynn 2001].

Verwendung unregelmäßiger Formen als Referenzgeometrien

Grundsätzlich kann jede Oberflächengeometrie als Referenzgeometrie verwendet werden. Mit zunehmender Unregelmäßigkeit der Oberflächenstruktur steigt allerdings der Aufwand der mathematischen Modellierung. Daher sollten die folgenden Beispiele in der praktischen Anwendung vernachlässigt werden, sofern die 6-DoF-Parameter nicht durch einfachere, geometrische Strukturen eindeutig bestimmt werden können.

Zur Modellierung komplexer Freiformflächen werden zumeist Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) verwendet. NURBS sind mathematische Funktionen, die insbesondere geschwungene Oberflächen abbilden können. Damit lassen sich beispielsweise technische Bauteile sehr gut approximieren. Ein NURBS setzt sich aus Polynomen zusammen, die durch Kontrollpunkte beeinflusst werden. Die Genauigkeit der Flächenrepräsentation hängt vom Grad der Polynome und der Anzahl der verwendeten Kontrollpunkte ab. NURBS werden beispielsweise für das Design moderner Karosserien in der Automobilindustrie eingesetzt. Weitergehende Informationen können [Scharfschwerdt 2010], [Piegl u. Tiller 1997] oder [Selimovic 2006] entnommen werden.

Eine weitere, konventionelle Technik zur Approximation komplexer Oberflächenstrukturen ist die Nutzung eines Triangulated Irregular Network (TIN). Dabei wird eine beliebige Oberflächenstruktur durch Dreiecksvermaschung approximiert, aus der gegebenenfalls hochauflösende Oberflächenraster interpoliert werden können. Stützpunkte bilden einzelne Dreiecke, die zusammen die Oberflächenstruktur in Form eines Mosaiks abbilden. Die Genauigkeit der Flächenrepräsentation von der Auswahl und Anzahl der verwendeten Stützpunkte ab. TIN werden beispielsweise zur Modellierung digitaler Geländemodelle genutzt. Weitergehende Informationen können [Bähr u. Vögtle 2005] oder [Mach u. Petschek 2006] entnommen werden.

5.4 Aufstellung des Ausgleichungsmodells

Der Auswerteanatz über Restriktionen gemäß (5.12) lässt sich durch Anwendung des GHM lösen. Nachfolgend wird exemplarisch die Aufstellung des funktionalen und stochastischen Modells für einen Sensor betrachtet. In Kapitel 5.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht alle originären Beobachtungen in das Ausgleichungsmodell einfließen sollen, sondern lediglich die Beobachtungen des Lasertriangulationssensors \mathbf{x}_{S,k_j} . Bei den verbleibenden, abgeleiteten Größen handelt es sich um die Translationen $\mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}}$ und die Rotationen $\Phi_{\text{MSS-RFG}}$ sowie die Parameter $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$ der Referenzgeometrien. Sie wurden zuvor aus den Beobachtungen des Referenzinstruments gewonnen und gelten vor diesem Hintergrund als quasi originär. Daher wird auf die erweiterten funktionalen Zusammenhänge gemäß (6.13) im Folgenden verzichtet. Der Beobachtungsvektor \mathbf{L} ergibt sich somit zu:

$$\mathbf{L} = \left(\mathbf{x}_{S,k_1}^T \dots \mathbf{x}_{S,k_n}^T \quad \mathbf{a}_{\text{RFG}_1}^T \dots \mathbf{a}_{\text{RFG}_n}^T \quad \mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}}^T \quad \Phi_{\text{MSS-RFG}}^T \right)^T \quad (5.22)$$

Ziel der Ausgleichung ist die Ermittlung der 6-DoF-Parameter des Lasertriangulationssensors im MSS hinsichtlich seiner Position $\mathbf{t}_{S\text{-MSS}}$ und Orientierung $\Phi_{S\text{-MSS}}$. Die abgeleiteten Beobachtungsgruppen $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$, $\mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}}$ und $\Phi_{\text{MSS-RFG}}$ können im Rahmen der Ausgleichung mit aufdatiert werden, so dass sie ebenfalls als Parameter eingeführt werden. Damit ergibt sich der Parametervektor \mathbf{X} wie folgt:

$$\mathbf{X} = \left(\mathbf{t}_{S\text{-MSS}}^T \quad \Phi_{S\text{-MSS}}^T \quad \mathbf{a}_{\text{RFG}_1}^T \dots \mathbf{a}_{\text{RFG}_n}^T \quad \mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}}^T \quad \Phi_{\text{MSS-RFG}}^T \right)^T \quad (5.23)$$

[Strübing u. Neumann 2013]. Ausgehend von dem funktionalen Modell der Ausgleichung

$$f(\tilde{\mathbf{L}}, \tilde{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}, \quad (5.24)$$

wobei \sim für die wahren Werte steht, erfordert jeder Satz an Flächenparametern $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$ zusammen mit den zugehörigen Sensor-Beobachtungen \mathbf{x}_{S,k_j} eine eigene, funktionale Beziehung f_{k_j} :

B. Komponenten, die auf andere Weise ermittelt werden

Die Ergebnisse der Ermittlungsmethode A basieren auf der konventionellen, streng statistischen Auswertung einer Beobachtungsreihe. Verbleibende zufällige und systematische Messabweichungen können durch Ermittlungsmethode B berücksichtigt werden, wobei sämtliche verfügbaren Informationen durch wissenschaftliche Begründung ausgewertet werden können, welche die mögliche Streuung der Komponente beschreiben. Nach [DIN-13005 1999] gehören zu diesen Informationen unter anderem:

- Daten aus früheren Messungen
- Erfahrungen oder allgemeine Kenntnisse über Verhalten und Eigenschaften der relevanten Messgeräte
- Angaben des Herstellers
- Daten von Kalibrierscheinen und anderen Zertifikaten
- Unsicherheiten, die Referenzdaten aus Handbüchern zugeordnet sind

In den meisten Fällen wird eine Ziel- oder Messgröße Y nicht direkt gemessen, sondern aus verschiedenen physikalischen Eingangsgrößen X_1, \dots, X_u durch einen funktionalen Zusammenhang f berechnet:

$$Y = f(X_1, \dots, X_u) \quad (5.27)$$

Die Eingangsgrößen sind ebenfalls Messgrößen mit entsprechenden Messunsicherheiten u_{x_1}, \dots, u_{x_u} . Die Messunsicherheit einer Eingangsgröße wird auch als Standardunsicherheit u bezeichnet. Jede daraus abgeleitete Messunsicherheit, so zum Beispiel auch die Messunsicherheit der Messgröße Y , erhält die Bezeichnung kombinierte Messunsicherheit u_c . Sowohl u als auch u_c lassen sich nach den Ermittlungsmethoden A und B quantifizieren, da möglicherweise u_c weitere unbekannte Eingangsgrößen enthält. Unzureichende Kenntnisse über den funktionalen Zusammenhang (5.27) oder etwaige Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen sowie die unvollständige Definition der Eingangsgrößen können den Betrag von u_c weiter erhöhen und müssen nach Ermittlungsmethode B bestimmt werden. Zudem führt GUM den Begriff der erweiterten Messunsicherheit U ein. Dabei handelt es sich um einen Bereich „(...)“ von dem erwartet werden kann, dass er einen großen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die Y sinnvollerweise zugeordnet werden können.“ [DIN-13005 1999]. Es gilt:

$$U = k \cdot u_c(y), \quad (5.28)$$

wobei der Erweiterungsfaktor k im Allgemeinen zwischen 2 und 3 liegt. In der Geodäsie wird standardmäßig $k = 2$ verwendet. y stellt diesem Zusammenhang der Schätzwert der Messgröße Y dar.

Die Aufstellung des stochastischen Modells gemäß GUM erfordert Kenntnisse über die Korrelationen der einzelnen Messgrößen. Diese lassen sich durch die funktionalen Beziehungen zwischen Eingangsgrößen und Messgrößen nach (5.27) sowie den zugehörigen Messunsicherheiten u_{x_1}, \dots, u_{x_u} ableiten. Die Kofaktormatrix der Beobachtungen \mathbf{Q}_{LL} (5.26) enthält diesbezüglich keine Informationen (Nullwerte in den Nebendiagonalelementen). Sämtliche Beobachtungsgruppen werden als unkorrelierte Beobachtungen eingeführt. Die Herleitung entsprechender Korrelationen ist mit hohem Aufwand verbunden, wie das Beispiel in Abbildung 5.3 verdeutlichen soll.

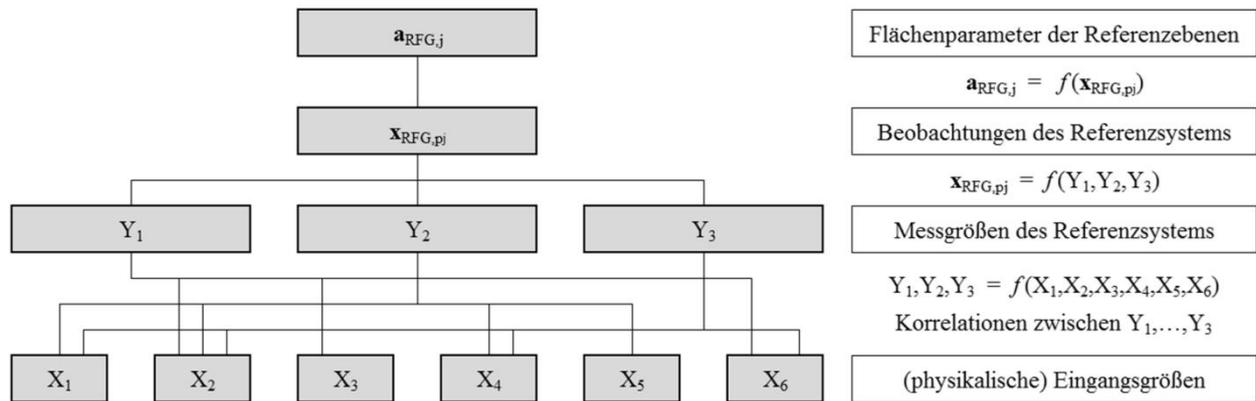


Abb. 5.3: Herleitung der Korrelationen im stochastischen Modell aus physikalischen Eingangsgrößen

Abgeleitete Größen wie beispielsweise die Flächenparameter $a_{\text{RFG},j}$ lassen sich aus den Beobachtungen $x_{\text{RFG},pj}$ über den funktionalen Zusammenhang $f(x_{\text{RFG},pj})$ ermitteln. Die Beobachtungen werden ihrerseits aus den Messgrößen eines Referenzmesssystems Y_1, Y_2 und Y_3 über den funktionalen Zusammenhang $f(Y_1, Y_2, Y_3)$ ermittelt. Die einzelnen Messgrößen werden durch physikalische Eingangsgrößen X_1, \dots, X_6 beeinflusst, wobei entsprechende funktionale Zusammenhänge bestehen (zum Beispiel $Y_1 = f(X_2, X_3, X_6)$). In der Regel sind die einzelnen Messgrößen untereinander korreliert. Beispielsweise beeinflusst die Eingangsgröße X_2 in Abbildung 5.3 alle drei Messgrößen. Wird die Messunsicherheit u_{x_2} unzureichend bestimmt, beispielsweise durch die Verwendung ungenauer Werte von Normalen, pflanzt sich diese Unsicherheit über sämtliche funktionalen Zusammenhänge bis hin zu der Bestimmung der Flächenparameter $a_{\text{RFG},j}$ fort.

Aufgrund der Komplexität einer strengen Messunsicherheitsanalyse nach GUM wird insbesondere im konkreten Anwendungsfall eine praktische Alternative vorgeschlagen, bei der die unteren beiden Ebenen der Abbildung 5.3 vernachlässigt werden. Stattdessen bilden die kombinierten Messunsicherheiten des Referenzmesssystems die Basis für die Aufstellung des stochastischen Modells (5.26). Die Angaben beziehen sich zumeist auf Herstellerangaben und persönliche Erfahrungswerte, wobei die physikalischen Eingangsgrößen mit entsprechend hoher Sorgfalt erfasst und im Referenzmesssystem berücksichtigt werden müssen.

Ergänzend zur Abbildung 5.3 werden aus den Flächenparametern zunächst die 6-DoF-Parameter geschätzt, die für die Transformation der Lasertriangulationssensoren in das MSS notwendig sind. Die Messdaten der Lasertriangulationssensoren lassen sich zusammen mit anderen Sensordaten in übergeordnete Zielgrößen des MSS überführen, welche durch eine unabhängige Validierungsmessung kontrolliert werden können. Der Vergleich der Zielgrößen aus dem MSS (Soll)

und aus der Validierungsmessung (Ist) offenbart, inwieweit die getroffenen Annahmen einen verbleibenden signifikanten Einfluss auf die Messunsicherheit der abgeleiteten Zielgrößen haben. Die Ergebnisse entsprechender Validierungsmessungen in Kapitel 9.3 zeigen diesbezüglich keine Auffälligkeiten, was für die Anwendung der praktischen Alternative spricht.

5.4.3 Aufstellen der Normalgleichungen

Über Näherungswerte für die Parameter \mathbf{X}^0 und Beobachtungen \mathbf{L}^0 können die partiellen Ableitungen des funktionalen Modells aufgestellt werden. Die Designmatrix \mathbf{A} enthält die partiellen Ableitungen nach den Unbekannten, die Bedingungsmatrix \mathbf{B} die entsprechenden Ableitungen nach den Beobachtungen:

$$\mathbf{A} = \left(\frac{\partial f(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \right)_{\mathbf{L}=\mathbf{L}^0, \mathbf{X}=\mathbf{X}^0} \quad (5.29)$$

$$\mathbf{B} = \left(\frac{\partial f(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \mathbf{L}} \right)_{\mathbf{L}=\mathbf{L}^0, \mathbf{X}=\mathbf{X}^0} \quad (5.30)$$

Die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{X}}$ ergeben sich aus dem bekannten Normalgleichungen, beispielsweise nach [Koch 2004] oder [Niemeier 2008] zu

$$\begin{pmatrix} \mathbf{B} \cdot \mathbf{Q}_{LL} \cdot \mathbf{B}^T & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{k} \\ \hat{\mathbf{x}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}} \quad (5.31)$$

mit dem Korrelatenvektor \mathbf{k} , dem gekürzten Parametervektor $\hat{\mathbf{x}}$ und dem Widerspruchsvektor

$$\mathbf{w} = f(\mathbf{L}, \mathbf{X}^0). \quad (5.32)$$

6 Umsetzung der Systemkalibrierung für den RACER II

Im Kapitel 3.4.3 sind die einzelnen Komponenten des Gleisvermessungssystems RACER II vorgestellt. Dabei lassen sich die Sensoren in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe stellt den geometrischen Bezug des MSS zu einem übergeordneten Koordinatensystem her (absolute Orientierung). Für die unterschiedlichen Koordinatensysteme in den vorangehenden Kapiteln werden nachfolgende konkrete Bezeichnungen für das Gleisvermessungssystem RACER II mit der Tabelle 6.1 eingeführt.

allgemeine Bezeichnung		konkrete Bezeichnung (RACER II)	
S	Sensor-Koordinatensystem	PLS	Koordinatensystem eines Lasertriangulationssensors („Profillaserscanner“)
		TMS	Tachymeter-Koordinatensystem
MSS	Multisensor-(Koordinaten-)System	MWS	Messwagen-Koordinatensystem
RFG	Koordinatensystem der Referenzgeometrien	LTS	Lasertracker-Koordinatensystem
		KVS	Kalibriervorrichtungskoordinatensystem
-	-	GVS	Koordinatensystem der Gleisvermarkungspunkte

Tab. 6.1: Allgemeine Bezeichnungen der Koordinatensysteme, sowie im Konkreten für den RACER II

Die in der Tabelle 6.1 dargestellten Koordinatensysteme sind mit Ausnahme des GVS kartesische Rechtssysteme, wobei das TMS, anders als allgemein gebräuchlich, in den Abbildungen 3.3 und 3.4 beziehungsweise in Formel 8.26 als ein solches Rechtssystem vereinbart wird. Das GVS kann mit entsprechenden Reduktionen als ein gleichwertiges Koordinatensystem gesehen werden. Hierzu wird durch Anbringen eines Maßstabsfaktors (m_{geo} , Kapitel 8.3, Formel 8.26), der sich aus den jeweiligen Koordinaten der GVP ortsabhängig ergibt, die Abbildungsverzerrung der Lage kompensiert werden. Das MSS liefert seine Ergebnisse entsprechend der SI Definition des Meters, wie sie durch die Kalibrierung auf alle Sensorkomponenten übertragen wird. Die nivellierten Höhen des GVS werden durch Berücksichtigung der Erdkrümmungsreduktion in eine kartesische Koordinatenkomponente überführt.

Beim RACER II wird ein Präzisionstachymeter eingesetzt, das fest mit dem MWS verbunden ist und die Parameter der absoluten Orientierung (3 Translationen $t_{\text{MWS-GVS}}$, 3 Rotationen $\Phi_{\text{MWS-GVS}}$) über die Messung von Passpunkten ermittelt, welche im übergeordneten Koordinatensystem bekannt sind. Die Rotationsparameter $\varpi_{\text{MWS-GVS}}$ werden zusätzlich durch ein Zweiachs-Inklinometer gestützt, welcher aufgrund seiner Redundanz gegenwärtig nur zur Kontrolle und Plausibilitätsprüfung verwendet wird. Die zweite Sensorgruppe dient der Abtastung der Schienenoberfläche mit vier Lasertriangulationssensoren. Beide Sensorgruppen verbindet, dass der geometrische Bezug aller Sensoren zum gemeinsamen MWS bekannt sein muss (relative Orientierung).

Die Abbildung 6.1 veranschaulicht die Funktionen der einzelnen Sensoren im gemeinsamen MWS. Die mechanische Basis bildet dabei die MSP als Rahmenkonstruktion, die zu allen Messzeitpunkten stabil und unveränderlich sein muss, da andernfalls die relative Orientierung der Sensoren und damit die Berechnung der Zielgrößen systematisch verändert wird. Es verbleibt der zu berücksichtigende Temperatureinfluss, welcher die Rahmenkonstruktion im Ganzen beeinflusst (Kapitel 6.3).

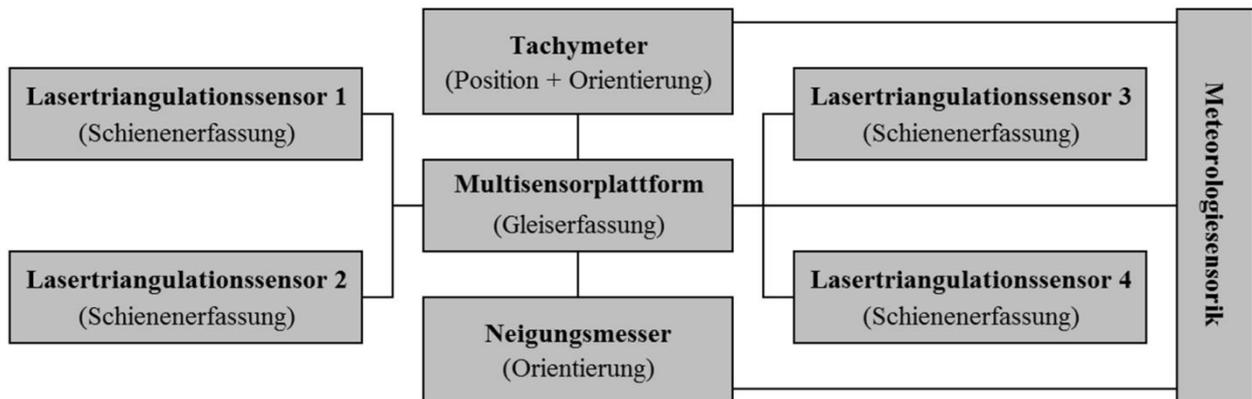


Abb. 6.1: Funktionen der Sensoren innerhalb des MWS

Für die Sensoren zur Erfassung der atmosphärischen Bedingungen der Umgebung (Lufttemperatur und Luftdruck) und der Materialtemperatur ist die Bestimmung der Parameter der relativen Orientierung nicht erforderlich, da sie lediglich repräsentative atmosphärische Messwerte der näheren Umgebung des Gleisvermessungssystems erfassen müssen. Der Luftdrucksensor befindet sich mit auf der Hauptplatine der Steuerungselektronik, von der aus auch die beiden Temperaturfühler kontrolliert werden. Der Temperaturfühler zur Erfassung der Materialtemperatur ist in einem der Längsträger der MSP eingebaut. Ein weiterer Sensor befindet sich an einer zum Boden hin offenen Stelle und erfasst die Umgebungstemperatur. Versuche haben gezeigt, dass an dieser Stelle die repräsentativen Werte aufgezeichnet werden können, insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung. Zudem gibt es dort keine nachweisbare Wärmeabstrahlung benachbarter Sensoren.

6.1 Tachymeter

Die Konzeption des RACER II (Kapitel 3.4) sieht vor, dass das Tachymeter als fester, also hinsichtlich der Position und Ausrichtung konstanter Sensor in das Messwagensystem integriert wird. Daraus folgen bestimmte Forderungen an das Tachymeter und dessen Montage:

1. mechanische Stabilität der Adaption gegenüber dem MWS
2. das lokale Koordinatensystem des Tachymeter muss unveränderlich gegenüber dem MWS sein und wird als kartesisches Rechtssystem eingeführt (Abbildung 3.4)
3. Position und Orientierung des lokalen Koordinatensystems des Tachymeters muss bekannt sein

Forderung 1 setzt die mechanische Stabilität der Adaption voraus. Im Normalfall befindet sich ein Tachymeter in lotrechter Position. Bei der Gleisvermessung unterliegt die MSP Querneigungen von bis zu 150 mm/1,5m. Bei der Konstruktion der Adaption ist darauf zu achten, dass das Eigengewicht des Tachymeters bei entsprechenden Abweichungen aus der Lotrechten keine Torsionen im Querträger bewirkt.

Forderung 2 besagt, dass das Tachymeter den Bewegungen der MSP uneingeschränkt folgen muss. Im Regelfall unterstützt ein Zweiachskompensator den Anwender beim Horizontieren des Tachymeters, um operative Effekte zu minimieren. Im Hinblick auf den RACER II ist diese automatische Kompensation unerwünscht. Um Forderung 2 erfüllen zu können, muss der Kompensator deaktiviert werden.

Forderung 3 besagt, dass Position und Orientierung des TMS gegenüber dem übergeordneten MWS bekannt sein müssen (relative Orientierung). Daneben müssen die Achsbedingungen des Tachymeters erfüllt, sowie die Streckenmessgenauigkeit und die Genauigkeit der automatischen Zielerfassung gewährleistet sein (innere Orientierung). Die Parameter der inneren Orientierung wurden bereits im Kapitel 4 behandelt. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der Bestimmung der Parameter der relativen Orientierung.

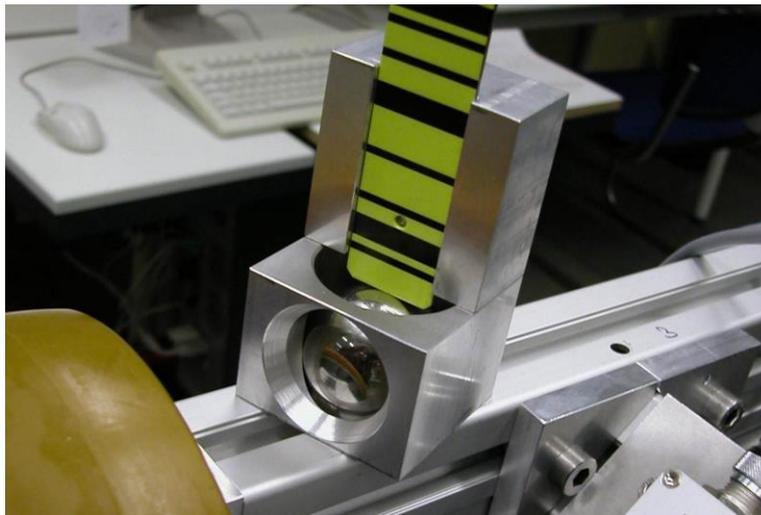


Abb. 6.2: Horizontierung des MWS

Um den Koordinatenursprung, das heißt die Translationsparameter $t_{\text{TMS-MWS}}$ bestimmen zu können, besteht der Grundgedanke darin, zunächst das Zentrum der Adaption (Dreifüßauflage) im MWS zu bestimmen und anschließend die Kippachshöhe auf dessen Z-Komponente zu addieren. Das setzt voraus, dass die Dreifüßauflage parallel zur X-Y-Ebene des MWS verläuft. Diese Bedingung lässt sich rein mechanisch lediglich approximieren. Verbleibende Abweichungen müssen im Rahmen einer Kalibrierung berücksichtigt werden.

Durch passgenaues Einsetzen einer Plasticscheibe in die Adaption wird deren Auflagefläche künstlich erhöht, um Inklinometer beliebiger Bauart aufsetzen zu können. Mit den Messwerten des Inklinometers wird der Dreifuß bestmöglich justiert. Dieser Vorgang setzt voraus, dass sich die X-Y-Ebene des MWS in einer Horizontalebene befindet. Die MSP selbst muss auf drei Punk-

ten höhenverstellbar gelagert und anschließend präzise horizontiert werden. Die Horizontierung erfolgt mit dem digitalen Präzisionsnivellier Leica DNA 03. Eine Stahlkugel gleichen Durchmessers wie ein 1,5“ CCR wird in die PB eingesetzt. Ein spezieller Adapter dient als Träger für die Barcode-Latte des Präzisionsnivelliers (Abbildung 6.2).

Die nach der mechanischen Ausrichtung der Dreifußauflage verbleibenden Abweichungen werden im Folgenden als Dreifußrestschiefe bezeichnet und lassen sich in zwei Komponenten zerlegen: die Querneigung (parallel zur x-Achse des MWS) und die Längsneigung (parallel zur y-Achse des MWS). Die messtechnische Quantifizierung erfolgt durch wiederholte 2-Lagenmessung mit dem Inklinometer NIVEL 20 der Firma Leica. Die Ergebnisse gehen als Kalibrierwerte in die Auswertung ein (Kapitel 8.3). Damit sind die Rotationsparameter des TMS hinreichend genau bestimmt.

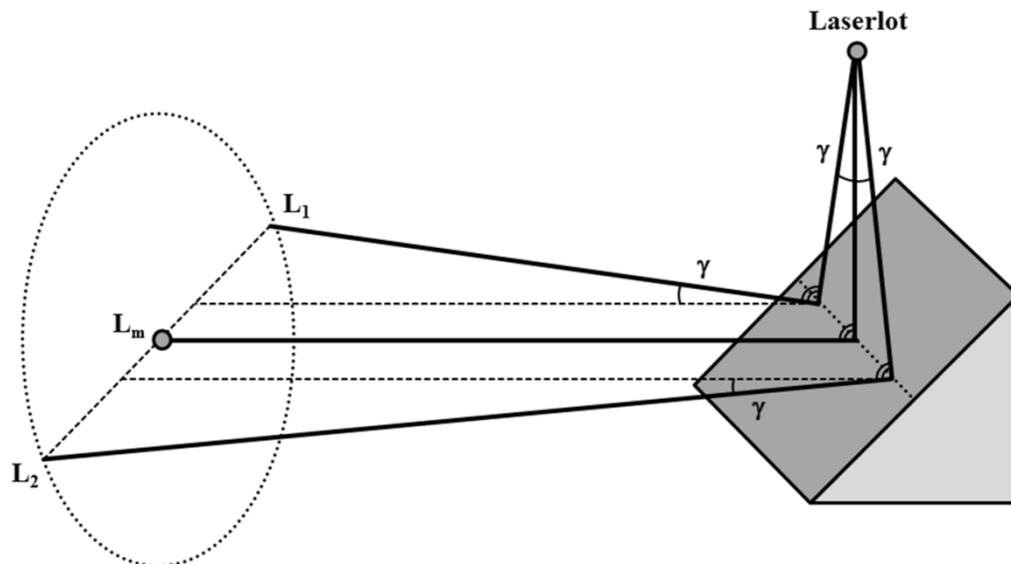
Durch die Justierung sind die verbleibenden Abweichungen der Dreifußrestschiefe so gering, dass sie sich nicht mehr von der Auswirkung des Stehachsfehlers konventioneller Tachymeter trennen lassen. Als Folge dessen können die Rotationswinkel des TMS $\Phi_{\omega, \text{TMS-MWS}}$ (Kippachse) und $\Phi_{\varphi, \text{TMS-MWS}}$ (Zielachse) vernachlässigt werden. Es verbleibt die Bestimmung des Rotationswinkels $\Phi_{\kappa, \text{TMS-MWS}}$ (Stehachse), der die Ausrichtung des Horizontalteilkreises des Tachymeters (Teilkreisnullpunkt) gegenüber der y-Achse des MWS definiert. Hierzu gibt es zwei grundlegende Lösungsansätze:

1. Integration eines Referenzziels innerhalb der MSP (innere Lösung)
2. Bestimmung des gesuchten Parameters über ein externes Messsystem (äußere Lösung)

Methode 1 hat den Nachteil, dass im Fall des RACER II aufgrund seiner Ausmaße keine Position auffindbar ist, an der sich ein durch das Tachymeter messbares Prisma installieren lässt. Die automatische Zielerfassung gewährleistet erst ab etwa 10 m Entfernung eine zuverlässige Zielerkennung. Zudem lässt sich das Fernrohr für eine manuelle Anzielung auf derart geringe Distanzen nicht fokussieren.

Bei Methode 2 werden die gesuchten Parameter über ein externes Messsystem bestimmt. Wird das Tachymeter von der MSP getrennt, muss der gesamte Vorgang wiederholt werden, weil der verbleibende mechanische Spielraum der Dreifußklauen des Tachymeters beim Wiedereinsetzen zu einer entsprechenden Verdrehung führen kann. Der Messaufwand ist damit ungleich höher gegenüber Methode 1.

Moderne Tachymeter verfügen über ein systemintegriertes Laserlot. Als festes Bauteil bleiben Position und Orientierung des Laserlots in Relation zum TMS konstant, selbst wenn das Tachymeter zwischenzeitlich aus dem Dreifuß entnommen und anderweitig verwendet wird. Wird der Laserstrahl umgeleitet, so kann er vom Tachymeter selbst als Zielpunkt genutzt werden, um eine Relation zum Teilkreisnullpunkt herzustellen.

Abb. 6.3: Ermittlung des Rotationswinkels κ' mit Hilfe des Laserlots

Die Abbildung 6.3 zeigt das Prinzip. Der Laserstrahl wird über ein Prisma rechtwinklig von der Lotrechten in die Horizontale abgelenkt. Im Idealfall ist das optische Lot perfekt in Richtung der Stehachse des Tachymeters justiert, so dass der Zielpunkt L_m direkt für die Berechnung des Rotationswinkels $\varpi_{\kappa, \text{TMS-MWS}}$ genutzt werden kann. In der Praxis ist das Laserlot geringfügig dejustiert, wobei sich der wesentliche Teil in der Komponente γ auswirkt. Die daraus resultierende Querabweichung wird verstärkt, je größer die Entfernung zum Zielpunkt ist. Je nach Fernrohrlage wird statt L_m der Zielpunkt L_1 oder L_2 signalisiert. Durch Messung des Laserspots in beiden Fernrohrlagen lässt sich L_m durch arithmetische Mittelbildung berechnen.

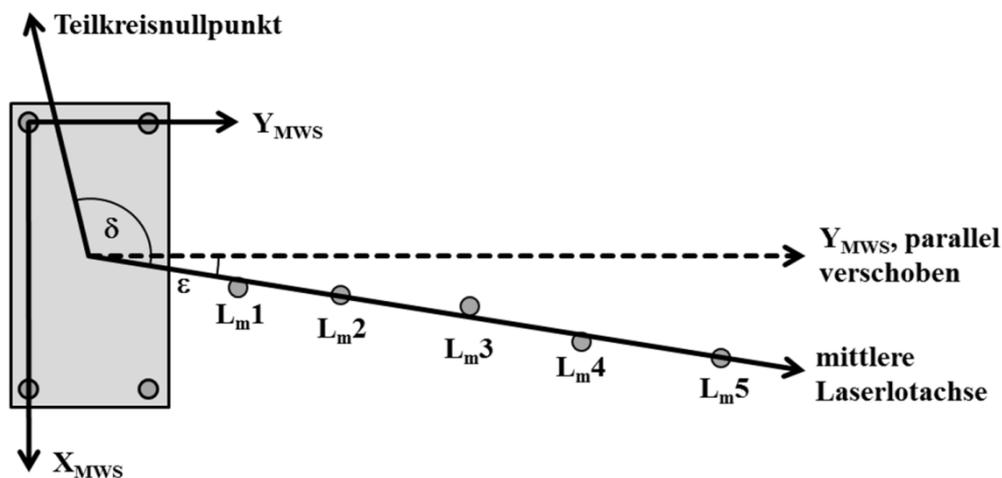


Abb. 6.4: Ermittlung der mittleren Laserlotachse in Relation zum MWS

Beim RACER II wurde ein entsprechendes Umlenkprisma zentrisch unterhalb der Dreifußauflage montiert. Das Umlenkprisma wurde bestmöglich justiert und kann als langzeitstabil gegenüber dem MWS angesehen werden. Besonders kritisch ist die mechanische Ausrichtung des Umlenkprismas gegenüber der Y-Achse des MWS (Y_{MWS}). Idealerweise verlaufen Laserlotachse und Y_{MWS} exakt parallel (Abbildung 6.4). Verbleibende Restabweichungen erfordern eine Kalibrierung, die im Folgenden beschrieben ist.

Die Abbildung 6.4 zeigt die mittlere Laserlotachse in Relation zur parallel verschobenen Y-Achse des MWS. Die mittlere Laserlotachse resultiert aus den Messungen L_{m1}, \dots, L_{m5} , die zuvor aus zwei Fernrohrlagen arithmetisch gemittelt wurden. Beide Achsen weichen um den Winkel ε ab, den es im Rahmen der Kalibrierung zu bestimmen gilt. Der Teilkreisnullpunkt zeigt zunächst in eine beliebige Richtung, kann aber durch die Beobachtung des Laserlots als konkrete Horizontalrichtung quantifiziert und über den resultierenden Winkel δ mit der mittleren Laserlotachse in Verbindung gebracht werden. Die mittlere Lotachse ergibt sich dadurch, dass L_{m1}, \dots, L_{m5} auf einer gemeinsamen Geraden liegen, die auf durch eine lineare Regression der Beobachtungen parametrisiert werden kann. Der Bezug zu Y_{MWS} wird abschließend über den Kalibrierwinkel ε hergestellt.



Abb. 6.5: Modifiziertes Corner-Cube-Prisma auf Kreuzschlitten

Zur Ermittlung des Winkels ε wird die MSP zunächst streng horizontalisiert (Abbildung 6.2). Durch Messung der PB des RACER II mit dem Lasertracker kann Y_{MWS} hochgenau im LTS definiert werden. Anschließend wird ein Fernziel in Richtung der Laserlotachse in Fernrohrlage 1 angezielt. Um die Position des Laserspots mit dem Lasertracker erfassen zu können, wurde ein modifizierter 1,5“ CCR verwendet, dessen Zentrum der Zielebene mit dem Kugelzentrum zusammenfällt (Abbildung 6.5). Der CCR befindet sich in einem Corner-Cube-Nest, das über einen Kreuzschlitten mit einem Stativ verbunden ist. Die Zentrierung des Laserspots erfolgt durch Verschieben des Stativs und mit Hilfe des Kreuzschlittens. Anschließend wird der modifizierte CCR durch einen konventionellen 1,5“ CCR ausgetauscht, welcher vom Lasertracker gemessen werden kann. Auf diese Weise können diverse Messungen des Laserspots in verschiedenen Abständen zum RACER II durchgeführt werden, jeweils in beiden Fernrohrlagen (Abbildung 6.4, L_{m1} bis L_{m5}). Die Berechnung des Kalibrierwinkels ε erfolgt durch lineare Regression aller Beobachtungen in der X-Y-Ebene des MWS.

6.2 Lasertriangulationssensoren

6.2.1 Kalibriervorrichtung

Zur Ermittlung der relativen Orientierung der vier Lasertriangulationssensoren ist eine spezielle Kalibriervorrichtung erforderlich (Abbildung 6.6), da die 6-DoF-Parameter der einzelnen Senso-

ren nicht direkt signalisiert und gemessen werden können. Die Vorrichtung muss während des gesamten Kalibriervorgangs äußerst stabil sein und darf sich in ihrer Position und Ausrichtung nicht verändern. Um die Stabilität während des Kalibriervorgangs nachweisen zu können, werden die PB, die sich auf dem Rahmen der Kalibriervorrichtung befinden (Abbildung 6.8), mehrfach gemessen. Dabei wird unterstellt, dass sich die Referenzkörper in Relation zum Rahmen der Kalibriervorrichtung nicht verändern beziehungsweise deren Montage auf dem Rahmen während der Kalibrierung stabil ist.

Auf der Rahmenkonstruktion der Kalibriervorrichtung befinden sich insgesamt vier Referenzkörper mit jeweils fünf Referenzebenen. Jeder Referenzkörper ist einem Lasertriangulations-sensor zugeordnet. Der Anordnung der Lasertriangulationssensoren auf der MSP (Kapitel 3.4.2) tragen zwei unterschiedliche Varianten der Referenzkörper Rechnung (Abbildung 6.7). Beide Varianten basieren auf den Referenzebenen 1, 2 und 3. Diese Ebenen können simultan mit einer Profilmessung erfasst werden. Die Referenzebenen 4 und 5 können durch Verschiebung des RACER II relativ zur Kalibriervorrichtung gemessen werden. Die einzelnen Referenzebenen bestehen aus massiven, etwa 7,5 mm starken Aluminiumplatten, die fest miteinander verschraubt sind. Sie wurden mit einer matten Farbschicht überzogen, um die Reflexionseigenschaften des Laserstrahls zu verbessern.



Abb. 6.6: Kalibriervorrichtung des RACER II auf stabilem Metalltisch

Die unterschiedliche Orientierung der Referenzebenen zum Laserstrahl des Lasertriangulations-sensors stellen gleichfalls eine Sensitivität der Referenzebenen hinsichtlich der zu bestimmenden Transformationsparameter dar (Tabelle 6.2). Eine hohe Sensitivität zeichnet sich dadurch aus, dass der Betrag einer Parameteränderung dem Betrag des Widerspruchs aus dem funktionalen Zusammenhang des Ausgleichsmodells in hohem Maße entspricht. So sind beispielsweise

die Referenzebenen 1, 2 und 3 nicht sensitiv gegenüber der Bestimmung der Translation in Y-Richtung des lokalen Koordinatensystem des Lasertriangulationssensors, da sich der illuminierte Bereich bei einer entsprechenden Verschiebung des Sensors lediglich parallel zu den genannten Referenzebenen bewegt. Dagegen sind die gleichen Ebenen sensitiv hinsichtlich der beiden anderen Translationsparameter in X- und Z-Richtung, da die illuminierten Bereiche bei einer entsprechenden Verschiebung des Sensors außerhalb der Referenzebenen fallen würden.

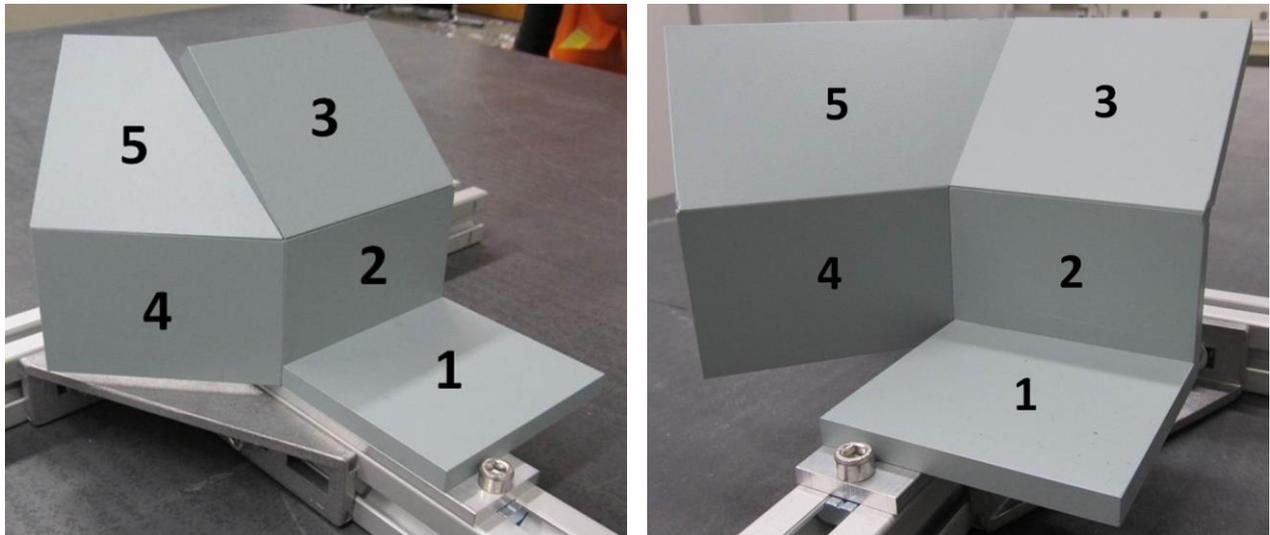


Abb. 6.7: Referenzkörper mit jeweils fünf Referenzebenen in zwei unterschiedlichen Varianten

In Tabelle 6.2 werden die einzelnen Sensitivitäten hinsichtlich der zu bestimmenden Transformationsparameter zusammenfassend dargestellt. Die Tabelle zeigt, dass die Ebenen 1, 2 und 3 allein nicht ausreichen, um alle sechs Transformationsparameter bestimmen zu können. Die Ebenen weisen keine Sensitivität gegenüber der Translation in Y-Richtung $t_{Y,PLS-MWS}$ und den Rotationen $\Phi_{\omega,PLS-MWS}$ und $\Phi_{\kappa,PLS-MWS}$ auf. Durch eine Erweiterung des Referenzkörpers um die Ebenen 4 und 5 können die fehlenden Parameter bestimmt werden. Eine simultane Messung aller fünf Referenzebenen ist jedoch nicht möglich. Die zusätzliche Messung der Referenzebenen 4 und 5 erfordert die Verschiebung der MSP relativ zur Kalibriervorrichtung. Der Bezug zwischen MWS und LTS ist bei beiden Aufstellungen getrennt herzustellen. Bei der Auswahl der Soll-Geometrie wurden bewusst Ebenen gewählt, weil diese einfach herzustellen und verhältnismäßig leicht im Ausgleichungsmodell modelliert werden können (Kapitel 6.2.4).

Parameter	Ref.Ebene 1	Ref.Ebene 2	Ref.Ebene 3	Ref.Ebene 4	Ref.Ebene 5
$t_{X,PLS-MWS}$	hoch sensitiv	sensitiv	hoch sensitiv	sensitiv	hoch sensitiv
$t_{Y,PLS-MWS}$	nicht sensitiv	nicht sensitiv	nicht sensitiv	sensitiv	sensitiv
$t_{Z,PLS-MWS}$	sensitiv	sensitiv	hoch sensitiv	sensitiv	hoch sensitiv
$\Phi_{\omega,PLS-MWS}$	nicht sensitiv	nicht sensitiv	nicht sensitiv	hoch sensitiv	sensitiv
$\Phi_{\phi,PLS-MWS}$	sensitiv	sensitiv	sensitiv	sensitiv	sensitiv
$\Phi_{\kappa,PLS-MWS}$	nicht sensitiv	nicht sensitiv	nicht sensitiv	sensitiv	hoch sensitiv

Tab. 6.2: Sensitivität der einzelnen Referenzebenen

6.2.2 Messdatenerfassung

Die Genauigkeitsanforderungen der Zielgrößen des RACER II liegen im Submillimeterbereich (Kapitel 3.4.1). Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die Kalibrierung der MSP. Vor diesem Hintergrund wurde für sämtliche Kalibrierungen der AT 901-LR der Firma Leica Geosystems in Kombination mit der TS50-B („T-Scan“) eingesetzt. Der AT 901-LR kann mittels Corner-Cube-Reflektor dreidimensionale Koordinaten bestimmen. Laut Herstellerangaben [Leica 2013] beträgt die erweiterte Messunsicherheit $U_{xyz} = \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ (gesamtes Messvolumen), wobei $U = 2 \cdot u$ (Kapitel 5.4.2). Bei der Kalibrierung sind die Entfernungen zu den Messobjekten $< 5 \text{ m}$, das entspricht konkreten erweiterten Messunsicherheiten $U_{xyz} < \pm 0,05 \text{ mm}$. Mit dem CCR werden sämtliche PB der MSP gemessen und als 3D-Koordinaten gespeichert. Ergänzend dazu können mit der T-Scan Punktwolken erfasst werden, welche eine flächenhafte Aufnahme der Referenzebenen ermöglicht. [Leica 2013] gibt die erweiterte Messunsicherheit für T-Scan-Messungen mit $U_{xyz} = \pm 80 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$ (erweiterte Messunsicherheiten von Planflächen) an. Das entspricht unter den zuvor genannten Laborbedingungen $U_{xyz} < \pm 0,1 \text{ mm}$.

Die Abbildung 6.8 zeigt den schematischen Messaufbau und die Positionierung des Lasertrackers. Steht der Lasertracker in Verlängerung der Mittelachse der Kalibriervorrichtung, so können aus dieser Achse heraus sowohl die benötigten PB der Kalibriervorrichtung, als auch sämtliche PB des im Nachgang aufgesetzten RACER II mittels CCR gemessen werden. Ferner ist darauf zu achten, dass T-Scan-Messungen gegenüber dem Lasertracker einen Mindestabstand von 2 m erfordern.

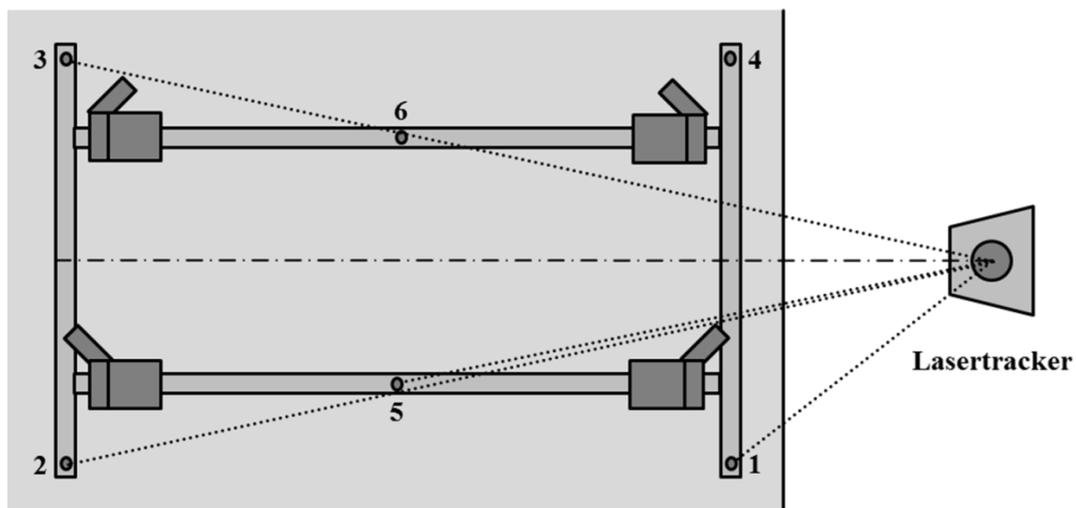


Abb. 6.8: Schematischer Messaufbau einer Kalibrierung von Lasertriangulationssensoren

Bevor die MSP des RACER II über der Kalibriervorrichtung in Position gebracht werden kann, muss sie vorab modifiziert werden. Abbildung 6.9 zeigt, welche Teile entfernt, beziehungsweise hinzugefügt werden müssen. Die Bereiche A und C stellen Baugruppen dar, die vor dem Kalibriervorgang entfernt werden müssen. Dies umfasst die Laufräder, die Schutzblenden und die Führungsrollen. Die Demontage dieser Bauteile ist notwendig, da sie andernfalls an die Referenzkörper der Kalibriervorrichtung stoßen würden. Um realitätsnahe Ergebnisse erzielen zu können, müssen sich die einzelnen Referenzebenen möglichst im Bereich der Objektoberfläche

befinden, die später im Messeinsatz gemessen werden soll (Schieneoberfläche). Stellvertretend für die Laufräder werden die Stützen der Baugruppe B montiert, und zwar direkt an der Rahmenkonstruktion des RACER II in der Nähe der ursprünglichen Radaufhängungen. Die drei Stützen ersetzen damit die Dreipunktauflage der Laufräder und positionieren die MSP im bestmöglichen Abstand zu den Referenzkörpern.



Abb. 6.9: Notwendige Modifikationen für die Kalibrierung von Lasertriangulationssensoren

Die durch die montierten Stützen erzeugte Dreipunktauflage ist genauso empfindlich gegenüber Gewichtsverlagerungen der MSP wie die originäre Dreipunktauflage mittels der Laufräder. Demzufolge müssen bei der Kalibrierung die gleichen Gewichtsverhältnisse rekonstruiert werden wie bei einer realen Messung. Es ist beispielsweise darauf zu achten, dass die 48V-Batterie eingesetzt wird, selbst wenn die Stromversorgung über Netzbetrieb stattfindet.

Das Tachymeter kann während des Kalibriervorgangs nicht montiert werden, da der Fußpunkt der Dreifußauflage mitbestimmt wird. Um eine möglichst ähnliche Gewichtsverteilung zu simulieren, können Gewichte verwendet werden, die nahe an der realen Position des Tachymeters platziert werden. Ein Präzisionstachymeter der Firma Leica wiegt etwa 7 kg. Die Abbildung 6.10 zeigt die symmetrische Verteilung von Ersatzgewichten in Nähe des Dreifußes mit beidseitig 3,5 kg. Das Tachymeter wird durch eine spezielle Adapterscheibe ersetzt, in deren Zentrum ein CCR positioniert werden kann. Der so gewonnene Punkt repräsentiert den Lotfußpunkt des Tachymeters bezogen auf die Dreifußauflage und wird im Folgenden auch als PB 91 bezeichnet. Der Höhenunterschied zwischen CCR-Zentrum und Dreifußauflage ist durch eine gesonderte Kalibrierung bekannt.

Ein Kalibriervorgang läuft nach dem in Tabelle 6.3 dargestellten Messschema ab. Nach Herstellung der Messbereitschaft des Lasertrackers und Modifikation des RACER II werden zunächst die PB der Kalibriervorrichtung gemessen. Die Messergebnisse werden in der Textdatei „Rahmen1.txt“ gespeichert. Nachdem sämtliche Referenzebenen mit der T-Scan flächenhaft erfasst wurden, erfolgt eine erneute Messung der PB der Kalibriervorrichtung. Der Koordinatenver-

gleich beider Messepochen lässt frühzeitig erkennen, ob während der T-Scan-Messungen eine Verschiebung der Kalibriervorrichtung aufgetreten ist. Nach Abschluss des Kalibriervorgangs erfolgt eine dritte Messung der PB als weiterer Stabilitätsnachweis.



Abb. 6.10: Ersatzgewichte für das Tachymeter und CCR-Adapterscheibe mit aufgesetztem CCR

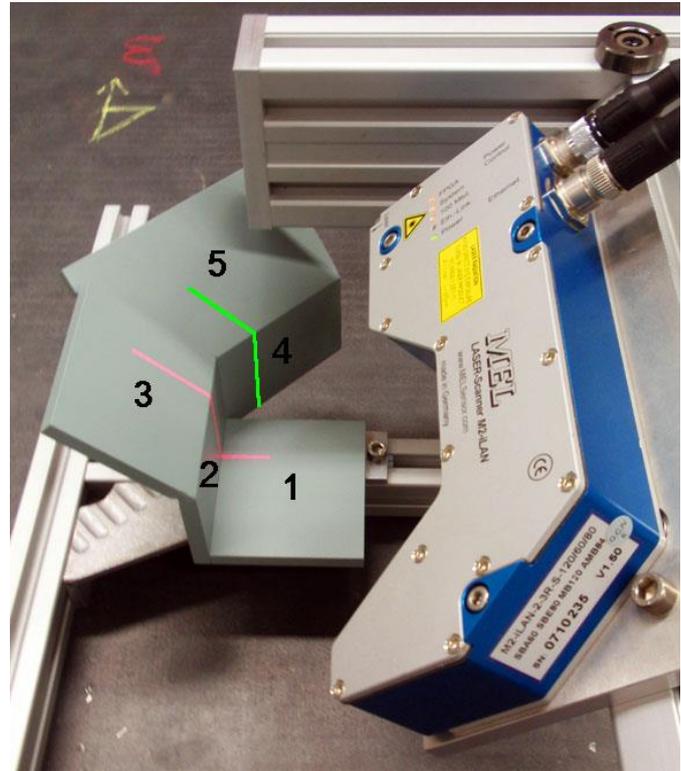


Abb. 6.11: Messbereich der Referenzebenen in Messposition 1 (rot) und Messposition 2 (grün)

Nachdem die Soll-Geometrien der Referenzkörper im LTS erfasst wurden, kann die modifizierte MSP über der Kalibriervorrichtung positioniert werden. Die Lasertriangulationssensoren erfassen die einzelnen Referenzebenen in zwei Positionen (Abbildung 6.11), wobei jeweils die Referenzebenen 1, 2 und 3 in Messposition 1 und die Referenzebenen 4 und 5 in Messposition 2 gemessen werden. Um Position und Orientierung des MWS im übergeordneten LTS bestimmen zu können, werden die vier PB der MSP, sowie PB 91 in beiden Messpositionen gemessen. Zur Wahrung der Gewichtsverhältnisse muss bei der Bestimmung der PB 12 und 13 ein Gegengewicht (GG) in die jeweils gegenüberliegende PB gesetzt werden, da es andernfalls aufgrund der einachsigen Radaufhängung zu einer Längsneigung der MSP kommen kann. Als GG wird beispielsweise ein zweiter CCR verwendet.

Die Bestimmung des MWS erfolgt zunächst ohne Berücksichtigung des Längenausdehnungskoeffizienten der MSP (Kapitel 6.3), der wiederum von der Materialtemperatur des RACER II abhängt (Kapitel 3.4.3.4). Innerhalb der RACER II-Software wird der Längenausdehnungskoeffizienten entsprechend berücksichtigt. Da der Kalibriervorgang im Regelfall unter anderen Temperaturverhältnissen stattfindet, muss die tatsächliche Materialtemperatur durch einen Eintrag in der Kalibrierdatei berücksichtigt werden.

Schritt	Tätigkeit	Ergebnis / Ziel
1	<ul style="list-style-type: none"> - Kalibriervorrichtung positionieren und fixieren - Lasertracker positionieren und Messbereitschaft herstellen - RACER II für Kalibriervorgang modifizieren 	<i>(Messbereitschaft herstellen)</i>
2	Messung der Kalibriervorrichtung-PB 1 - 3, 5 (CCR)	Rahmen1.txt
3	Messung sämtlicher Referenzebenen (T-Scan)	Ebenen.txt
4	Messung der Kalibriervorrichtung-PB 1 - 3, 5 (CCR)	Rahmen2.txt
5	RACER II in Messposition 1 bringen	-
6	Messung der RACER-PB 11 - 14, 91 (CCR, GG bei PB 12, 13)	Racer1.txt
7	Auslösen der Profilmessungen + Handaufschrieb Materialtemperatur	Profile1.txt
8	RACER II in Messposition 2 bringen	-
9	Messung der RACER-PB 11 - 14, 91 (CCR + GG bei PB 12, 13)	Racer2.txt
10	Auslösen der Profilmessungen + Handaufschrieb Materialtemperatur	Profile2.txt
11	Messung der Kalibrierrahmen-PB 1 - 3, 5 (CCR)	Rahmen3.txt

Tab. 6.3: Messablauf einer Kalibrierung von Lasertriangulationssensoren

6.2.3 Aufbereitung der Messdaten

Die Abbildung 6.12 zeigt den schematischen Verlauf zur Aufbereitung der Messdaten eines Kalibriervorgangs. Die in unterschiedlichen Textdateien gespeicherten Messdaten sind nur teilweise für die Bestimmung der Kalibrierparameter der Lasertriangulationssensoren relevant, so dass eine umfangreiche Datenfilterung notwendig ist, um die relevanten Messpunkte vorab zu isolieren. Dieser Prozess soll möglichst automatisiert ablaufen. Um die Anzahl von Unwägbarkeiten gering zu halten, wurde ein stringentes Ablaufschema entwickelt (Tabelle 6.3). Die Kalibrierungs-Software ist damit in der Lage, sämtliche Filterungen, Korrekturen und die Berechnung der Kalibrierparameter vollständig automatisiert durchzuführen. Die Implementierung der Kalibrierungs-Software wurde skriptbasiert mit der Entwicklungsumgebung MatLab R2010a durchgeführt. Die wesentlichen Schritte der Messdatenaufbereitung sind:

- Definition des MWS
- Ebenenselektion und Berechnung der Ebenenparameter
- Profিলselektion

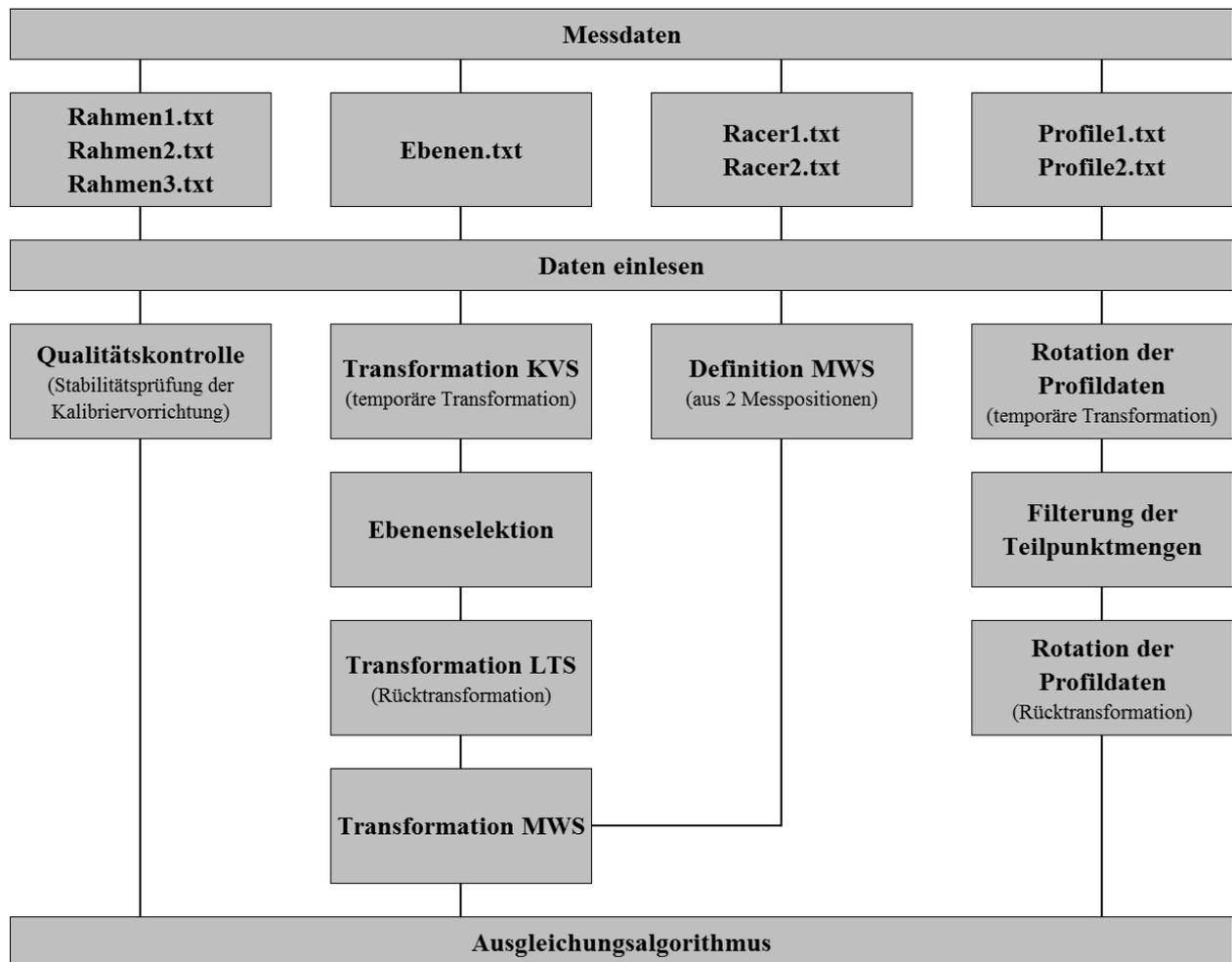


Abb. 6.12: Ablaufschema zur Messdatenaufbereitung

Definition des MWS:

Das MWS stellt das zentrale Koordinatensystem dar, auf das sich alle Sensoren der MSP beziehen. Alle übrigen Koordinatensysteme werden vorab in das MWS transformiert. Damit vereinfacht sich der zentrale Transformationsansatz (5.11) ff. zu dem konkreten Ansatz, der in Kapitel 6.2.4 vorgestellt ist.

Das MWS wird bei jeder Kalibrierung aus den aktuellen Messdaten der PB der MSP neu definiert. Dabei reichen bereits drei PB aus: 11, 12 und 13 (Abbildung 6.13). Das MWS ist als kartesisches Koordinatensystem mit seinem Ursprung in PB 12 gelagert, genauer im Reflexionszentrum des eingesetzten CCR. Der Koordinatenursprung erhält die Koordinaten $12 = \{1000, 1000, 1000\}$ [mm], um negative Vorzeichen zu vermeiden. Die positive X-Achse verläuft durch das Reflexionszentrum des eingesetzten CCR in PB 11. Damit erhält PB 11 die Koordinaten $\{1000, 1000 + s_{11-12}, 1000\}$ [mm], wobei s_{11-12} die Raumstrecke aus den LTS-Koordinaten der PB 11 und 12 ist. Für die Definition der Y-Achse wird das Reflexionszentrum des eingesetzten CCR in PB 13 genutzt. Die mathematisch exakte Y-Achse verläuft nicht direkt durch PB 13, sondern durch den Lotfußpunkt von 13 innerhalb der Y-Z-Ebene mit orthogonalem Abstand d entsprechend (6.1). Demnach erhält 13 die Koordinaten $\{1000 + d, 1000 + s, 1000\}$ [mm], wobei s mit (6.2) aus der Raumstrecke s_{12-13} und d berechnet werden kann.

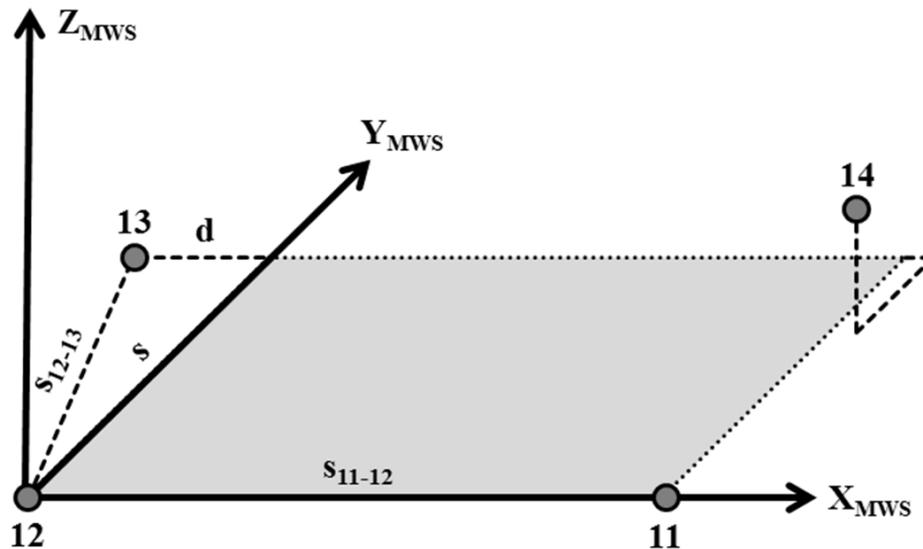


Abb. 6.13: Definition des Messwagensystems (MWS)

$$\mathbf{n}_0 = \frac{(\mathbf{X}_{11} \quad \mathbf{Y}_{11} \quad \mathbf{Z}_{11})^T - (\mathbf{X}_{12} \quad \mathbf{Y}_{12} \quad \mathbf{Z}_{12})^T}{\sqrt{(\mathbf{X}_{11} - \mathbf{X}_{12})^2 + (\mathbf{Y}_{11} - \mathbf{Y}_{12})^2 + (\mathbf{Z}_{11} - \mathbf{Z}_{12})^2}} \quad (6.1)$$

$$\mathbf{d} = \left((\mathbf{X}_{13} \quad \mathbf{Y}_{13} \quad \mathbf{Z}_{13})^T \cdot \mathbf{n}_0 \right) - \left((\mathbf{X}_{12} \quad \mathbf{Y}_{12} \quad \mathbf{Z}_{12})^T \cdot \mathbf{n}_0 \right)$$

$$s = \sqrt{(s')^2 - d^2} \quad \text{mit:} \quad s' = \sqrt{(\mathbf{X}_{12} - \mathbf{X}_{13})^2 + (\mathbf{Y}_{12} - \mathbf{Y}_{13})^2 + (\mathbf{Z}_{12} - \mathbf{Z}_{13})^2} \quad (6.2)$$

Mit Hilfe von (6.1) und (6.2) kann das MWS über drei PB eindeutig definiert werden. Die Einbindung der PB 14 und 91 erfolgt über eine 3D-Helmert-Transformation. Beim Kalibriervorgang werden die PB der MSP in zwei Messpositionen gemessen (Kapitel 6.2.2). Daher wird das MWS aus beiden Datensätzen separat berechnet und die Koordinaten beider Systeme arithmetisch gemittelt. Die Koordinaten der fünf PB 11, 12, 13, 14 und 91 im MWS werden abschließend in der Kalibrierdatei gespeichert.

Ebenenselektion und Berechnung der Ebenenparameter:

Der allgemeine Auswerteanatz beruht auf der Restriktion, dass die Abstände d_{kj} zwischen den Referenzgeometrien RFG, j und den transformierten Koordinaten $\mathbf{x}_{\text{RFG},kj}$ Null sein müssen (Kapitel 5.2, (5.12)). Für die Kalibrierung des RACER II werden Ebenen als Referenzgeometrie verwendet. Die Ebenenparameter $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$ werden aus den Messpunkten der T-Scan über eine Ebenenausgleichung gewonnen. Details zur Bestimmung einer Regressionsebene können beispielsweise in [Niemeier 2008] nachgeschlagen werden.

Der nächste Schritt stellt die Aufteilung der Punktwolke in die einzelnen Referenzebenen dar (Flächenselektion). Im KVS können konstante Näherungswerte für die einzelnen Selektionsbereiche definiert werden, welche unabhängig von Position und Orientierung der Kalibriervorrichtung im LTS zum Zeitpunkt der Messung sind. Die Festlegungen der Koordinaten des KVS sind

in Tabelle 6.4 aufgeführt. Da das KVS lediglich zur Selektion der Referenzebenen aus einer Punktwolke dient, reicht für die festgelegten Koordinaten eine Genauigkeit von 10 mm aus.

Punktnummer	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	2680	1000	1000
2	1000	1000	1000
3	1000	1900	1000
4	2680	1900	1000

Tab. 6.4: Definition des Kalibriervorrichtungskoordinatensystem (KVS)

Die Koordinatentransformation der Punktwolke vom LTS ins KVS erfolgt über eine 3D-Helmert-Transformation, deren Ergebnis ein Parametervektor mit drei Translationen $t_{X,LTS-KVS}$, $t_{Y,LTS-KVS}$ und $t_{Z,LTS-KVS}$ sowie den drei Rotationen $\Phi_{\omega,LTS-KVS}$, $\Phi_{\phi,LTS-KVS}$ und $\Phi_{\kappa,LTS-KVS}$ darstellt. Mit dem Parametervektor kann die Punktwolke vom LTS gemäß (5.3) in das KVS überführt werden.

Der Selektionsalgorithmus durchläuft die gesamte Punktwolke und überprüft jeden Messpunkt $\mathbf{x}_{KVS,p}$, ob er innerhalb eines Selektionsbereichs liegt. Ist dies der Fall, wird $\mathbf{x}_{KVS,p}$ der Punktmenge \mathbf{x}_{KVS,v_j} hinzugefügt. Die gewählte Notation verhält sich analog zu den selektierten Beobachtungen \mathbf{x}_{MSS,k_j} des Lasertriangulationssensors (5.7). Die Selektionsbereiche wurden auf einfache Weise implementiert. Sie stellen Kugeln dar und bestehen lediglich aus einem Kugelmittelpunkt (X_m, Y_m, Z_m) und dem Radius R_m . Damit vereinfacht sich das Prüfkriterium (Radialabfrage), ob sich ein Messpunkt $P(X_P, Y_P, Z_P)$ innerhalb des Selektionsbereichs S_j befindet wie folgt:

$$\mathbf{x}_{KVS,v_j} \in S_j, \text{ wenn } \sqrt{\left(x_{X,KVS,v_j} - X_m\right)^2 + \left(x_{Y,KVS,v_j} - Y_m\right)^2 + \left(x_{Z,KVS,v_j} - Z_m\right)^2} \leq R_m \quad (6.3)$$

Mit dieser Technik kann auf einfache Weise eine ausreichende Anzahl repräsentativer Punkte für die einzelnen Referenzflächen gewonnen werden. Dieses Verfahren erleichtert zudem im Falle einer Modifikation der Kalibriervorrichtung die Definition neuer Näherungskoordinaten. Bei schmalen Referenzebenen (2 und 4, vgl. Abbildung 6.11) ist es sinnvoll, zwei Selektionsbereiche pro Referenzebene zu bilden. In Summe ergeben sich damit 4 (Referenzkörper) \times 7 (Selektionsbereiche) \times 4 (Selektionsparameter pro Selektionsbereich) = 112 Selektionsparameter, die einmalig manuell bestimmt und implementiert werden müssen.

Die Abbildung 6.14 zeigt die Ergebnisse einer Flächenselektion über die zuvor beschriebene Radialabfrage (rote Darstellung). Alternativ wäre beispielsweise eine Selektion über Polygone denkbar (grüne Darstellung). Dies hätte den Vorteil, dass auch die Randbereiche der Referenzebenen erfasst werden. Eine optimale Regressionsebene wird nicht allein durch die Menge der Stützpunkte bestimmt, sondern vor allem durch deren gleichmäßige Verteilung innerhalb der Ebene. Nachteilig ist jedoch, dass pro Polygon mindestens vier Polygonpunkte definiert werden müssen. Das ergäbe insgesamt 4 (Referenzkörper) \times 5 (Selektionsbereiche) \times 13 (Selektionspa-

parameter pro Selektionsbereich) = 260 Selektionsparameter, die alle im Fall einer Veränderung der Kalibriervorrichtung angepasst werden müssen.

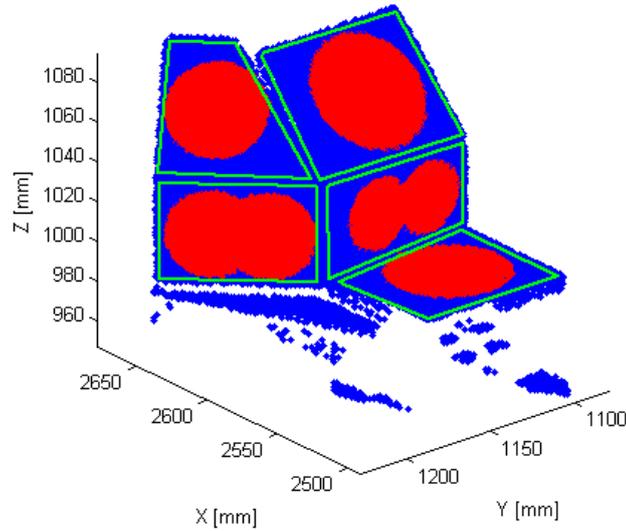


Abb. 6.14: Flächenselektion über Radialabfrage (rot) oder Polygonabfrage (grün)

Um die Ebenenparameter der einzelnen Referenzebenen bestimmen zu können, müssen die selektierten Koordinaten im MWS vorliegen. Während der Entwicklungsphase wurden zusätzliche Transformationen implementiert, um Zwischenergebnisse auszuwerten. Daher erfolgt zunächst die Rücktransformation der selektierten Koordinaten $\mathbf{x}_{\text{KVS},v_j}$ vom KVS in das LTS:

$$\begin{pmatrix} X_{\text{X,LTS},v_j} \\ X_{\text{Y,LTS},v_j} \\ X_{\text{Z,LTS},v_j} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_X \left(\Phi_{\omega,\text{LTS-KVS}}, \Phi_{\varphi,\text{LTS-KVS}}, \Phi_{\kappa,\text{LTS-KVS}} \right)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X_{\text{X,KVS},v_j} \\ X_{\text{Y,KVS},v_j} \\ X_{\text{Z,KVS},v_j} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} t_{\text{X,LTS-KVS}} \\ t_{\text{Y,LTS-KVS}} \\ t_{\text{Z,LTS-KVS}} \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

mit anschließender Transformation vom LTS in das MWS (vgl. (5.3)).

Profilselektion:

Die Messdaten der Lasertriangulationssensoren enthalten die erfassten Profildaten aller vier Sensoren des RACER II. Jedes Profil besteht aus exakt 290 Messpunkten innerhalb einer Ebene (X, Z) zuzüglich Intensitätswerte. Jeder Lasertriangulationssensor bildet sein individuelles, lokales Koordinatensystem PLS. Bei der Transformation der 2D-Koordinaten des PLS in den 3D-Raum des MWS werden die Koordinaten der Y-Achse mit Nullwerten belegt.

Analog zur Flächenselektion müssen die Profildaten in Teilmengen zerlegt werden, die den einzelnen Referenzebenen zugeordnet werden. Im Gegensatz zur Aufteilung der T-Scan-Punktwolke wird bei der Profilselektion ein anderes Verfahren angewendet, bei dem die Profildaten $\mathbf{x}_{\text{X,PLS},i}$ im PLS an der Y-Achse um Näherungswinkel $\Phi_{\varphi,\text{PLS-PLSS}}$ rotiert und anschließend über Nachbarschaftsbeziehungen selektiert werden. Grundsätzlich sind alle vier PLS gleich ausgerich-

tet, doch die Montage der Lasertriangulationssensoren auf der MSP verhindert einen universal gültigen Selektionsansatz für alle vier Sensoren.

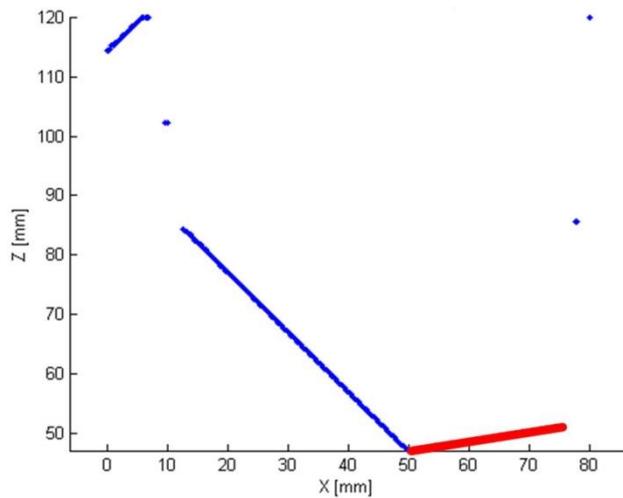


Abb. 6.15: Profildatensatz im originären PLS

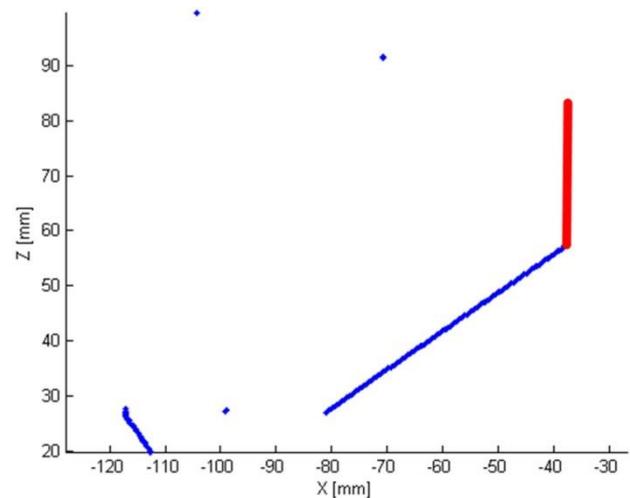


Abb. 6.16: rotierter Profildatensatz

Abbildung 6.15 zeigt beispielhaft einen gemittelten Profildatensatz im originären PLS. Die arithmetische Mittelung der einzelnen Profilpunkte erfolgt im Vorfeld direkt nach der Messdatenerfassung. Im Beispiel befinden sich die relevanten Punktbereiche jenseits des Knickpunkts bei $X = 50$ mm und $Z = 48$ mm, wobei der linke Punktbereich zur Referenzebene 4 und der rechte Referenzebene 5 angehört (vgl. Abbildung 6.11).

Der offensichtliche Selektionsansatz wäre eine Abfrage aller Profilpunkte hinsichtlich ihres X -Werts mit dem Schwellwert $X = 50$ mm. Dieser Ansatz hat aber den Nachteil, dass der Schwellwert $X = 50$ mm von der Entfernung des Profilsensors zum Testkörper abhängt. Verändert sich diese Distanz (zum Beispiel bei Wiederholung der Kalibrierung mit leicht veränderter Positionierung der MSP relativ zur Kalibriervorrichtung), werden unbeabsichtigt Teilmengen der Profilpunkte falsch zugewiesen.

Die Vorgehensweise ist demnach anfällig gegen Translationen. Zudem würden bei einer rein vertikalen Aufteilung der Punktwolke bei $X = 50$ mm Ausreißer mit selektiert (einzelne Punkte oberhalb des relevanten Winkels, Abbildung 6.15). Eine zusätzliche Abfrage über horizontale Schwellwerte kann jedoch nur grobe Ausreißer identifizieren. Zudem besteht auch hier die Anfälligkeit gegenüber Translationen.

Es hat sich ein Ansatz bewährt, bei dem geprüft wird, inwiefern sich die Abstände benachbarter Punkte hinsichtlich ihrer Koordinatendifferenzen ΔX und ΔZ ändern. Diese Änderung kann besonders signifikant bei Punktabschnitten detektiert werden, die parallel zu den Koordinatenachsen verlaufen. Bei horizontalen Punktabschnitten gehen die einzelnen ΔZ benachbarter Profilpunkte gegen Null (es verbleiben lediglich Abweichungen innerhalb der Messunsicherheit des Sensors), während die einzelnen ΔX einen signifikanten und nahezu konstanten Wert annehmen (Betrag der Messauflösung, d.h. Abstand der Einzelpunktmessungen). Vor diesem Hintergrund werden die Profildaten um die Y -Achse des PLS rotiert, so dass die zu selektierenden Abschnitte zu einer der beiden Koordinatenachsen möglichst parallel verlaufen. Abbildung 6.16 zeigt bei-

spielhaft die Drehung der Profildaten aus Abbildung 6.15 um $\Phi_{\phi, \text{PLS-PLSS}} = 80^\circ$, so dass der zu selektierende Punktbereich (rote Darstellung) näherungsweise parallel zur Z-Achse verläuft. Die Rotation erfolgt über die Transformationsvorschrift:

$$\begin{pmatrix} X_{X, \text{PLSS}, i} \\ X_{X, \text{PLSS}, i} \\ X_{X, \text{PLSS}, i} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_Y(\Phi_{\phi, \text{PLS-PLSS}}) \cdot \begin{pmatrix} X_{X, \text{PLS}, i} \\ X_{Y, \text{PLS}, i} \\ X_{Y, \text{PLS}, i} \end{pmatrix}, \quad (6.5)$$

wobei PLSS für das temporäre Selektionssystem steht. Der zweite Schritt ist die Bildung der Koordinatendifferenzen aller Profilpunkte hinsichtlich ΔX . Selektiert werden alle Punkte, deren zugehörige Koordinatendifferenzen $\Delta X < 0,1$ mm, also nahe Null sind. Der Schwellwert 0,1 mm ergibt sich aus praktischen Untersuchungen, bei denen die Streubereiche im Mittel unterhalb von 0,075 mm lagen. Die selektierte Punktmenge kann immer noch Ausreißer beinhalten. Aufgrund der reinen Differenzbetrachtung werden so beispielsweise parallel verlaufende Punktab-schnitte mit selektiert.

Um dies zu verhindern, wird die vorselektierte Punktmenge erneut untersucht. Dabei wird unterstellt, dass die Mehrheit der vorselektierten Punkte bereits eine Teilmenge der gesuchten Punkte bildet. Über den Median der X-Werte kann ein Filterband erzeugt werden, in dem sich die relevanten Messpunkte befinden müssen. Die Ausreißerfilterung funktioniert, solange nicht mehr Ausreißer als gesuchte Messwerte vorhanden sind (robuste Schätzung bis 50 % aller Selektionspunkte). Als Filterbandbreite hat sich ein Wert von $\pm 0,5$ mm bewährt.

Abschließend müssen die selektierten Profilpunkte $\mathbf{x}_{\text{PLSS}, k_j}$ vom PLSS zurück in das ursprüngliche PLS transformiert werden:

$$\begin{pmatrix} X_{X, \text{PLS}, k_j} \\ X_{X, \text{PLS}, k_j} \\ X_{X, \text{PLS}, k_j} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_Y(\Phi_{\phi, \text{PLS-PLSS}})^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X_{X, \text{PLSS}, k_j} \\ X_{X, \text{PLSS}, k_j} \\ X_{X, \text{PLSS}, k_j} \end{pmatrix}. \quad (6.6)$$

Aufgrund der unterschiedlichen Anordnung der Lasertriangulationssensoren und Referenzebenen entsteht eine Vielfalt von Selektionsparametern für die genäherten Rotationswinkel $\Phi_{\phi, \text{PLS-PLSS}}$. Insgesamt sind 4 (Lasertriangulationssensoren) \times 5 (Referenzebenen) = 20 Kombinationen von Selektionsparametern (Rotationswinkel $\Phi_{\phi, \text{PLS-PLSS}}$ zuzüglich Selektionsrichtung in ΔX oder ΔZ) notwendig. Die Selektionsparameter sind fest innerhalb der Auswertesoftware implementiert und müssen nur angepasst werden, sofern die Anordnung oder Ausrichtung der Referenzebenen auf der Kalibriervorrichtung geändert wird.

6.2.4 Implementierung des Ausgleichsalgorithmus

Beim RACER II wird der zentrale Ausgleichsalgorithmus für jeden Lasertriangulations-sensor separat durchgeführt. Insgesamt laufen bei der Kalibrierungs-Software vier Ausgleichun-

gen nacheinander ab. Die Minimierungsaufgabe wurde bereits in Kapitel 5.2 vorgestellt. Sie besteht darin, den Abstand eines gemessenen Profilpunkts zur korrespondierenden Referenzebene zu minimieren (vgl. (5.12)). Entgegen dem allgemeinen Ansatz (5.11) wird bei der Kalibrierungs-Software des RACER II vorausgesetzt, dass die Beobachtungen und die Parameter der Referenzebene bereits im MWS vorliegen. Entsprechende Transformationen im Vorfeld der Datenverarbeitung gewährleisten diese Bedingung.

In Ergänzung zu den Kapiteln 5.2 ff. ist der funktionale Zusammenhang des GHM (vgl. (5.12)) detaillierter zu betrachten, wobei die Flächenparameter $\mathbf{a}_{\text{RFG},j}$ und die Transformationsparameter $\mathbf{t}_{\text{MSS-RFG}}$ und $\Phi_{\text{MSS-RFG}}$ als bekannte Werte in die Ausgleichung eingehen. Die entsprechenden Parameter wurden vorab ermittelt und als Konstanten eingeführt, da die Messunsicherheit des Referenzmesssystems deutlich geringer ist als die Genauigkeitsanforderungen an die 6-DoF-Parameter der Lasertriangulationssensoren des RACER II. Der funktionale Zusammenhang ergibt sich zu:

$$\mathbf{E}_j: \mathbf{a}_{1,\text{MWS},j} \cdot \mathbf{x}_{\text{X,MWS},k_j} + \mathbf{a}_{2,\text{MWS},j} \cdot \mathbf{x}_{\text{Y,MWS},k_j} + \mathbf{a}_{3,\text{MWS},j} \cdot \mathbf{x}_{\text{Z,MWS},k_j} - \mathbf{a}_{4,\text{MWS},j} \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.7)$$

Die Transformation der originären, jedoch bereits selektierten Beobachtungen $\mathbf{x}_{\text{PLS},k_j}$ in $\mathbf{x}_{\text{MWS},k_j}$ erfordert die Erweiterung von (6.7) die Transformationsvorschrift nach (5.3):

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_{\text{X,MWS},k_j} \\ \mathbf{x}_{\text{Y,MWS},k_j} \\ \mathbf{x}_{\text{Z,MWS},k_j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_0 \\ \mathbf{Y}_0 \\ \mathbf{Z}_0 \end{pmatrix} + \mathbf{R}(\Omega, \Phi, \mathbf{K}) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{L_i} \\ \mathbf{Y}_{L_i} \\ \mathbf{Z}_{L_i} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden vereinfachte Notationen verwendet. Die Notationen gelten nur für die Kapitel 6.2.4 f. Eine Gegenüberstellung zu den bisherigen Notationen in Ergänzung mit Tabelle 6.1 ist in Tabelle 6.5 dargestellt.

	selektierte Beobachtungen	Flächenparameter	Translationen	Rotationen
bisherige Notation	$X_{\text{X,PLS},k_j}$ $X_{\text{Y,PLS},k_j}$ $X_{\text{Z,PLS},k_j}$	$n_{\text{X,RFG},j}$ $n_{\text{Y,RFG},j}$ $n_{\text{Z,RFG},j}$ $d_{\text{RFG},j}$	$t_{\text{X,PLS-MWS}}$ $t_{\text{Y,PLS-MWS}}$ $t_{\text{Z,PLS-MWS}}$	$\Phi_{\omega,\text{PLS-MWS}}$ $\Phi_{\phi,\text{PLS-MWS}}$ $\Phi_{\kappa,\text{PLS-MWS}}$
vereinfachte Notation	X_L, Y_L, Z_L	a_1, a_2, a_3, a_4	X_0, Y_0, Z_0	Ω, Φ, \mathbf{K}

Tab. 6.5: Gegenüberstellung der bisherigen und der vereinfachten Notation

Ausgehend von dieser Konvention kann Rotationsmatrix \mathbf{R} unter Beibehaltung der Drehreihenfolge in (5.3) aufgelöst werden:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos(\Phi)\cos(K) & \cos(\Phi)\sin(K) & -\sin(\Phi) \\ \sin(\Omega)\sin(\Phi)\cos(K) - \cos(\Omega)\sin(K) & \sin(\Omega)\sin(\Phi)\sin(K) + \cos(\Omega)\cos(K) & \sin(\Omega)\cos(\Phi) \\ \cos(\Omega)\sin(\Phi)\cos(K) + \sin(\Omega)\sin(K) & \cos(\Omega)\sin(\Phi)\sin(K) - \sin(\Omega)\cos(K) & \cos(\Omega)\cos(\Phi) \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

Das Einsetzen von (6.8) in (6.7) führt zu den einzelnen Bedingungsgleichungen, wobei jede Bedingungsgleichung $f(\mathbf{L}, \mathbf{X})$ einer Beobachtung (Profilpunkt aus \mathbf{L}) zugeordnet ist:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{L}, \mathbf{X}) &= a_1 \cdot (X_0 + X_L \cdot r_{11} + Y_L \cdot r_{12} + Z_L \cdot r_{13}) \\ &+ a_2 \cdot (Y_0 + X_L \cdot r_{21} + Y_L \cdot r_{22} + Z_L \cdot r_{23}) \\ &+ a_3 \cdot (Z_0 + X_L \cdot r_{31} + Y_L \cdot r_{32} + Z_L \cdot r_{33}) \\ &- a_4 = 0 \end{aligned} \quad (6.11)$$

Durch Einsetzen von (6.10) in (6.11) ergibt sich letztlich die vollständige Bedingungsgleichung:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{L}, \mathbf{X}) &= a_1 X_0 + a_1 X_L \cos(\Phi)\cos(K) + a_1 Y_L \cos(\Phi)\sin(K) - a_1 Z_L \sin(\Phi) \\ &+ a_2 Y_0 + a_2 X_L \sin(\Omega)\sin(\Phi)\cos(K) - \cos(\Omega)\sin(K) \\ &+ a_2 Y_L \sin(\Omega)\sin(\Phi)\sin(K) + \cos(\Omega)\cos(K) + a_2 Z_L \sin(\Omega)\cos(\Phi) \\ &+ a_3 Z_0 + a_3 X_L \cos(\Omega)\sin(\Phi)\cos(K) + \sin(\Omega)\sin(K) \\ &+ a_3 Y_L \cos(\Omega)\sin(\Phi)\sin(K) - \sin(\Omega)\cos(K) + a_3 Z_L \cos(\Omega)\cos(\Phi) \\ &- a_4 = 0 \end{aligned} \quad (6.12)$$

Die Lösung des GHM erfolgt über das Aufstellen der Normalgleichungen nach Kapitel 5.4.3. Für die Designmatrix \mathbf{A} müssen die partiellen Ableitungen von (6.12) nach den Parametern \mathbf{X} gebildet werden. Die entsprechenden Ergebnisse durch direktes Differenzieren sind in Anlage 6.1 aufgeführt. Anlage 6.2 enthält die äquivalenten Ergebnisse für die Bedingungsmatrix \mathbf{B} . Das direkte Differenzieren komplexer funktionaler Zusammenhänge ist sehr aufwändig. Alternativ können Programme zum automatischen Differenzieren genutzt werden. Für die verwendete Programmierumgebung MATLAB ist für nicht kommerzielle Zwecke Toolbox INTLAB [Rump 1999] erhältlich. Für C++ ist beispielsweise die Software FADBAD++ [Stauning 2003] verfügbar.

Im konkreten Anwendungsfall wird unterstellt, dass sämtliche Beobachtungen (Profilpunkte) mit gleicher Genauigkeit gemessen wurden. Die Parameter der Referenzebenen werden aufgrund der übergeordneten Genauigkeit des Lasertrackers als fehlerfrei angesehen. Unter diesen Annahmen kann das stochastische Modell dahingehend vereinfacht werden, dass die Matrix \mathbf{Q}_{LL} als Einheitsmatrix eingeführt wird.

Da es sich um einen iterativen Ausgleichsalgorithmus handelt, müssen die Ergebnisse der vorangehenden Iteration an die Nachfolgende übergeben werden. Da der Ausgleichsalgorithmus als while-Schleife konzipiert ist, wird ein Abbruchkriterium eingeführt werden. Das Abbruchkriterium ist erreicht, wenn sich die einzelnen Elemente des Lösungsvektors $\hat{\mathbf{x}}$ um weniger als 0,001 mm in den Translationen und weniger als 0,1 mgon hinsichtlich der Rotationen ändern. Die Zwischenergebnisse der Ausgleichung sowie die Endergebnisse der gesuchten Parameter werden in einer Protokolldatei dokumentiert.

6.2.5 Genauigkeitsabschätzung der 6-DoF-Parameter

Um die Ergebnisse der Ausgleichung besser beurteilen zu können, bietet die Implementierung verschiedene Grafiken zur visuellen Kontrolle an. Die Abbildung 6.17 zeigt die grafische Darstellung des Widerspruchsvektors. Der Widerspruchsvektor stellt die verbleibenden Residuen der ursprünglichen Beobachtungen im funktionalen Zusammenhang mit den ausgeglichenen 6-DoF-Parametern und stellt damit eine erste qualitative Aussage über die Konvergenz des Kalibriervorgangs dar. Die Abbildung zeigt das typische Ergebnis eines Kalibriervorgangs für einen der vier Lasertriangulationssensoren. Der Mittelwert der Residuen beträgt durchschnittlich 0,03 mm bei einer Standardabweichung von 0,05 mm.

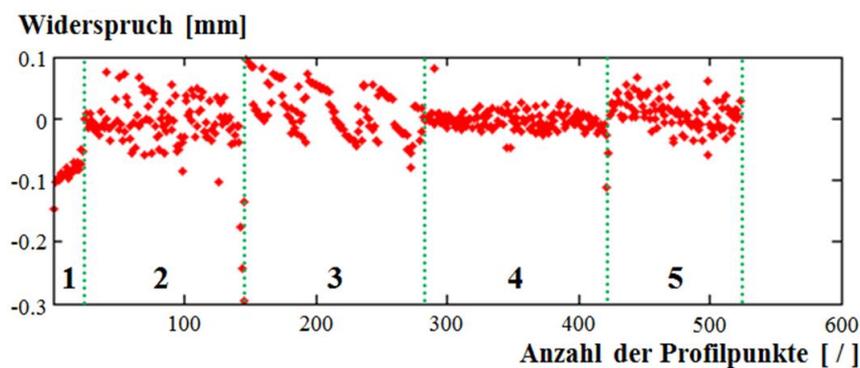


Abb. 6.17: Grafische Darstellung der Schlussproben

Ferner zeigt die Abbildung 6.17 die Zuordnung der einzelnen Residuen zu den fünf Referenzebenen eines Lasertriangulationssensors. Die Nummerierung entspricht der Darstellung in Abbildung 6.11. Aufgrund der beiden Messpositionen zum Erfassen aller fünf Referenzebenen können maximal 2×300 Profilpunkte ausgewertet werden. Durch die vorherige Datenfilterung entfallen etwa 12 % der Profilpunkte. Da jeder Profilpunkt eine Beobachtung darstellt, verbleiben für die Kalibrierung eines Lasertriangulationssensors etwa 530 Bedingungs-gleichungen.

Das Streuverhalten der Residuen zeigt grundsätzlich keine verbleibenden systematischen Abweichungen. Lediglich die Residuen der Referenzebene 1 enthalten scheinbar einen systematischen Trend. Die Ursache hierfür liegt in der geringen Anzahl an Beobachtungen gegenüber den anderen Referenzebenen und der zuvor getroffenen Annahme, dass alle Beobachtungen im stochastischen Modell als gleichwertig angesehen werden. Die Abmessungen der Rahmenkonstruktion des RACER II und die Anordnung der Lasertriangulationssensoren begrenzen die maximale Punktmenge für Referenzebene 1. Abhilfe kann eine Modifikation der Referenzkörper durch Reduzierung der Höhe von Referenzebene 2 schaffen.

Die Residuen in der Abbildung 6.17 enthalten noch einige Ausreißer, beispielsweise an der Grenze zwischen den Referenzebenen 2 und 3. Die zugehörigen Beobachtungen können sich jedoch nicht als Hebelbeobachtungen auswirken, da die Residuen gering sind und innerhalb der hohen Anzahl an Beobachtungen untergehen. Zusätzlich verhindern die in Kapitel 6.2.3 vorgestellten Filtertechniken, dass die Residuen Beträge annehmen können, um als Hebelbeobachtung wirksam zu werden. Ungeachtet dessen wird empfohlen, die Robustheit der Kalibrierung durch statistische Ausreißertests zu verbessern. Die konkrete Umsetzung dieser Tests ist gängige Praxis in der Geodäsie und kann beispielsweise in [Niemeier 2008] nachgeschlagen werden.

Ein weiteres Maß für die Genauigkeitseinschätzung der Kalibrierung besteht in der Betrachtung der Standardabweichungen der ausgeglichenen Parameter s_x . Die Umformung von (5.31) führt zu den Matrizen \mathbf{Q}_1 und \mathbf{Q}_2

$$\begin{pmatrix} \mathbf{k} \\ \hat{\mathbf{x}} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \mathbf{B} \cdot \mathbf{Q}_{LL} \cdot \mathbf{B}^T & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = -\mathbf{Q}_1^{-1} \cdot \mathbf{Q}_2. \quad (6.13)$$

Ausgehend von (6.13) sei \mathbf{Q}_{XX} eine Teilmatrix aus $-\mathbf{Q}_1^{-1}$, welche lediglich Informationen der Parameter enthält. Dann gilt für die Kovarianzmatrix der 6-DoF-Parameter Σ_{XX}

$$\Sigma_{XX} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{XX} \quad (6.14)$$

wobei

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{v}}{b - u} \quad \text{mit} \quad \mathbf{v} = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{k} \quad (6.15)$$

Der Vektor \mathbf{v} enthält die Verbesserungen der Ausgleichung, b steht für die Anzahl der Bedingungsgleichungen und u für die Anzahl der Parameter. Die Standardabweichungen der ausgeglichenen 6-DoF-Parameter s_x werden aus den Diagonalelementen von Σ_{XX} berechnet:

$$s_{x_i} = \sqrt{\Sigma_{x_i, x_i}} \quad (6.16)$$

Während der Entwicklung des RACER II wurden zahlreiche Kalibriervorgänge unter verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt, um deren Effektivität und Zuverlässigkeit zu prüfen [Strübing u. Neumann 2013]. Weitere Untersuchungen, die im Folgenden näher beschrieben werden, bestätigen die Langzeitstabilität des Gleisvermessungssystems und die Effektivität der angewandten Kalibriertechnik. Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf insgesamt fünf Kalibriervorgänge, wobei die einzelnen Referenzebenen dreimal unabhängig voneinander bestimmt wurden. Daraus ergeben sich $3 \times 5 = 15$ Kombinationen.

Translation	Std.Abw. [mm]	Rotation	Std.Abw [gon]
X_0	0,01	Ω	0,101
Y_0	0,06	Φ	0,013
Z_0	0,01	K	0,107

Tab. 6.6: durchschnittliche Standardabweichungen (1σ) der ausgeglichenen Parameter

Die Tabelle 6.6 zeigt die durchschnittlichen Standardabweichungen der ausgeglichenen Parameter aus allen Kombinationen. Die hohen Standardabweichungen für die Rotationswinkel sind durch die geringe Distanz zwischen Sensor und Referenzebenen zu erklären. Ein Winkel von 0,1 gon entspricht in der maximalen Messentfernung von ca. 15 cm einer Querabweichung von ca. 0,2 mm. Bei den erzielten Ergebnissen handelt es sich tendenziell um optimistische Werte, da die Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungen nicht berücksichtigt wurden. Wie stark sich die Werte tatsächlich auswirken, wird anhand der nachfolgenden Untersuchungen verdeutlicht sowie durch die Validierungsmessungen in Kapitel 9.3.

Profillaser-scanner	X_0 [mm]	Y_0 [mm]	Z_0 [mm]	Ω [gon]	Φ [gon]	K [gon]
1	2408,440	1075,171	912,283	0,3189	-150,3494	-0,1912
2	974,263	1074,806	855,889	-0,0418	148,6578	-0,3783
3	918,028	1675,331	913,158	199,9460	50,1432	0,0451
4	2351,995	1675,289	854,411	200,5211	-50,9545	-0,9303

Tab. 6.7: Mittelwerte der ausgeglichenen Parameter

In einer weiteren Untersuchung werden die ausgeglichenen Parameter aller 15 Kombinationen direkt miteinander verglichen und die Mittelwerte der Parameter in der Tabelle 6.7 dargestellt. Zur Veranschaulichung der relativen Position und Orientierung der einzelnen Lasertriangulationssensoren innerhalb der MSP wird auf die Abbildung 3.3 f. verwiesen. Die Mittelwerte der ausgeglichenen Parameter werden in eine Kalibrierdatei übertragen und gehen als solche in die Auswertung für die Ermittlung der Zielgrößen des RACER II ein (Kapitel 8).

Std.Abw. (Typ)	X_0 [mm]	Y_0 [mm]	Z_0 [mm]	Ω [gon]	Φ [gon]	K [gon]
σ	0,027	0,082	0,087	0,0702	0,0221	0,1178
2σ	0,05	0,16	0,17	0,141	0,044	0,236

Tab. 6.8: Standardabweichungen aller Mittelwerte der ausgeglichenen Parameter

Die Tabelle 6.8 zeigt die Standardabweichungen aller Mittelwerte der ausgeglichenen Parameter. Die erzielten Ergebnisse sind pessimistischer als die nach (6.13) bis (6.16) ermittelten Werte (Tabelle 6.6) und eignen sich daher besser für eine kritische Betrachtung des Kalibrierkonzepts. Sie enthalten insbesondere auch die Anteile der Messunsicherheit, die aufgrund der getroffenen Annahmen wie die Einführung gleichgewichteter und unkorrelierter Beobachtungen bislang unberücksichtigt blieben. Eine Quantifizierung der kombinierten Messunsicherheit der 6-DoF-Parameter nach GUM (Kapitel 5.4.2) kann auf diese Weise besser approximiert werden als die

Umsetzung der expliziten Messunsicherheitsanalyse des Gesamtsystems. Diese rekursive Methode zur Ermittlung der Messunsicherheit kann auch auf die Genauigkeitsanalyse der Zielgrößen des RACER II erweitert werden.

Um festzustellen, inwieweit sich die Genauigkeiten der einzelnen 6-DoF-Parameter auf die tatsächliche Berechnung der Zielgrößen auswirken, wurde die Kalibrierdatei entsprechend den Werten aus Tabelle 6.8 geändert, wobei jeweils ein Parameter um die zweifache Standardabweichung (2σ) additiv modifiziert wurde. Dabei wurden Testmessungen des RACER II in einem Tunnelabschnitt der Lötschberg-Basistunnels verwendet, was eine repräsentative Berechnung der Zielgrößen der Gleisgeometrie unter realen Bedingungen ermöglicht. Das Gleisvermessungssystem stationiert sich dabei mit dem Tachymeter über jeweils vier GVP im SGM mit einer Schrittweite von 2,50 m. Die GVP sind paarweise in etwa 50 m Entfernung an den Tunnelwänden angebracht und werden mit Präzisionsprismen signalisiert. Aufgrund der zunehmenden Ungenauigkeiten der automatischen Zielerfassung des Tachymeters wird beim Unterschreiten des Gleisvermessungssystems von 10 m Entfernung zu einem GVP der nachfolgende GVP für die Stationierung verwendet. Dieses als GVP-Wechsel bezeichnete Ereignis wurde bei der Auswahl der Untersuchung berücksichtigt.

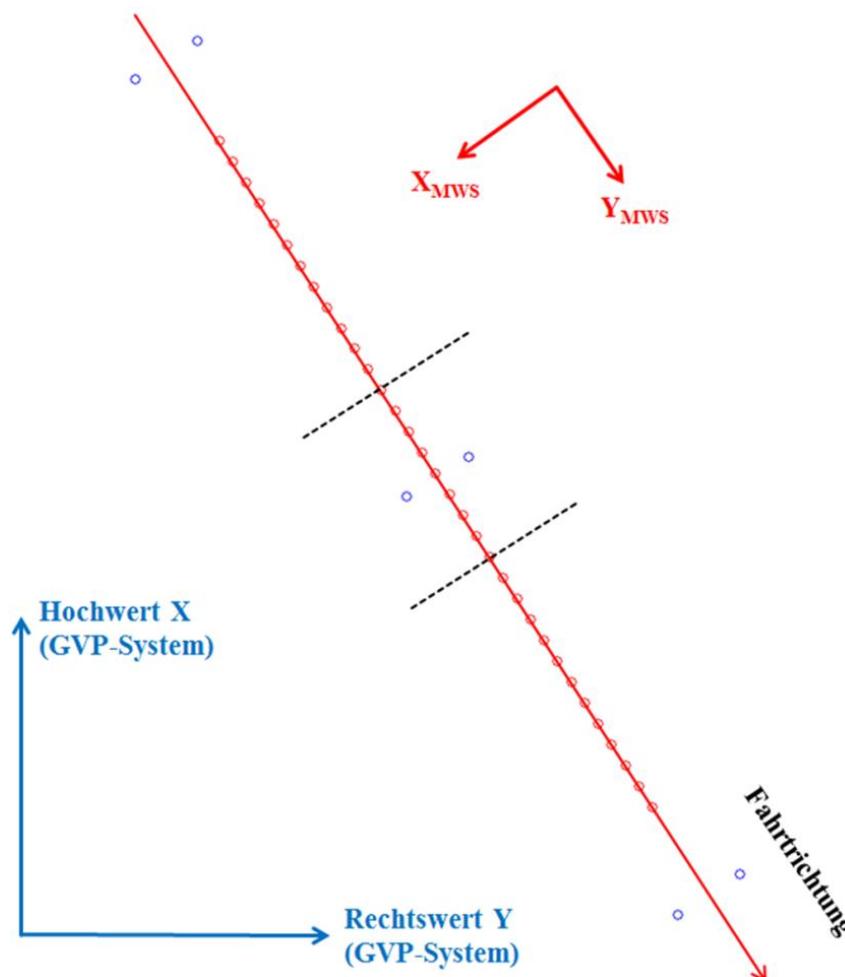


Abb. 6.18: Messsituation im Lötschberg-Basistunnel

Die Abbildung 6.18 veranschaulicht die zuvor beschriebene Messung. Im Testabschnitt werden drei GVP-Paare als Anschlusspunkte in das übergeordnete GVS verwendet (blau). Das Gleis-

vermessungssystem bewegt sich entlang der rot dargestellten GMA von Nord-West nach Süd-Ost. Die einzelnen Stationierungen des Gleisvermessungssystems sowie die Orientierung des MWS sind ebenfalls in Rot dargestellt. Der GVP-Wechsel findet in den Bereichen der gestrichelten Linien statt.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6.9 zusammenfassend dargestellt. Dabei handelt es sich jeweils um die Differenzen der sechs Zielgrößen der modifizierten gegenüber der originären Kalibrierung. Die Modifikationen betreffen lediglich einen Lasertriangulationssensor. Die Differenzen hinsichtlich der Zielgrößen Längsneigung, Querneigung und Spurweite sind direkt nachvollziehbar. So wirkt sich beispielsweise eine Modifikation der Kalibrierdatei hinsichtlich des Parameters X_0 bei der Differenz der Spurweite im vollen Modifikationsbetrag aus, während es bei einer Modifikation der anderen Translationsparameter keine Differenz gibt.

Modifikation (Parameter)	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔZ [mm]	Δ Querneig. [mm/1,5m]	Δ Längsneig. [‰]	Δ Spurweite [mm]
$X_0 + 2\sigma(X_0)$	-0,021	-0,014	0,000	0,000	0,000	0,050
$Y_0 + 2\sigma(Y_0)$	0,044	-0,067	-0,001	0,000	0,000	0,000
$Z_0 + 2\sigma(Z_0)$	0,000	-0,001	0,085	-0,085	-0,142	0,000
$\Omega + 2\sigma(\Omega)$	-0,023	0,035	0,000	-0,001	0,000	0,000
$\Phi + 2\sigma(\Phi)$	-0,011	-0,007	0,002	-0,002	-0,004	0,038
$K + 2\sigma(K)$	-0,022	0,035	0,000	-0,001	0,000	0,000

Tab. 6.9: Mittelwerte der Abweichungen der Zielgrößen des RACER II aufgrund der modifizierten 6-DoF-Parameter gegenüber den unveränderten 6-DoF-Parametern

Eine Modifikation des Parameters Z_0 dagegen wirkt sich nicht in der Spurweite aus, jedoch deutlich in der Längs- und Querneigung. Bei der Längsneigung nähert sich die Differenz sogar der angestrebten Genauigkeit von maximal 0,2 ‰. Der Einfluss der Modifikationen auf die Zielgrößen Lage und Höhe hängen von der relativen Ausrichtung des MWS zum übergeordneten GVS ab. Hinsichtlich der Translationen stimmen die Differenzbeträge nicht mit den Modifikationsbeträgen überein. Hierbei müssen Netzspannungen im GVS sowie die Restklaffenverteilung bei der Transformation des MWS in das GVS berücksichtigt werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Tabelle 6.9, dass die Güte der Kalibrierung ausreicht, um die angestrebten Systemgenauigkeiten des RACER II in der Praxis erfüllen zu können. Die finale Bestätigung wird durch die Validierungsmessungen im Kapitel 9.3 erbracht.

Auf Basis der zuvor genannten Ergebnisse besteht keine Notwendigkeit, den RACER II in regelmäßigen Abständen erneut zu kalibrieren. Die Langzeitstabilität scheint gegeben zu sein. Erneute Kalibrierungen sollten dann vorgenommen werden, wenn beispielsweise Sensoren ausgetauscht oder die Schraubverbindungen der Rahmenkonstruktion nachgezogen werden. Eine Kalibrierung sollte auch vorgenommen werden, sofern aufgrund starker Beanspruchung eine Verformung der Rahmenkonstruktion zu befürchten ist.

6.3 Temperatúrausdehnung der Multisensorplattform

Da die geometrischen Ausmaße der Rahmenkonstruktion von der gegenwärtigen Materialtemperatur abhängen, muss die Definition des MWS unter einer konstant gehaltenen Materialtemperatur vollzogen werden. Eine Veränderung der Materialtemperatur führt zu einer Maßstabsänderung des MWS in Form einer Volumenausdehnung der gesamten Rahmenkonstruktion. Der Maßstab muss mathematisch modelliert werden und bei der Auswertung der Messdaten zur Bestimmung der Zielgrößen der Gleisgeometrie berücksichtigt werden.

Die MSP des RACER II besteht überwiegend aus Aluminium. Nach [Haynes 2011] beträgt der Längenausdehnungskoeffizient für Aluminium $\alpha_{\text{Alu}} = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dieser Wert kann nicht unmittelbar auf den RACER II übertragen werden, da zusätzlich zum Aluminium Holz und Kunststoffe eingebunden sind. Hinzu kommen Zwangspunkte durch Verschraubungen oder andere mechanische Zwänge, welche die Temperatúrausdehnung der unterschiedlichen Materialkomponenten beeinflussen können. Die Ergebnisse der Temperaturkalibrierung des RACER II als Gesamtsystem haben jedoch gezeigt, dass bei der Rahmenkonstruktion ein isotropes Ausdehnungsverhalten unterstellt werden kann.

Abbildung 6.19 zeigt die schematische Rahmenkonstruktion des RACER II mit den PB 11 bis 14, welche das MWS definieren. Daneben wurden zusätzliche PB auf den mittleren Querträger vorgenommen (21 bis 24), um die Anzahl der Messungen zu erhöhen. Alle PB können mit Nestern zur Aufnahme von CCR bestückt und Koordinaten in diesen Punkten im LTS bestimmt werden. Aus den einzelnen Koordinaten werden Raumstrecken abgeleitet. Abbildung 6.19 zeigt die 24 möglichen Kombinationen aller Raumstrecken (gestrichelte Linien). Durch die Verteilung der Raumstrecken kann eine repräsentative Aussage über das Ausdehnungsverhalten der gesamten Rahmenkonstruktion getroffen werden.

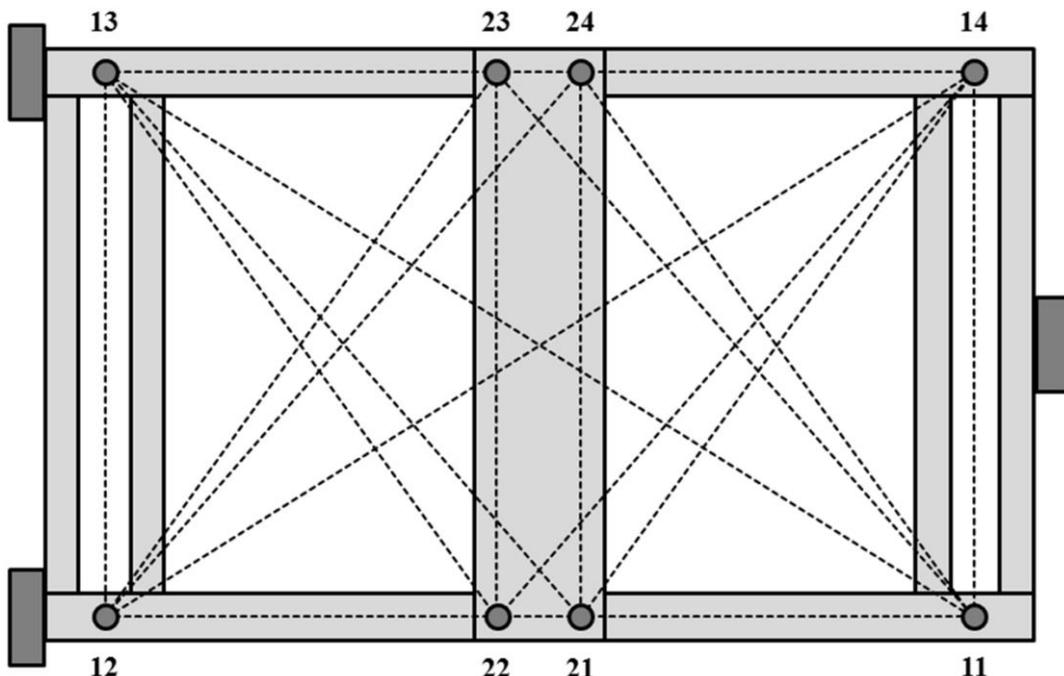


Abb. 6.19: Messaufbau mit Messpunkten und Streckenkombinationen

Voraussetzung für die Temperaturkalibrierung ist die kontrollierte Veränderung der Materialtemperatur des RACER II. Die Klimatisierung der MSP wird in einer begehbaren Klimakammer durchgeführt. Für die Kalibrierung ist ein Temperaturbereich von -10 bis 40 °C vorgesehen. Der verwendete Lasertracker AT-901 von Leica benötigt eine Betriebstemperatur von 0 bis 40 °C [Leica 2013]. Diese liegt außerhalb des angestrebten Temperaturbereichs, so dass die Temperaturkalibrierung unter normalatmosphärischen Bedingungen durchgeführt werden muss. Dabei zwei unterschiedliche Methoden angewendet:

- A. Akklimatisierung des RACER II nach vorheriger Abkühlung der MSP auf -15 °C
- B. Akklimatisierung des RACER II nach vorheriger Erwärmung der MSP auf 45 °C

Bei beiden Methoden wird der RACER II unter Verwendung der Dreipunktauflage analog zur Kalibrierung der Lasertriangulationssensoren auf einem stabilen Untergrund aufgesetzt (Abbildung 6.8). Anschließend erfolgt die kontinuierliche Messung der PB mit Hilfe des Lasertrackers. Die Materialtemperatur wird kontinuierlich mit erfasst und später über den Zeitindex der Lasertrackermessungen zugeordnet. Die Vermessung der PB wird so lange wiederholt, bis sich die Materialtemperatur des RACER II der Umgebungstemperatur angepasst hat.

Durch Zuordnung der Lasertrackerkoordinaten mit den Materialtemperaturen können die einzelnen Raumstrecken S_i mit $i = 1, \dots, n$ berechnet werden

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \vdots \\ \sqrt{(S_{X,i} - S_{X,Ref,i})^2 + (S_{Y,i} - S_{Y,Ref,i})^2 + (S_{Z,i} - S_{Z,Ref,i})^2} \\ \vdots \end{pmatrix}, \text{ mit } i = 1, \dots, n. \quad (6.17)$$

Daraus lassen sich Einfluss- und Zielgrößen für einen linearen Regressionsansatz ableiten:

$$\Delta \mathbf{T} = \begin{pmatrix} \vdots \\ T_i - T_{Ref} \\ \vdots \end{pmatrix} \Rightarrow \text{Einflussgröße } \mathbf{X} = \text{diag}(\Delta \mathbf{T} \cdot \mathbf{S}^T) \quad (6.18)$$

$$\Delta \mathbf{S} = \begin{pmatrix} \vdots \\ S_i - S_{Ref} \\ \vdots \end{pmatrix} \Rightarrow \text{Zielgröße } \mathbf{Y} = \Delta \mathbf{S} \quad (6.19)$$

wobei als Referenzstrecken $S_{Ref,i}$ die Raumstrecken zur Referenztemperatur $T_{Ref} = 20,17$ °C festgelegt werden, woraus sich auch die Temperaturänderungen ΔT_i sowie die Streckendifferenzen ΔS_i beziehen.

Die Abbildung 6.20 zeigt die Relation der Einflussgröße (6.18) gegenüber der Zielgröße (6.19). Die rote Gerade stellt das Ergebnis der linearen Regression dar, deren Steigung dem gesuchten

Längenausdehnungskoeffizient $\alpha_{\text{GMW}} = 21,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ entspricht. Erwartungsgemäß kommt das Ergebnis dem Literaturwert von $\alpha_{\text{Alu}} = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ sehr nahe. Die Differenz $\alpha_{\text{Alu}} - \alpha_{\text{GMW}} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bewirkt bei der Breite des RACER II von etwa 1,5 m und einer Temperaturdifferenz von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 0,02 mm. Ein signifikant auswirkender Unterschied zur Verwendung des Nominalwerts kann demnach nicht nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der Temperaturkalibrierung bestätigen die Literaturangaben sowie die Güte der Kalibrierung des Gesamtsystems.

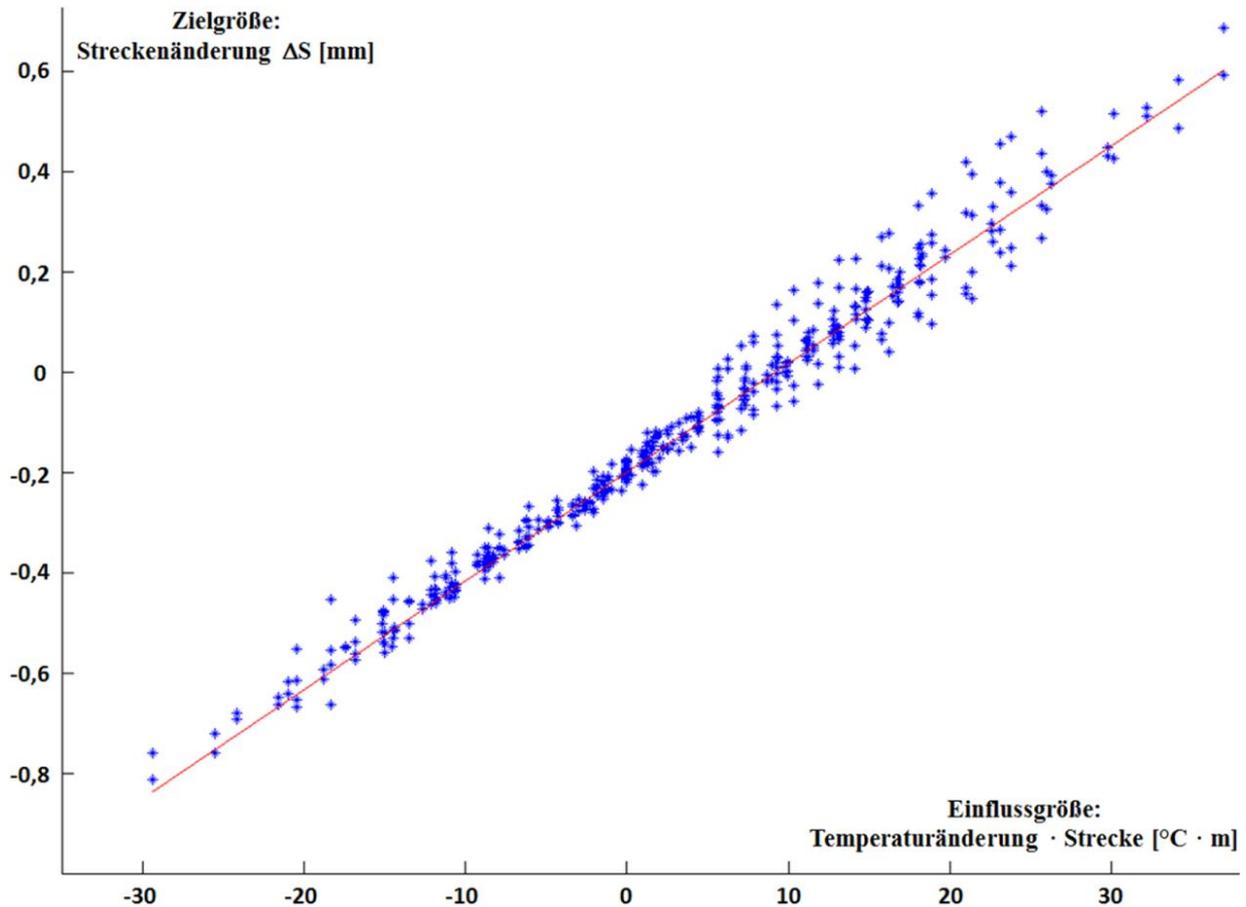


Abb. 6.20: Lineare Regression zur Bestimmung des Längenausdehnungskoeffizienten

Bei Unterstellung eines isotropen Materialverhaltens kann α_{GMW} als Maßstabsfaktor PPM zur linearen Volumenausdehnung des MWS verwendet werden, wobei die Temperaturdifferenz aus aktueller Materialtemperatur T_{akt} und der Materialtemperatur zum Zeitpunkt der Kalibrierung T_{Ref} in die Formel (6.20) eingehen. Das MWS wird über die lokalen Koordinaten der vier \mathbf{PB}_j mit $j = 10 + 1, \dots, 4$ definiert (Abbildung 6.13).

$$\text{PPM} = 1 + \frac{(T_{\text{akt}} - T_{\text{Ref}}) \cdot \alpha_{\text{GMW}}}{10^6} \quad (6.20)$$

Über PPM kann die Volumenausdehnung entsprechend der aktuellen Materialtemperatur durchgeführt werden, wobei die ursprünglichen \mathbf{PB}_j entsprechend korrigiert werden:

$$\mathbf{PB}_{\text{kor}} = \text{PPM} \cdot \mathbf{PB} = \text{PPM} \cdot \begin{pmatrix} \text{PB}_{x,j} \\ \text{PB}_{y,j} \\ \text{PB}_{z,j} \end{pmatrix} \quad (6.21)$$

6.4 In-situ-Prüfung der Multisensorplattform RACER II

Die in Kapitel 6.2 vorgestellte Kalibrierung der Lasertriangulationssensoren des RACER II ist zeitaufwändig und erfordert den Einsatz hochgenauer, kostenintensiver Messtechnik. Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen an die Zielgrößen des Gleisvermessungssystems wird beispielsweise das Tachymeter in regelmäßigen Abständen kalibriert. Dabei handelt es sich um eine streng periodische Kalibrierung während eines Messeinsatzes, wobei das Tachymeter zwischenzeitlich vom Gleisvermessungssystem demontiert wird. Die Lasertriangulationssensoren des RACER II sind neben dem Tachymeter die wichtigsten Sensoren zur Erfassung der Gleisgeometrie. Ihre Funktionsfähigkeit ist entscheidend für die Genauigkeit der Zielgrößen. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Möglichkeiten einer in-situ-Prüfung untersucht, mit welcher drei wesentliche Ziele verfolgt werden:

1. Überprüfung der Funktionsfähigkeit eines Sensors
2. Überprüfung der Genauigkeit eines Sensors
3. gegebenenfalls Kalibrierung des Sensors

Hinsichtlich der Funktionsfähigkeit soll überprüft werden, ob ein Messsignal ausgesendet und auch wieder empfangen wird. Letzteres kann beispielsweise bei Lasertriangulationssensoren durch Hindernisse im Strahlengang, Totalreflexionen und -absorptionen der Messoberfläche oder durch Verschmutzung der Sende- und Empfangsoptik hervorgerufen werden. Sofern die Zielsetzung 1 erfüllt ist, kann das empfangene Signal gegenüber einer Referenz hinsichtlich der Genauigkeit überprüft werden. Abhängig von der Beschaffenheit der verwendeten Referenz ist ggf. die Kalibrierung des Sensors aufgrund der aktuellen Messergebnisse möglich.

Beim Tachymeter wird der Strahlengang während der elektrooptischen Distanzmessung automatisch zwischen zwei Lichtwegen gewechselt. Der innere Lichtweg stellt dabei die Referenz dar, wobei die Länge des zurückgelegten Wegs genauestens bekannt ist. Durch einen Kippspiegel wird der Strahlengang nach außen gelenkt und führt zur zielgebundenen Messung. Bei den Lasertriangulationssensoren des RACER II wäre die Umsetzung dieser Technik sehr aufwändig, wobei optische Ablenkeinheiten innerhalb der Strahlengänge montiert werden müssten zuzüglich Motoren mit entsprechender Regeltechnik.

Alternativ zur Umlenkung des originären Strahlengangs eines Lasertriangulationssensors kann ein Teil der Profilverpunkte für die Erfassung einer Referenzgeometrie genutzt werden. Die Referenzgeometrie muss fest mit MSP verbunden sein und ihre Position und Ausrichtung hinsichtlich des MWS im Rahmen der Kalibrierung der Lasertriangulationssensoren mit bestimmt werden.

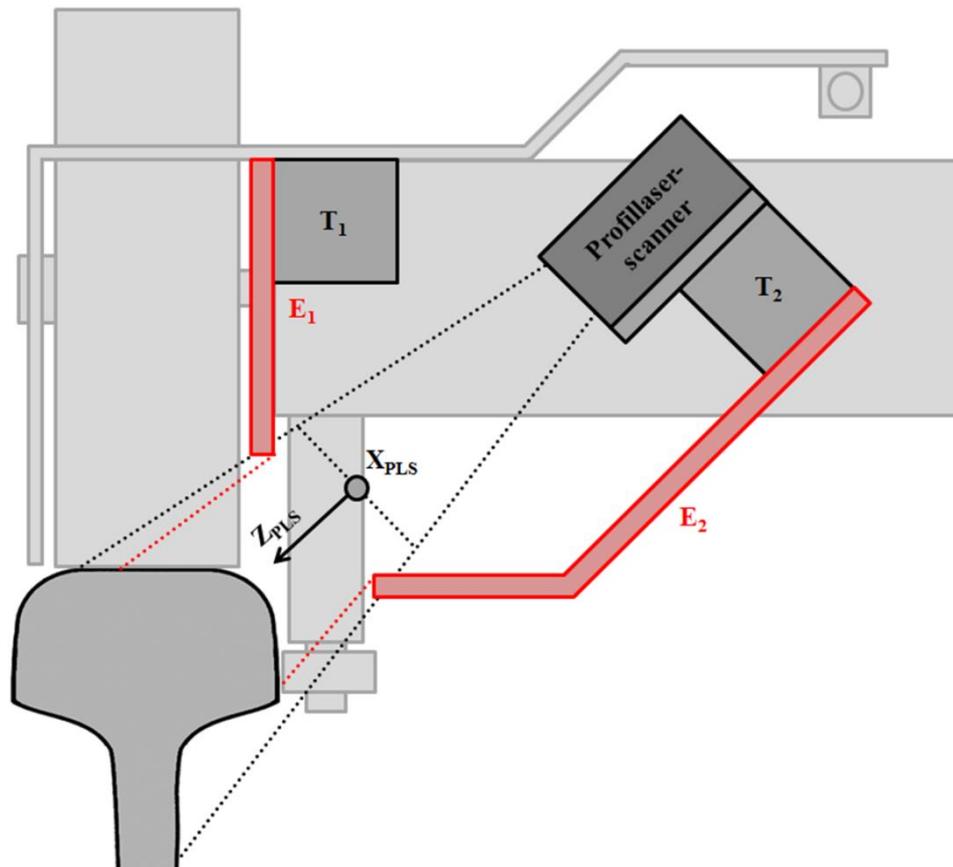


Abb. 6.21: Entwürfe zur Montage einer Referenzgeometrie (In-situ-Prüfung RACER II)

Die Abbildung 6.21 zeigt entsprechende Überlegungen, wie eine solche Referenzgeometrie beim RACER II umgesetzt werden kann. Eine Montage ist nur an den Längsträgern T_1 und T_2 möglich. Dabei ist zu beachten, dass das PLS etwa 70 mm außerhalb des Gehäuses des Lasertriangulationsensors beginnt und keine Messungen unterhalb dieses Abstands möglich sind. Deswegen verbleiben lediglich zwei Möglichkeiten in Form der beiden Entwürfe E_1 und E_2 .

Vorteilhaft für E_1 ist, dass die Vorrichtung klein und robust ist. Je kürzer der Ausleger, desto geringer ist seine Anfälligkeit gegenüber mechanischen Verformungen. Zudem ist die Vorrichtung wegen ihrer Position innerhalb der MSP weitestgehend geschützt durch äußere Einwirkungen. Nachteilig jedoch ist, dass für die Referenzgeometrie ein Teil der Schienenoberfläche abgeschattet wird. Die Ermittlung der Zielgrößen (Kapitel 8.3) wird dadurch zwar grundsätzlich nicht beeinträchtigt, jedoch gehen wertvolle Informationen über die Schienenoberfläche verloren, die möglicherweise für weiterführende Anwendungen des RACER II relevant wären.

Vorteilhaft für E_2 ist, dass der durch die Referenzgeometrie abgeschattete Bereich für weiterführende Anwendungen des RACER II keine Bedeutung hat, da es sich um einen Teil des Schienenswegs handelt. Dem gegenüber steht jedoch der gravierende Nachteil, dass der Ausleger sehr lang sein muss, wodurch seine Stabilität nur noch durch massive Bauteile gewährleistet werden kann. Des Weiteren führt die zum Boden hin exponierte Lage zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Stößen, beispielsweise hervorgerufen durch Entgleisungsschutz-Vorrichtungen beim Überqueren von Weichen. Ferner könnte beispielsweise eine Verdrehung des Querträgers T_2 nicht aufgedeckt werden, da E_2 mit rotiert.

Die Nachteile beider Entwürfe haben dazu geführt, dass bislang keine konkrete Umsetzung der In-situ-Prüfung beim RACER II durchgeführt wurde. Das Potential bleibt davon jedoch unberührt. Eine vergleichbare Anordnung der Referenzgeometrie nach dem Vorbild der in Kapitel 6.2.1 vorgestellten Kalibrierung ermöglicht die In-situ-Kalibrierung des Lasertriangulationsensors zu beliebigen Zeitpunkten. Die einzige Voraussetzung ist, dass die Referenzgeometrie innerhalb des MWS langzeitstabil ist. Es muss allerdings beachtet werden, dass Anzahl der Messpunkte bei den verwendeten Lasertriangulationssensoren begrenzt ist. Bei 290 Profilpunkten verbleiben nur etwa 10-20 Profilpunkte für die Referenzgeometrie, ohne den primären Messbereich zur Ermittlung der Zielgrößen zu stark einzuschränken.

Wie in Kapitel 6.2.5 dargelegt, konnte aufgrund der bisherigen Ergebnisse die Langzeitstabilität der MSP des RACER II bestätigt werden. Unter gegenteiliger Annahme kann die In-situ-Kalibrierung eine notwendige, periodische Kalibrierung ersetzen. Unabhängig von der Beschaffenheit der Referenzgeometrie können zumindest Abweichungen erkannt werden, welche die Entscheidung zur Durchführung einer Bedarfskalibrierung begünstigen.

7 Auswertetechniken von Lasertriangulationssensoren

Die Messdaten von Lasertriangulationssensoren repräsentieren die Oberflächenstruktur der unmittelbaren und sichtbaren Umgebung. Je nach Art des Sensors wird die Oberflächenstruktur entweder als Fläche oder als Konturlinie erfasst. In beiden Fällen bilden die Messdaten eine Punktmenge, durch welche über die Kalibrierung der Sensormodule (Kapitel 5) Punkte innerhalb eines übergeordneten Bezugssystems bestimmt werden können. Das Kapitel 7 beschreibt im Folgenden grundlegende Techniken, um aus den gemessenen Punkten die gewünschten Informationen hinsichtlich des zu bestimmenden Messobjekts gewinnen zu können. In Kapitel 8 wird die konkrete Umsetzung allgemeiner und individueller Auswertetechniken anhand des Gleisvermessungssystems RACER II beschrieben.

7.1 Objekterkennung

Das Messobjekt ist ein existierender Gegenstand, dessen Oberflächengeometrie mittels Lasertriangulationssensoren als Konturlinie vermessen wird. Die Konturlinie wird durch eine dichte Folge dreidimensionaler Punkte (Profildaten) gebildet und repräsentiert die aufgenommene Szene als naturgetreue Nachbildung zum Zeitpunkt der Messung. Aus den Profildaten werden im Regelfall Modelle abgeleitet, um die Punktmenge der Messdaten für die Datenverwaltung zu reduzieren. Das Modell besteht aus einer handhabbaren Menge an repräsentativen Punkten bzw. stellt eine mathematische Approximation der aufgenommenen Szene dar [Kern 2003].

Um Informationen (Zielgrößen) über ein Messobjekt gewinnen zu können, müssen die zu Grunde liegenden Messdaten der aufgenommenen Szene aufbereitet und analysiert werden. Ein wesentlicher Schritt ist dabei die Objekterkennung, bei der das interessierende Messobjekt von den restlichen Umgebungsinformationen (Hintergrund) isoliert wird. Als Messobjekte werden demnach Bereiche der aufgenommenen Szene verstanden, die einem realen Objekt wie beispielsweise einer Kiste oder einer Vignolschiene zugeordnet werden können. Die Automatisierung der Objekterkennung erfordert im Wesentlichen:

- Segmentierung (Bildung von Objektbereichen)
- Klassifizierung (Beurteilung der Objektbereiche)
- Modellierung und Approximation (mathematische Beschreibung)

Bei der Segmentierung werden Teilmengen der aufgenommenen Szene isoliert und durch ein Homogenitätskriterium (HK) mathematisch parametrisiert. Auf Basis des HK wird ein gleichartiges Verhalten benachbarter Teilmengen beschrieben, wodurch gleichartige Teilmengen zu einem gemeinsamen Objektbereich verbunden werden. In Kapitel 7.1.1 werden die zentralen Segmentierungsalgorithmen dargestellt.

Der nächste Schritt liegt in der Klassifizierung des Objektbereichs. Dabei muss beurteilt werden, welches Modell für den segmentierten Objektbereich zutreffend ist. In Kapitel 7.1.2 werden die

auf tretenden Probleme anhand eines Beispiels verdeutlicht. Zur Auswahl passender Modelle können die beispielsweise die Ansätze aus Kapitel 5.3 verwendet werden. Die Klassifizierung erfolgt über ein allgemeines Modell wie beispielsweise Freiformflächen. Aus den Parametern des allgemeinen Modells lassen sich in der Regel Rückschlüsse über die Grundgestalt des zu klassifizierenden Objektbereichs ziehen (Ebene, Kugel, etc.), auf deren Basis die Entscheidung der Modellauswahl getroffen wird. Das Auswahlverfahren kann gegebenenfalls auf mehreren, hierarchischen Entscheidungsebenen durchgeführt werden.

Abschließend wird der klassifizierte Objektbereich durch das gewählte Modell mathematisch parametrisiert und durch eine Schätzfunktion approximiert. Dieser Schritt ist insbesondere für den Bereich „reverse engineering“ relevant, da aus handwerklich oder künstlerisch frei modellierten Oberflächenstrukturen parametrisierbare Modelle im CAD (computer aided design) erstellt werden sollen. Weiterführende Informationen sind beispielsweise unter [Kern 2003] und [Dold 2010] nachschlagbar.

7.1.1 Segmentierung

Ein erster Schritt bei der Segmentierung der Messdaten von Lasertriangulationssensoren besteht in der Suche und Isolation von Teilmengen, die sich aufgrund gleichartiger Charakteristika entsprechen. [Dold 2010] formuliert diesen Vorgang als Aufteilung der Punkte in disjunkte Teilmengen, welche bestimmte HK erfüllen. Im Rahmen der photogrammetrischen Bildverarbeitung wurden zahlreiche Segmentierungsalgorithmen entwickelt. [Nguyen u.a. 2005] stellt die bekanntesten Algorithmen zur Linienextraktion aus der aufgenommenen Szene eines Lasertriangulationssensors hinsichtlich Geschwindigkeit, Komplexität, Zuverlässigkeit und Genauigkeit gegenüber. Die meisten Algorithmen lassen sich auch auf eine flächenhafte Objekterkennung erweitern. Eine strikte Trennung zwischen 2D- und 3D-Algorithmen ist daher nicht möglich. Stellvertretend für eine große Vielzahl nebst Varianten werden folgende Segmentierungsalgorithmen vorgestellt:

- Regionenbasierte Segmentierung
- Bereichswachstumsverfahren
- RANSAC-Algorithmen

Regionenbasierte Segmentierung

Ziel der regionenbasierten Segmentierung ist die Bildung von Bereichen, die ein definiertes Homogenitätskriterium (HK) erfüllen [Dold 2010]. Dazu werden die Messdaten als Gesamtregion R nach festen Regeln in $i = 1, \dots, n$ Teilregionen R_i aufgeteilt. Die einfachste Regel besteht darin, die durch die Messdaten definierte räumliche Ausdehnung in ein gleichmäßiges Raster zu unterteilen. Als Grundlage eines HK können beispielsweise geometrische Primitive wie Geraden und Bögen oder Oberflächenstrukturen wie Ebenen und quadratische Formen verwendet werden (Kapitel 5.3). Ein HK gilt als erfüllt, wenn alle Punkte aus R_i einer bestimmten Anforderung der Annahmen des HK entsprechen.

Ein bekannter Vertreter regionenbasierter Segmentierungen ist der „Split-and-Merge“-Algorithmus [Nguyen u.a. 2005], [Pavlidis u. Horowitz 1974]. Die Aufteilung von R erfolgt in zahlreiche R_i , wobei das HK als Aufspaltungsregel von entscheidender Bedeutung ist. Nach [Pavlidis u. Horowitz 1974] wird zunächst die maximale Abweichung d_{\max} eines Punkts P_{\max} aus R zur Grundlage des HK in Form einer polynomialen Approximation detektiert. Überschreitet d_{\max} einen bestimmten Schwellwert, wird R an P_{\max} in zwei Teilregionen R_1 und R_2 aufgeteilt und das Verfahren beginnt erneut für R_1 und R_2 . Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Teilregionen dem HK entsprechen. In einem zweiten Schritt werden alle R_i hinsichtlich der maßgebenden Eigenschaften parametrisiert. Dabei handelt es sich meist um die Orientierung von R_i im gemeinsamen Bezugssystem, beispielsweise der Richtungsvektor einer Geraden oder den Normalenvektoren einer Ebene. Abschließend werden benachbarte R_i miteinander verschmolzen, sofern ihre Parameter innerhalb einer bestimmten Toleranz übereinstimmen.

Ein weiteres, aus der Bildverarbeitung stammende Verfahren zur Erkennung geometrischer Objekte basiert auf der Hough-Transformation, einem Algorithmus zur Linien- und Ebenendetektion. Voraussetzung ist die Parametrisierung des zu erkennenden Objektes, wobei die Messdaten in den sogenannten Hough-Raum transformiert werden. Die gewählte Parametrisierung des Objekts ermöglicht den direkten Bezug eines Messpunkts zum Objekt. Über eine Fensterfunktion werden Einzelmessungen in Relation zum Objekt bestimmt und bei Einhaltung definierter Schwellwerte dem Objekt zugewiesen. Die Größe der Fensterfunktion bestimmt den Suchraum der in Frage kommenden Messpunkte. Zugehörige Messpunkte eines gemeinsamen Objekts erfüllen die gleichen Parameter des parametrisierten Objekts und bilden im Hough-Raum ein lokales Maximum [Dold 2010]. Weiterführende Informationen können beispielsweise in [Nguyen u.a. 2005], [Castro u.a. 2004] und [Forsberg u.a. 1993] nachgeschlagen werden.

Bereichswachstumsverfahren

Bereichswachstumsverfahren sind oftmals unter dem Begriff „Region Growing“ bekannt. Ausgehend von einer definierten Saatregion werden benachbarte Teilregionen sukzessive hinzugefügt, sofern sie bestimmte HK erfüllen. Die Saatregion wird meist durch den Anwender mittels manueller Auswahl eines oder weniger konkreter Messpunkte definiert. Hier ist eine entsprechende Sorgfalt geboten, da die Qualität der Ergebnisse maßgeblich von der repräsentativen Wahl des oder der Saatpunkte abhängt [Dold 2010].

Oftmals werden auf diese Weise zusammenhängende Oberflächen detektiert, um beispielsweise die Geländeoberfläche vom Bewuchs zu trennen. Bei diesem Beispiel besteht das HK darin, dass die Schätzwerte der Flächenfunktionen benachbarter Teilregionen innerhalb einer vorgegebenen Toleranz einander entsprechen. Das Verfahren ist sehr rechenintensiv, liefert aber in der Praxis zuverlässige Ergebnisse und ist besonders populär bei der Ebenensegmentierung [Dold 2010], [Böhm 2005].

der Sensor Teil einer bewegten MSP mit autonomer Navigation ist (Kapitel 7.2.1), können zusätzlich Hindernisse und die Raumbegrenzung als Messobjekte angesehen werden. Das Beispiel soll zeigen, dass eine eindeutige Objekterkennung selbst bei einfachen Strukturen problematisch sein kann.

Um das Messobjekt „Kiste“ von der Hallenwand zu unterscheiden, können beispielsweise die bekannten Maße der Kisten mit den erfassten Bereichen verglichen werden, da das entsprechende Vorwissen über die Messobjekte vorhanden ist. Damit lassen sich die Bereiche 2 und 6 eindeutig von 1 und 7 unterscheiden. Ferner stellt sich eine Hallenecke aus Sicht des Sensors immer als genähert rechter Winkel (α), die Ecke einer Kiste dagegen als Winkel $\gg 100$ Gon dar (β), was die Differenzierung der Bereiche 2 und 3 ermöglicht. Eindeutig identifizierbar sind dagegen die Säulen aufgrund ihrer kreisförmigen Grundform (Bereich 4).

Problematisch ist dagegen die Differenzierung der Bereiche 5 und 6. Hier müssen im Zweifelsfall weitere Objektinformationen genutzt werden. So kann beispielsweise bei einer flächenhaften Erfassung die Höhe der Kiste bestimmt und mit den gegebenen Maßen verglichen werden. Sofern der Sensor radiometrische Informationen bereitstellt, können auch diese für die Objekterkennung verwendet werden, sofern sie anderweitig in der Umgebung nicht vorkommen oder zumindest nicht in der gegebenen Differenzierungssituation. Für die zuverlässige Analyse radiometrischer Messdaten müssen gegebenenfalls weitere Einflüsse wie der Auftreffwinkel, die Oberflächenstruktur oder die Zusammensetzung und Intensität des Umgebungslichts berücksichtigt werden.

Abschließend werden in der Abbildung 7.1 die Bereiche 2 und 6 als Objektgruppe „Kiste“ klassifiziert. Der Begriff Objektgruppe kann weitere Untergruppen beinhalten, zum Beispiel verschiedene Kistentypen, die sich durch Material, Volumen oder Maße unterscheiden. Bezogen auf das Gleisvermessungssystem RACER II kann beispielsweise die Objektgruppe „Schiene“ hinsichtlich unterschiedlicher Schientypen klassifiziert werden.

Während die Abbildung 7.1 ein einfaches Beispiel in einer störungsfreien, kontrollierten Umgebung zeigt, gibt Kapitel 7.2 darüber hinaus Anwendungsbeispiele für die Objekterkennung in komplexen Messumgebungen. Eine komplexe Messumgebung erfordert in der Regel einen höheren Detailgrad der Modellierung des Messobjekts sowie erhöhte Ansprüche an die zuverlässige Segmentierung der Messumgebung.

7.2 Anwendungsbeispiele zur automatischen Objekterkennung

7.2.1 Autonome Navigation

In der Robotik ist die automatische Objekterkennung ein wesentlicher Bestandteil der Navigation. Hindernisse jeglicher Art müssen als solche erkannt und auf deren Datenbasis Maßnahmen zur kollisionsfreien Wegfindung getroffen werden. Dabei können sowohl Hindernisse als auch die MSP statisch oder in Bewegung sein. Sobald mindestens ein Hindernis oder die MSP selbst in Bewegung ist, müssen basierend auf der Objekterkennung ergänzend Techniken zur Objekt-

verfolgung implementiert werden. Die Objektverfolgung ermöglicht die Berechnung präziser Trajektorien der Hindernisse relativ zur MSP und liefert damit eine wesentliche Berechnungsgrundlage für die Wegfindung. Zur Vorhersage der Trajektorien bewegter Hindernisse kommt meist die Kalman- und Partikelfilterung zum Einsatz, welche die Prädiktion künftiger Objektpositionen aus der Analyse der vorangehenden Messungen erlaubt. Für weitere Details wird auf [Thrun u.a. 2005], [Schrack 1977], [Haykin 2001] oder [Eichhorn 2005] verwiesen.

In der Robotik sind die Genauigkeitsanforderungen an die Sensorik für Navigationsaufgaben eher zweitrangig. Entscheidend ist dagegen ein hochfrequenter und überschaubarer Datenfluss, um die Auswertung der Umgebungsinformationen möglichst echtzeitnah durchzuführen und so die Reaktionszeit des MSS zu optimieren. Vor diesem Hintergrund werden in der Regel Lasertriangulationssensoren eingesetzt, welche die Umgebung in einer horizontalen Konturlinie erfassen. Um die dritte Dimension zu ergänzen, werden oftmals Kameras verwendet.

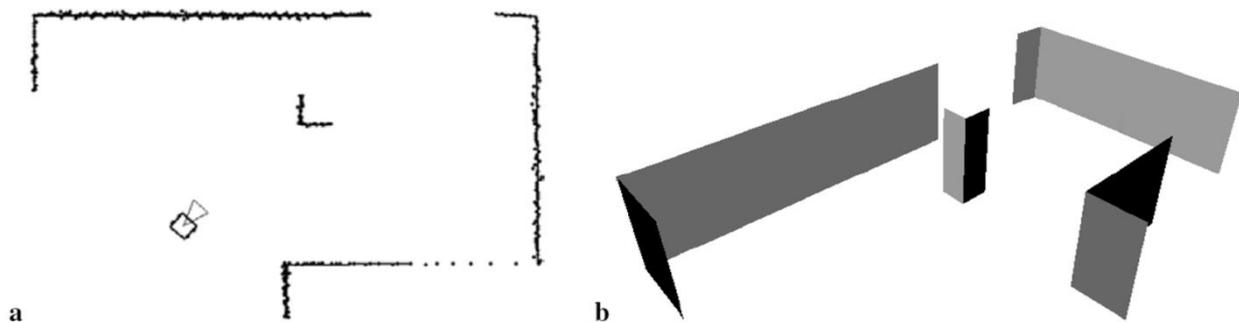


Abb. 7.2: (a) Messdaten des Lasertriangulationssensors, (b) 3D-Modell [Baltzakis u.a. 2003]

[Baltzakis u.a. 2003] stellt eine Variante aus Lasertriangulationssensor und dualem Kamerasystem für eine bewegte MSP vor. Aus den Messdaten des Lasertriangulationssensors werden zunächst Linien und Kanten segmentiert, die dann als Flächenelemente in ein dreidimensionales Modell übertragen werden (Abbildung 7.2). Dabei stehen die Flächenelemente orthogonal zu einer als eben unterstellten horizontalen Grundfläche. In einem zweiten Schritt wird der Überlappungsbereich der beiden Kameras stereoskopisch ausgewertet und mit dem 3D-Modell validiert. Auf diese Weise können Objekte erkannt werden, die sich ober- oder unterhalb der Messebene des Lasertriangulationssensors befinden. Damit können auch die getroffenen Annahmen des 3D-Modells korrigiert werden, wenn sich beispielsweise durch die Validierung herausstellt, dass der in Abbildung 7.2 (b) dargestellte Pfeiler tatsächlich nur eine flache Kiste ist.

Die Ausgangsbasis für die Objekterkennung ist die Segmentierung der Messdaten mit Hilfe der in Kapitel 7.1.1 dargestellten Algorithmen. Konkrete Umsetzungen sind beispielsweise in [Arras u. Siegwart 1997] für die Segmentierung von Linien und Kanten zu finden. Darüber hinaus stellt [Premebida u. Nunes 2005] die Segmentierung von Kreisen und Ellipsen vor. Im Gegensatz zur bloßen Objekterkennung von Linien und Kanten kann anhand der runden Formen eine erweiterte Klassifizierung der Hindernisse durchgeführt werden. Auf diese Weise kann zum Beispiel eine kantige Säule vom genähert elliptischen Beinuerschnitt eines Menschen differenziert werden. [Martinez-Cantin u.a. 2006] untersucht verschiedene Segmentierungsalgorithmen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Ein interessanter Aspekt hierbei ist die Differenzierung

der (gewollten) Detektion kleiner Kanten, beispielsweise die Konturlinie einer Fahrstuhlür, von der (ungewollten) Detektion der exakten Konturlinie einer gradlinig verlaufenden Hecke. Letztere kann für die Navigation auch als Gerade segmentiert werden.

7.2.2 Modellierung von Bauwerksgeometrien

Die detaillierte Erfassung von Bauwerksgeometrien ist eine wichtige Planungsgrundlage für den Umbau oder die Sanierung von Bestandsbauten. Die erfassten Daten dienen der Sicherung des Bestandes, der Dokumentation von Baumängeln (Beweissicherung), als Grundlage für die Wertermittlung oder zu Zwecken der Bauforschung und Denkmalpflege [Kern 2003]. Daneben wird die periodische Erfassung der Bauwerksgeometrie für die Bauwerksüberwachung (Monitoring) genutzt, um Deformationen während einer Baumaßnahme zu dokumentieren und beim Überschreiten bestimmter Toleranzen Alarmierungen auszulösen.

Gerade bei komplexen Fassaden oder Tragwerken wie die Gewölbe einer Kirche, stoßen die klassischen Aufnahmeverfahren wie Handaufmaß oder Tachymetrie schnell an ihre Grenzen. Alternative Messmethoden zur Erfassung komplexer Oberflächenstrukturen stellen die Photogrammetrie und das terrestrisches Laserscanning dar. Oftmals kann das beste Ergebnis aus einer Kombination der verschiedenen Messtechniken erzielt werden. [Becker u.a. 2004] stellt beispielhaft ein Verfahren vor, bei dem ein terrestrischer Laserscanner mit einem bildgebenden Aufnahmesystem gekoppelt wird. Moderne terrestrische Laserscanner nutzen diese Technik bereits, um die Intensitätswerte der Einzelpunktmessungen durch die Farbinformationen der Kamera zu ersetzen. Darüber hinaus können die in der Regel höher aufgelösten Bilddaten genutzt werden, um die fehlenden Informationen zwischen den Einzelpunktmessungen des Laserscans zu füllen. Die Messdaten des Laserscanners stützen hierbei die Bilddaten hinsichtlich der räumlichen Informationen.

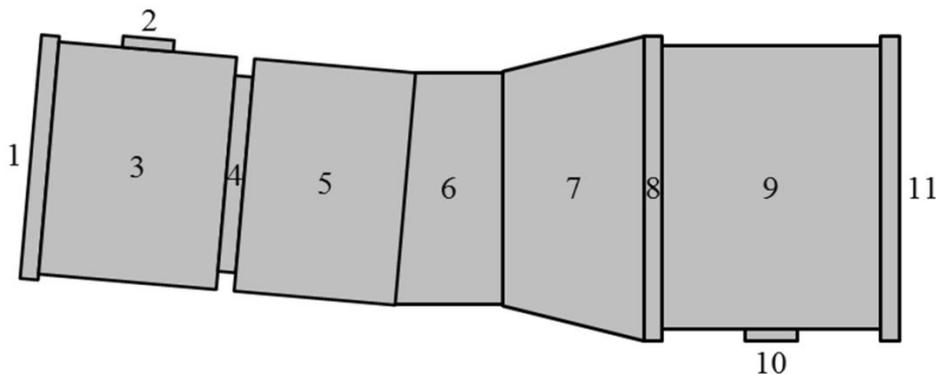


Abb. 7.3: Beispiel eines komplexen Verbunds einzelner geometrischer Grundelemente

Bauwerke lassen sich überwiegend durch geometrische Primitive und Regelflächen modellhaft abbilden. Dennoch ist eine vollautomatische Segmentierung bislang nicht möglich, weil die existierenden Algorithmen oftmals unzureichende Informationen für die klare Trennung einzelner geometrischer Grundelemente von einem komplexen Verbund besitzen. Die Abbildung 7.3 zeigt exemplarisch einen Verbund von insgesamt elf zu bestimmenden geometrischen Grundelementen. Je nach Voreinstellung des eingesetzten Segmentierungsalgorithmus könnte beispielsweise

der gesamte Verbund als ein einziges rechteckiges Objekt segmentiert werden. Kleine Anbauteile wie 2 und 10 bleiben abhängig von der Wahl der Algorithmen-Schwellwerte unberücksichtigt. Problematisch ist auch die Erkennung der exakten Trennungslinien bei den Übergängen 5/6, 6/7 und insbesondere 7/8.

Wie das Beispiel zeigt, sind die Möglichkeiten der vollautomatischen Segmentierung durch die Vielfalt auftretender Kombinationen geometrischer Grundelemente begrenzt. Derzeitige Lösungen lassen sich zusammenfassend als semi-automatische Auswerteverfahren bezeichnen. Hierbei greift der Anwender aktiv in die Auswertung ein und unterstützt den Segmentierungsalgorithmus. Dies kann beispielsweise durch die manuelle Platzierung von Saatpunkten beim Bereichswachstumsverfahren geschehen oder durch die Vorgabe, ob es sich bei der zu segmentierenden Region um einen Zylinder oder einen Kegel handelt. Weitere Eingriffe des Anwenders bestehen in der Anpassung der Algorithmen-Schwellwerte. So ist beispielsweise die Software Cyclone von Leica Geosystems in der Lage, den Verlauf einer Rohrleitung inklusive Knicken und Bögen weitestgehend automatisiert zu segmentieren. Das Ergebnis muss jedoch vom Anwender durch die gesetzten Saatpunkte und die Parametrisierung der Schwellwerte unterstützt werden.

7.2.3 Modellierung von Straßenfahrbahnen

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die automatische Objekterkennung bilden Mobile Mapping Systeme. Stellvertretend für eine Vielzahl von Anwendungsspektren wird an dieser Stelle die Modellierung von Straßenfahrbahnen beschrieben. Nach [Gräfe 2007] ermöglicht beispielsweise das System MoSES (Kapitel 3.3.2) die automatische Erkennung folgender Objekte:

- Störobjekte (z.B. andere Kraftfahrzeuge)
- Fahrbahnmittelachse, -ränder und -markierungen
- Fahrbahnoberfläche (digitales Oberflächenmodell)
 - o Position von Spurrillen und deren Tiefe
 - o Ermittlung der Fahrbahnneigung in Längs- und Querrichtung

Die Fahrbahnmittelachse kann beispielsweise aus den Informationen der Fahrbahnmarkierungen gewonnen werden, indem die Intensitätswerte der Lasertriangulationssensoren analysiert werden. Alternativ sind geometrische Informationen hinsichtlich der Bordsteine oder Asphaltkanten zu nutzen. Hindernisse auf der Fahrbahn werden durch Abgrenzung zur Fahrbahnoberfläche erkannt. Die Fahrbahnoberfläche weist auch bei unruhigem Verlauf, zum Beispiel Schlaglöchern oder Kopfsteinpflaster, insgesamt einen glatten, stetigen Verlauf auf. Abweichungen von der Fahrbahn sind damit als Unstetigkeitsstellen leicht erkennbar [Gräfe 2007].

Im Gegensatz zum System MoSES erfolgt die Bestimmung der Fahrbahnmittelachse beim System VISAT ausschließlich über bildgebende Systeme (Kapitel 3.3.2), wobei maßgeblich die Fahrbahnmarkierungen ausgewertet werden. Die Intensitätswerte eines Lasertriangulationssensors sind gegenüber den Aufnahmen einer Kamera vom Umgebungslicht weitestgehend unabhängig.

Die Messdaten der Kamera lassen sich dagegen auch bei nassen Fahrbahnoberflächen auswerten. In VISAT erfolgt die Segmentierung der Fahrbahnmarkierungen unter bestimmten Annahmen. Es wird hierbei unterstellt, dass die zu erkennenden Objekte stets linienhaft sind und in weißer oder gelber Farbe vorliegen sowie in einer genäherten Ebene liegen [Wang u.a. 2008].

8 Auswertung der Lasertriangulationssensoren beim RACER II

8.1 Stellung im Auswerteprozess

Das Gleisvermessungssystem RACER II führt die Bestimmung der Zielgrößen im SGM durch. Die Messdatenerfassung erfolgt somit statisch, wobei die einzelnen Sensoren innerhalb eines fest definierten Messzyklus ausgelesen und verarbeitet werden (Abbildung 8.1). Diese Verarbeitung umfasst die unmittelbare Auswertung der Sensordaten sowie den CAD-Vergleich mit der Trassierungssoftware. Die Dauer eines solchen Messzyklus hängt unter anderem von der Messgeschwindigkeit des Tachymeters ab, welches bei jeder Stationierung mindestens vier GVP erfasst.

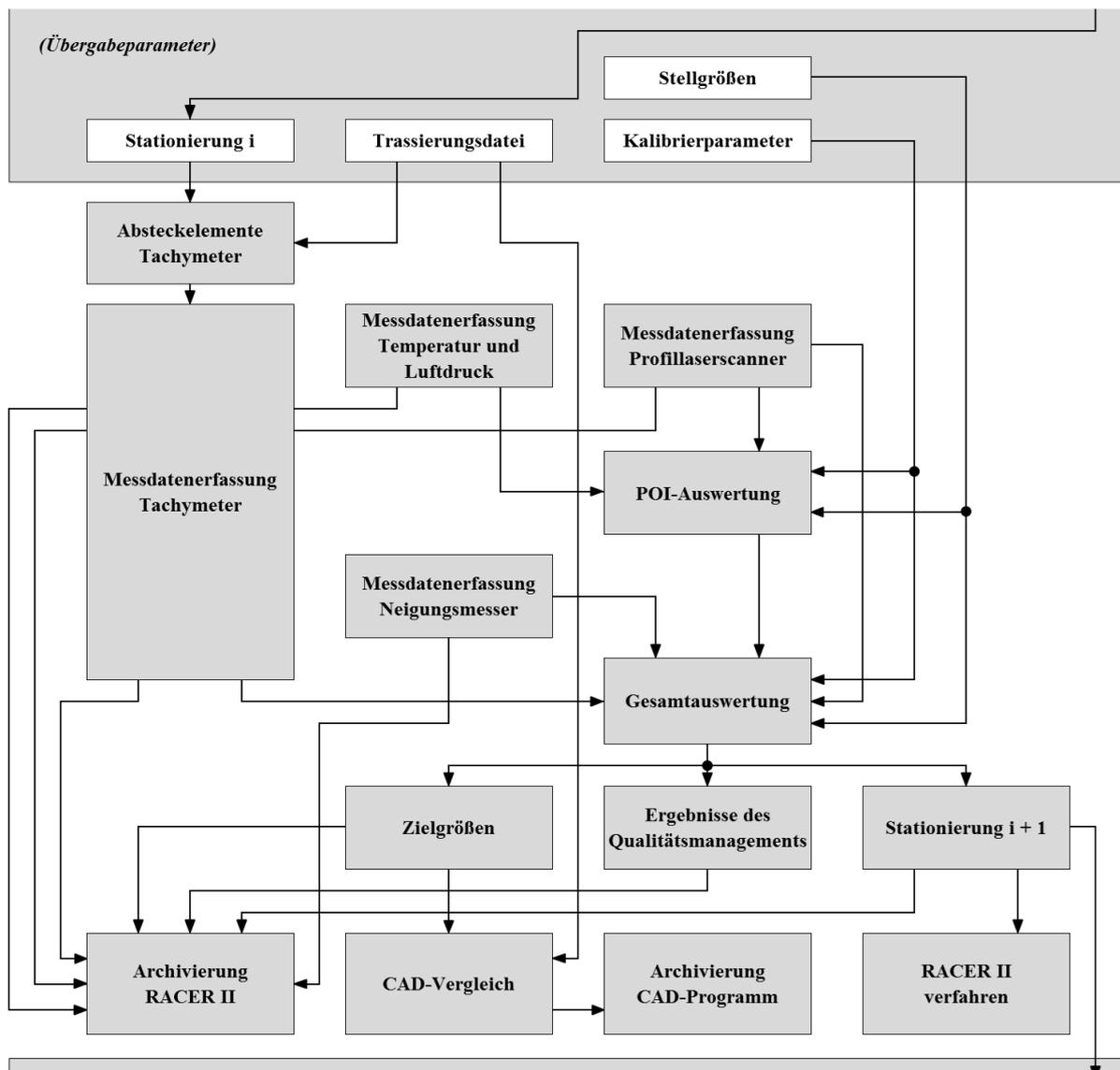


Abb. 8.1: Schematische Darstellung eines Messzyklus des RACER II

Bei fehlenden Sichtverbindungen oder Ausfällen durch Zerstörung müssen gegebenenfalls weitere GVP gemessen werden. Der Zeitbedarf einer Stationierung ist demnach nicht konstant. Der Ablauf der einzelnen Auswerteschritte ist durch die vertikale Anordnung der Arbeitsschritte in Abbildung 8.1 ersichtlich. Durch eine Stellgrößendatei (Anlage 8.1) können sowohl der Mess-

prozess als auch die Auswertung der Messdaten durch benutzerdefinierte Parameter gesteuert werden.

Die Abbildung 8.1 zeigt ferner die Einbindung des Messzyklus (weißer Hintergrund) in das übergeordnete Hauptprogramm (grauer Hintergrund). Das Hauptprogramm führt anfangs die Initialisierung der Sensoren durch und stellt alle notwendigen Informationen für den Messzyklus zusammen. Diese Informationen umfassen im Wesentlichen:

- Stationierung (Position innerhalb der Trasse)
- Trassierungsdatei (geometrische Informationen der Gleisführung)
- Stellgrößen (Steuerungsparameter für den Messzyklus)
- Kalibrierparameter (Kalibrierungen der MSS und der Sensormodule)

Zur erstmaligen Orientierung benötigt das Hauptprogramm die Stationierung $i = 1$ sowie eine Fahrtrichtungsangabe. Bei der Stationierung handelt es sich um die Angabe der fortlaufenden Kilometrierung der GMA in Metern. Die Information wird für die Ermittlung der Teilkreisrichtungen des Tachymeters für die Anzielung der zu messenden GVP auf Grundlage der Trassierungsdatei benötigt. Die Trassierungsdatei enthält sämtliche Informationen hinsichtlich Gleislage und -ausrichtung einschließlich der GVP-Koordinaten, auf deren Basis der CAD-Vergleich erfolgt. Abschließend wird aus den Ergebnissen der Gesamtauswertung die nachfolgende Stationierung $i + 1$ ermittelt und an den nächsten Messzyklus weitergegeben.

Die Stellgrößen werden in einer Textdatei definiert und enthalten diverse Parameter, über welche die Auswertung eines Messzyklus beeinflusst und den Bedingungen der gegenwärtigen Messsituation angepasst wird. Die Implementierung als Textdatei ermöglicht den zentralen und einfachen Zugang der Parameter außerhalb des Hauptprogramms, wobei verschiedene Konfigurationsdateien für unterschiedliche Messeinsätze erstellt werden können. Die Anlage 7.1 zeigt ein Beispiel für eine Stellgrößendatei.

Analog zur Stellgrößendatei werden die Kalibrierparameter in einer Textdatei definiert. Ein entsprechendes Beispiel ist in der Anlage 8.2 dargestellt. Der Vorteil einer Speicherung außerhalb des Hauptprogramms liegt in der einfachen Zugänglichkeit der Daten, was sich insbesondere bei wiederholten Kalibrierungen oder dem Austausch von Sensoren positiv auswirkt. Die Textdatei enthält sämtliche Kalibrierparameter der Sensoren (Kapitel 4), die Kalibrierparameter der Sensormodule innerhalb des MWS sowie die Definition des MWS selbst (Kapitel 5).

Ein Messzyklus umfasst drei wesentliche Arbeitsschritte:

- Messdatenerfassung
- unmittelbare Auswertung der Messdaten
- unmittelbarer CAD-Vergleich und Archivierung

Bei der Messdatenerfassung müssen die individuellen Messzeiten der Sensoren berücksichtigt werden. Aus Gründen der Zeitoptimierung muss die Messdatenerfassung parallel zu den Auswerteprozessen durchgeführt werden. So sollte beispielsweise die GVP-Vermessung mittels Tachymetrie schnellstmöglich beginnen, da dieser Vorgang die meiste Zeit beansprucht. Parallel können die Messdaten der Lasertriangulationssensoren erfasst und ausgewertet werden (POI-Auswertung, Kapitel 8.2). Das Inklinometer benötigt aufgrund seiner Bauart (Kapitel 3.4.3.3) eine Einschwingzeit, wodurch die Auslösung der Messung möglichst spät innerhalb des Messzyklus erfolgen sollte.

Für die Gesamtauswertung (Kapitel 8.3) werden sämtliche Messdaten eines Messprofils benötigt. Aus ihnen werden die nachfolgende Stationierung $i + 1$, die Zielgrößen der Gleisvermessung und die Ergebnisse für das Qualitätsmanagement (Kapitel 8.5) berechnet. Die Archivierung der Messdaten und Ergebnisse erfolgt in separaten Textdateien. Parallel wird der RACER II auf die neue Stationierung gefahren und der CAD-Vergleich gestartet (Kapitel 8.4). Die Ergebnisse des CAD-Vergleichs werden von der Trassierungssoftware in einer separaten Datei dokumentiert. Letztere kann vom Hauptprogramm des RACER II geöffnet und visualisiert werden, um dem Anwender die einzelnen Ablagen anzuzeigen.

8.2 POI-Auswertung

Das Kapitel 8.1 stellt schematisch den gesamten Auswerteprozess dar. Der Schwerpunkt der Dissertation liegt auf der Auswertung der Lasertriangulationssensoren und der Ableitung der Zielgrößen. In Abbildung 8.1 wird die Auswertung der Lasertriangulationssensoren unter der Bezeichnung POI-Auswertung zusammengefasst.

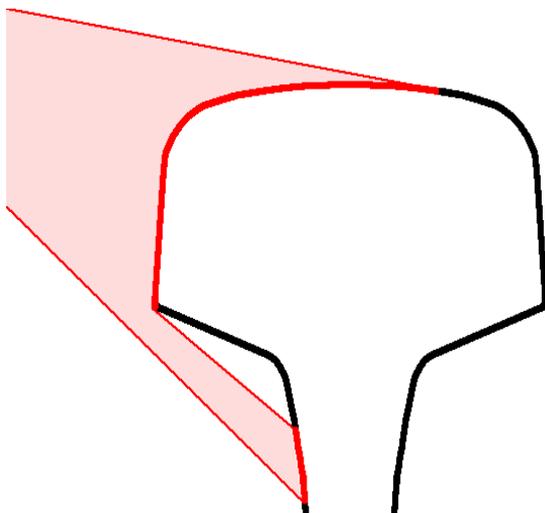


Abb. 8.2: Scanbereich des Lasertriangulationssensors

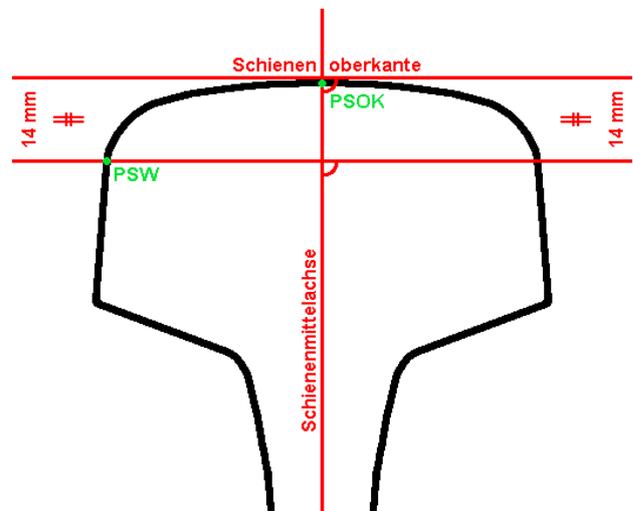


Abb. 8.3: Definition der Objektpunkte (PSOK und PSW)

Die Abbildung 8.2 zeigt den Scanbereich eines Lasertriangulationssensors hinsichtlich einer Vignolschiene vom Typ UIC 60 (Abbildung 9.2, Schientyp 3). Die Zielgrößen Längs- und Querneigung lassen sich über die Ausrichtung der Schienenoberkanten des Gleises im nivellierten Bezugssystem ermitteln. Gemäß der Abbildung 8.3 entspricht die Schienenoberkante dem Tangentialpunkt einer zur SMA orthogonalen Geraden. Dieser Punkt ist der Kontaktpunkt des

äußeren Radkranzes eines Schienenfahrzeugs mit der Schiene und wird im Folgenden als PSOK (Punkt Schienenoberkante) bezeichnet.

Durch Parallelverschiebung der Tangentialgeraden durch PSOK um einen definierten Betrag von 14 mm kann der Punkt PSW (Punkt Spurweite) ermittelt werden (Abbildung 8.3). Der PSW stellt den Schnittpunkt der parallelen Geraden mit dem Schienenprofil dar und entspricht dem Kontaktpunkt des inneren Radkranzes eines Schienenfahrzeugs mit der Schiene. Aufgrund des eingeschränkten Scanbereichs (Abbildung 8.2) sind Mehrdeutigkeiten bei der Bestimmung der PSW ausgeschlossen.

Das Gleisvermessungssystem RACER II verfügt über vier Lasertriangulationssensoren, so dass pro Lasertriangulationssensor ein PSOK und ein PSW ermittelt werden können. Die Summe aller PSOK und PSW wird als POI verstanden und repräsentiert jene Objektpunkte, die für die weitere Auswertung relevant sind.

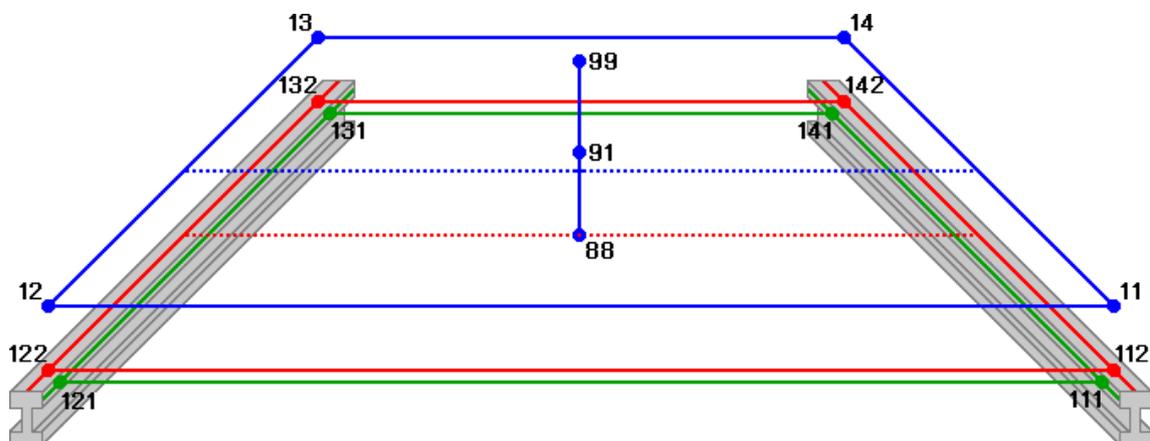


Abb. 8.4: Relative Lage der POI (PSOK = rot, PSW = grün) zum MWS (blau)

Die Abbildung 8.4 verdeutlicht die relative Lage der POI zum MWS. Das MWS ist über die PB 11 bis 14 definiert (Abbildung 6.13). Der Punkt 91 repräsentiert den Lotfußpunkt des Tachymeters innerhalb der Dreifußauflage und wird im Rahmen der Kalibrierung der Lasertriangulationssensoren bestimmt (Abbildung 6.10). Der Punkt 88 ergibt sich aus dem Koordinatenschwerpunkt der in der Abbildung 8.4 rot dargestellten PSOK (Punktnummern 112, 122, 132 und 142) und repräsentiert sowohl Lage- als auch Höhenkomponente der GMA bei der gegenwärtigen Stationierung. Aus den jeweils gegenüberliegenden PSOK (112-122 und 132-142) kann die Querneigung des Gleises berechnet werden. Die Längsneigung des Gleises ist aus den PSOK-Paaren entlang der GMA (112-142 und 122-132) zu berechnen. Die Spurweite lässt sich aus den jeweils gegenüberliegenden PSW (111-121 und 131-141) ermitteln. Für weitere Details zur Ermittlung der Zielgrößen wird auf das Kapitel 8.3 verwiesen.

Die Berechnung der Zielgrößen unter den zuvor genannten Bedingungen setzt eine symmetrische Verteilung der Lasertriangulationssensoren innerhalb des MWS voraus. Die Abbildung 8.5 zeigt den Einfluss einer unsymmetrischen Sensoranordnung auf die Berechnung der Spurweite, wobei der Abstand der Sensoren 1 und 4 in Richtung der GMA deutlich kleiner ist als der entsprechende Abstand der Sensoren 2 und 3. Die Ableitung der Spurweite SW_{Ist} aus der Raumstrecke der

Sensoren 3 und 4 führt zu einer Verlängerung gegenüber der Soll-Spurweite SW_{Soll} . Bei einer Basis von $SW_{Soll} = 1435$ mm beträgt für $SW_{Ist} = SW_{Soll} + 0,1$ mm der maximal zulässige Verschiebungsbetrag Δ_{SW} etwa 17 mm. Die Kalibrierwerte (Tabelle 6.7) weisen diesbezüglich eine Abweichung in der Y-Komponente von etwa 0,4 mm auf (vgl. Abbildung 3.3 f.). Der in Abbildung 8.5 dargestellte Einfluss der Sensoranordnung ist demnach beim RACER II ohne Relevanz.

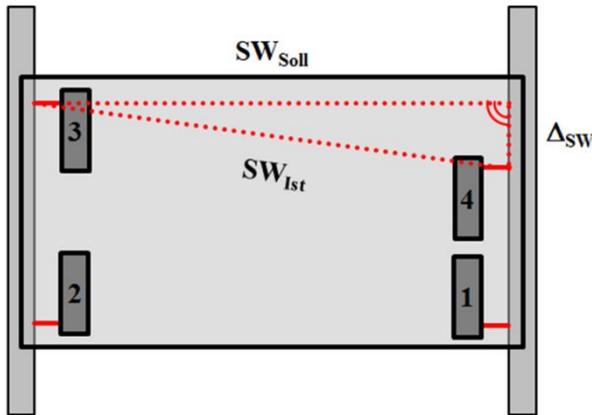


Abb. 8.5: Einfluss der Sensoranordnung auf die Berechnung der Spurweite

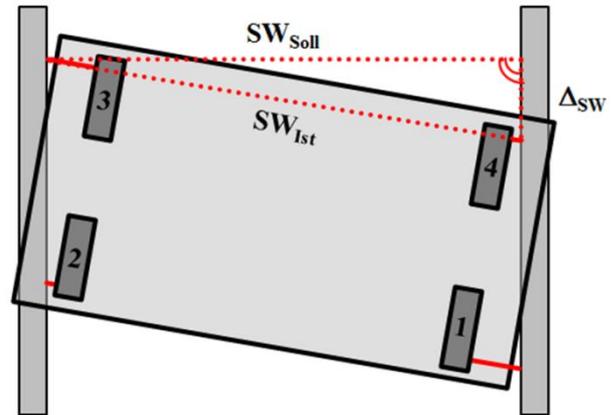


Abb. 8.6: Einfluss der Verdrehung des Gleismesswagens auf die Berechnung der Spurweite

Eine symmetrische Abweichung der Sensoranordnung quer zur GMA hat dagegen keinen Einfluss auf die Berechnung der Spurweite. Das Gleiche gilt für eine Verschiebung des Gleismessungssystems parallel zur GMA. Eine Verdrehung des RACER II um die Z-Achse des MWS führt dagegen zu einer Verlängerung der Spurweite (Abbildung 8.6). Dabei entspricht der maximal zulässige Verschiebungsbetrag Δ_{SW} dem aus Abbildung 8.5. Diesem potentiellen Einfluss wird durch die Montage von Führungsrollen entgegen gewirkt, wodurch Δ_{SW} durch mechanischen Zwang klein wird. Bei der Montage der Führungsrollen ist eine entsprechende Sorgfalt hinsichtlich der Einhaltung der Parallelität zur Y-Achse des MWS erforderlich. Zudem orientiert sich der RACER II während der Fahrt eigenständig mit zwei Führungsrollen an einer der Schieneninnenkanten. Wird zusätzlich darauf geachtet, dass der RACER II beim Einsetzen in das Gleis ein geringes Spiel der Führungsrollen aufweist, ist der in Abbildung 8.6 beschriebene Einfluss vernachlässigbar.

Für die Berechnung der GMA aus den PSOK gelten die vorangehenden Überlegungen entsprechend. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass zur Berechnung der Spurweite kein nivelliertes Bezugssystem erforderlich ist. Die Spurweite kann direkt aus den lokalen Koordinaten der PSW im MWS ermittelt werden, während die PSOK zuvor über die Messdaten des Tachymeters in das GVS transformiert werden müssen. Durch Netzspannungen des GVS lässt sich der in den Abbildungen 8.5 und 8.6 beschriebene potentielle Einfluss nicht mehr isolieren. Der Einfluss auf die Berechnung der Zielgrößen Längs- und Querneigung verhält sich entsprechend.

8.2.1 Aufbereitung der Messdaten

Der erste Schritt der POI-Auswertung (Abbildung 8.1) besteht in der Aufbereitung der Messdaten in folgenden Schritten:

- Mittelbildung aus mehreren Profilen
- geometrische Vorfilterung
- Intensitätswertfilterung

Bei der Messdatenerfassung der Lasertriangulationssensoren werden mehrere Profile gemessen, deren Anzahl in der Stellgrößendatei definiert ist (Anlage 8.1). Bei der Mittelbildung werden die korrespondierenden Profilpunkte jedes Profils geometrisch gemittelt (Median), wobei ein Profil immer aus etwa 290 Profilpunkten besteht. Aufgrund des SGM bleibt die Relation zwischen Sensor und Schienenoberfläche während der Messdatenerfassung nahezu konstant. Die Mittelwertbildung vermindert die Messunsicherheit des Lasertriangulationssensors.

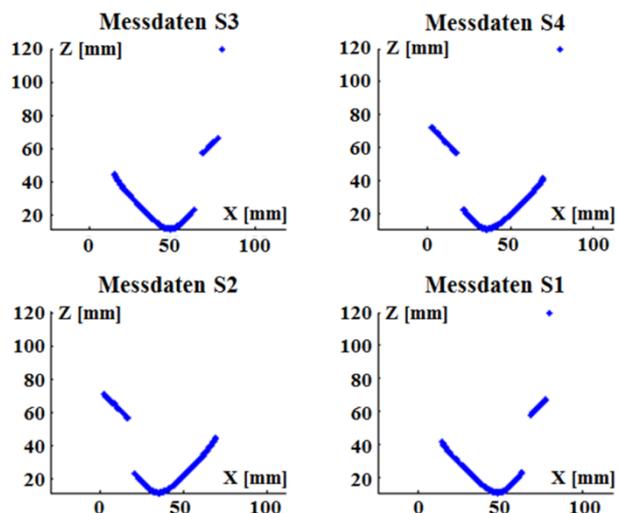


Abb. 8.7: Messdaten der Lasertriangulationssensoren in ihren originären Koordinatensystemen (PLS)

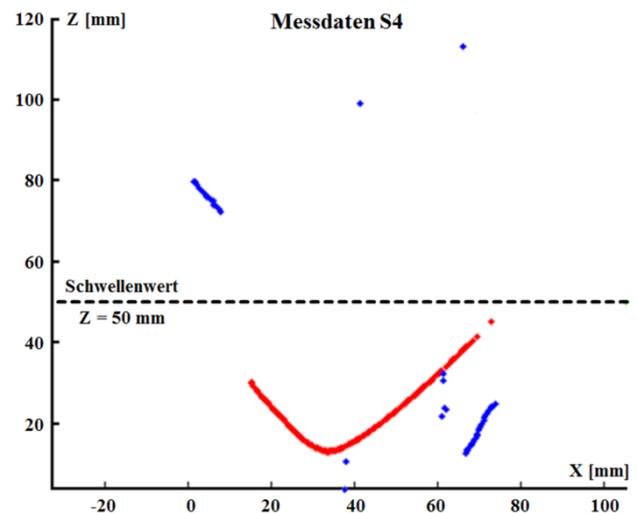


Abb. 8.8: Filterungstechniken zur Trennung der interessierenden Messdaten (rot) vom Rest (blau)

Die Abbildung 8.7 zeigt einen Datensatz des RACER II, wobei ein Messprofil mit vier Lasertriangulationssensoren erfasst wurde. Die Anordnung der Lasertriangulationssensoren entspricht den Abbildungen 3.3 und 3.4. Die Sensormodule haben eine unterschiedliche Anordnung innerhalb des MWS. Dennoch besteht bei allen PLS eine Gemeinsamkeit darin, dass sich die interessierende Schienenoberfläche unterhalb eines Schwellwerts in Z-Richtung der PLS befindet (Abbildung 8.8). Über eine Abfrage jedes Profilpunkts hinsichtlich seiner Z-Komponente kann die Datenmenge reduziert werden. Es verbleibt der in Abbildung 8.8 dargestellte Bereich unterhalb des Schwellwerts bei $Z = 50$ mm. Der Schwellwert selbst wird in der Stellgrößendatei definiert (Anlage 8.1) und hängt vom Schientyp und vom Abstand der Lasertriangulationssensoren zur Schienenoberfläche ab. Letzteres kann sich ändern, wenn die Radien der Laufräder des RACER II bei der Überquerung von Weichen vergrößert werden.

Fremdlichteinflüsse und reflektierende Oberflächenstrukturen können zu fehlerhaften Messungen führen, wodurch Profilpunkte außerhalb der Schienenoberfläche abgebildet werden. Die Abbildung 7.8 zeigt hierzu ein Beispiel (blaue Messdaten unterhalb des Schwellwertes), hervorgerufen durch direkte Sonneneinstrahlung auf die Schienenoberfläche (Kapitel 9.2). Charakteristisch für fehlerhaft abgebildete Profilpunkte ist ein geringer Intensitätswert. Die betroffenen

Messungen lassen sich über einen weiteren Schwellwert herausfiltern, der in der Stellgrößendatei definiert wird (Anlage 8.1). Um schneller auf wechselnde Messbedingungen reagieren zu können, kann der Schwellwert bereits während des Messeinsatzes vom Anwender durch einen Schieberegler auf der grafischen Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware des RACER II angepasst werden. Aufgrund spezieller Schutzblenden, welche die Fremdlichteinflüsse weitestgehend eliminieren (Kapitel 9.2), war bei keinem bislang durchgeführten Messeinsatz eine manuelle Anpassung dieses Schwellwerts erforderlich.

8.2.2 Modellierung der Messdaten über Teilpolynome

Die Ermittlung der POI (Kapitel 8.2.4) setzt eine Punktdichte der Schienenoberfläche voraus, die aufgrund der begrenzten Auflösung des Lasertriangulationssensors nicht erzeugt werden kann. Durch ein Approximationsverfahren kann die Punktdichte erhöht und gleichzeitig ein kontinuierlicher Verlauf der Schienenoberfläche erzielt werden, wobei die Messpunkte des Lasertriangulationssensors als Stützpunkte dienen.

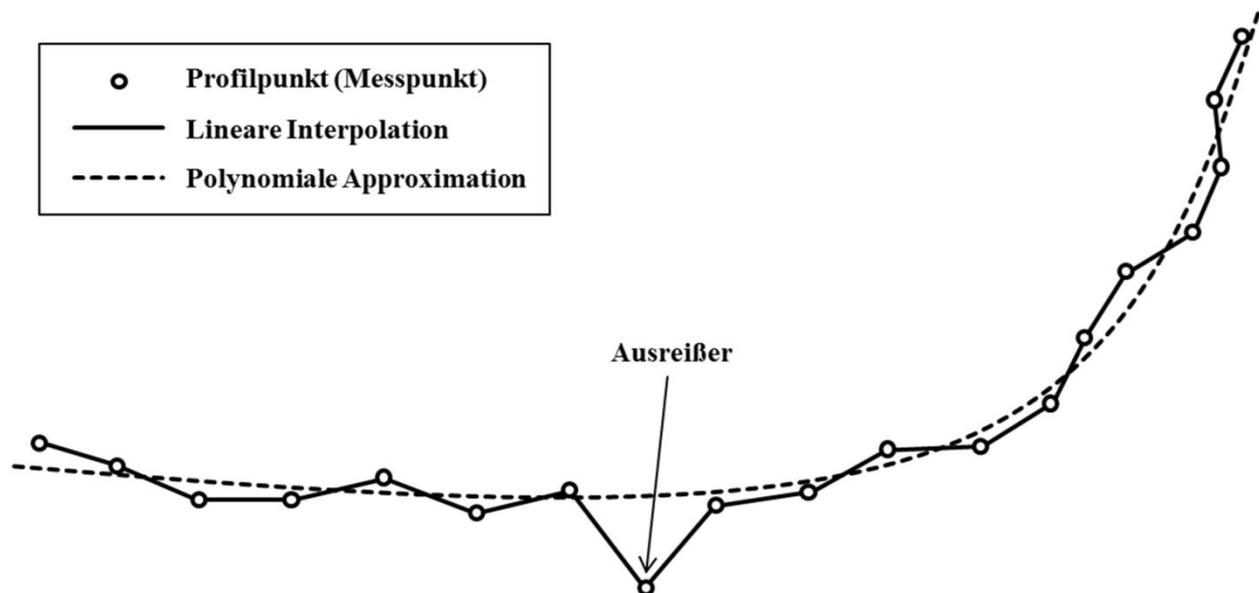


Abb. 8.9: Approximationsverfahren zur Erhöhung der Punktdichte der Schienenoberfläche

Die Abbildung 8.9 zeigt zwei Ansätze zur Erhöhung der Punktdichte der Schienenoberfläche. Bei einer linearen Interpolation wird die Punktdichte zwischen allen Stützpunkten geradlinig verdichtet. Das Verfahren ist mathematisch einfach und benötigt nur geringe Rechenzeiten. Nachteilig ist jedoch, dass Ausreißer und Lücken innerhalb der Messdaten die Modellierung der Schienenoberfläche negativ beeinflussen. Als Ausreißer werden einzelne Messwerte verstanden, deren Abstand zur Approximation einen definierten Schwellwert überschreitet. Dieser Schwellwert kann beispielsweise in der Stellgrößendatei definiert werden (Anlage 8.1).

Diese Nachteile können durch eine polynomiale Modellierung der Schienenoberfläche kompensiert werden. In der Abbildung 8.9 wird dargestellt, dass einzelne Ausreißer keinen erkennbaren Einfluss auf den Gesamtverlauf der Modellierung haben. Der Rechenaufwand ist jedoch höher und nicht alle geometrischen Formen wie beispielsweise Kanten lassen sich über Polynome ausreichend gut modellieren. Letzteres trifft im konkreten Fall der Schienenoberfläche nicht zu und

kann vernachlässigt werden. Ungeachtet dessen ist es schwierig, den Grad eines einzelnen Polynoms zu bestimmen, das den gesamten Schienenverlauf bestmöglich abbildet.

Eine Lösung stellt die Modellierung über Splines dar, der aus Teilpolynomen zusammengesetzt wird. Die Einführung von Restriktionen an den Knotenpunkten der Teilpolynome gewährleistet einen gleichförmigen Verlauf des Splines. Zunächst wird die zu modellierende Schienenoberfläche in mehrere Bereiche unterteilt. Für jeden Bereich wird eine separate polynomiale Modellierung durchgeführt, wobei die Anzahl der Bereiche von der Komplexität der zu modellierenden Oberflächenstruktur abhängt.

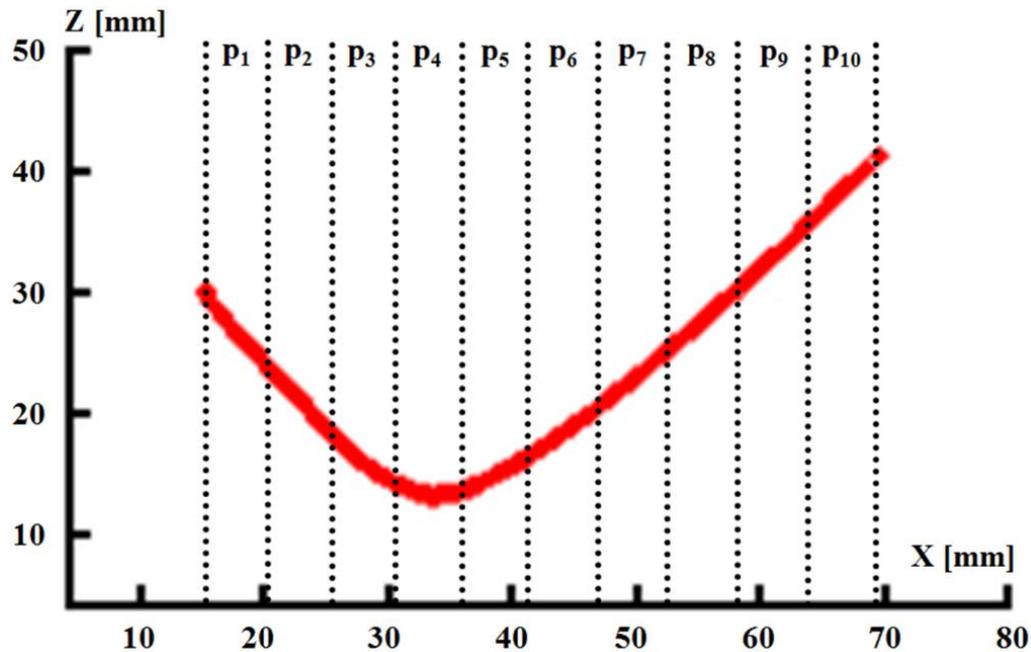


Abb. 8.10: Unterteilung der Schienenoberfläche in feste Intervalle

Abbildung 8.10 zeigt die Unterteilung der Schienenoberfläche in Intervalle p_i mit $i = 1, \dots, n$ hinsichtlich der X-Achse des PLS. Jedes Intervall bildet die Grundlage für ein Teilpolynom. Die Anzahl der Teilpolynome kann in der Stellgrößendatei definiert werden (Anlage 8.1). Die Anzahl der Profilpunkte innerhalb eines Intervalls beträgt allgemein $j = 1, \dots, m_i$. Beim RACER II werden feste Intervalle $\Delta\tau_x$ aus den X-Komponenten der gefilterten Profilpunkte τ_j gebildet:

$$\Delta\tau_x = \frac{\max(\tau_x) - \min(\tau_x)}{n} \quad (8.1)$$

Das Ergebnis zeigt die Abbildung 8.10. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass fehlende Messwerte oder gar zusammenhängende Lücken die Anzahl m_i für einzelne Intervalle soweit reduzieren können, dass eine polynomiale Modellierung nicht mehr möglich ist. Ein Polynom vom Grad b benötigt mindestens $b + 1$ Stützpunkte. Die Forderung kann alternativ zu (8.1) durch

$$\Delta\tau_{Anz.} = \frac{\text{Anzahl}(\tau)}{n} \quad (8.2)$$

erfüllt werden. Damit lassen sich selbst große Lücken in den Messdaten modellieren, die in Abbildung 8.10 mehrere Intervalle umfassen würden. Zusammenhängende Messlücken lassen sich durch die genannten Maßnahmen in Kapitel 8.2.1 vermeiden.

Die Abbildung 8.10 zeigt den typischen Verlauf einer Schienenoberfläche. Unter der Voraussetzung $m_i \geq 10$ lassen sich die einzelnen Intervalle durch Polynome dritten Grads ausreichend gut approximieren (kubischer Spline), inklusive lokaler Verformungen und Abnutzungserscheinungen. Es gilt:

$$f(\tau_{X,i,j}) = \tau_{Z,i,j} = a_{0,i} + a_{1,i}\tau_{X,i,j} + a_{2,i}\tau_{X,i,j}^2 + a_{3,i}\tau_{X,i,j}^3 - v_{i,j} \quad (8.3)$$

mit den Verbesserungen $v_{i,j}$ und den Parametern der Polynome $a_{0,i}, \dots, a_{3,i}$.

Restriktionen

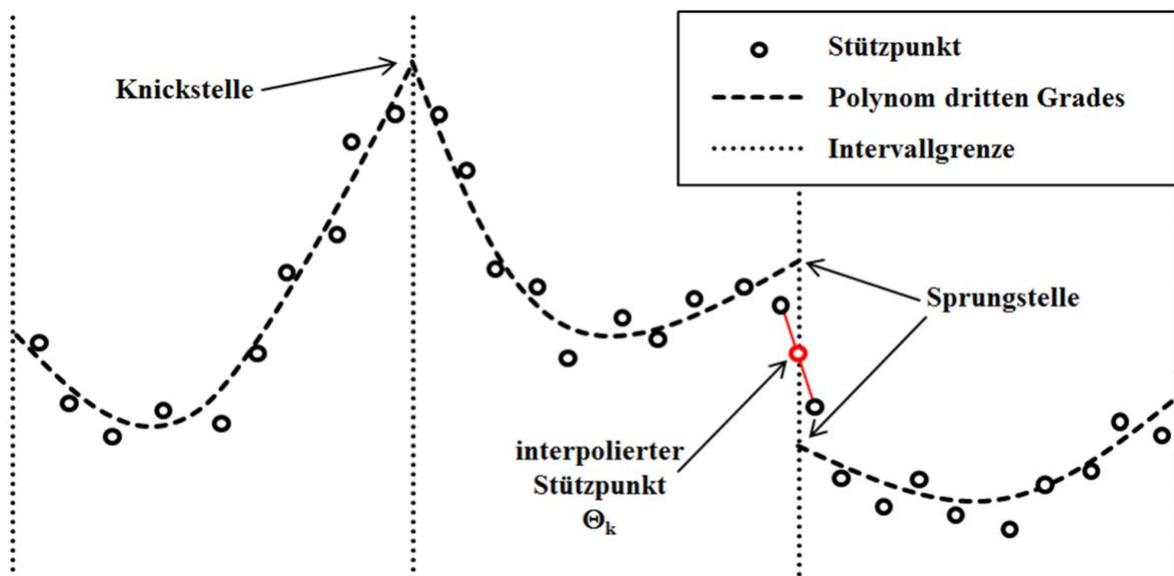


Abb. 8.11: Modellierung über Teilpolynome ohne Einführung von Restriktionen

Die Modellierung einer Messreihe über Teilpolynome erfordert die Einführung von Restriktionen. Andernfalls können die lokalen Anpassungen innerhalb eines Intervalls an deren Übergängen zu ungewünschten Abweichungen vom Gesamtverlauf der Messreihe führen. Die Abbildung 8.11 zeigt entsprechende Abweichungen schematisch am Beispiel einer Knickstelle und einer Sprungstelle. Diese Effekte lassen sich durch die Einführung von Stetigkeitsbedingungen eliminieren (Tabelle 8.1), [Schulze 2009].

Die Stetigkeitsbedingungen beziehen sich auf einen gemeinsamen Stützpunkt Θ_k mit $k = 1, \dots, n-1$ benachbarter Polynome. Θ_k wird durch einen Stützpunkt selbst oder durch lineare Interpolation benachbarter Stützpunkte realisiert (Abbildung 8.11, rote Darstellung). In beiden Fällen wird die Intervallgrenze durch Θ_k definiert, wodurch Θ_k in beiden angrenzenden Polynomen als Stützpunkt enthalten ist.

Bezeichnung	Herleitung	Auswirkung
C ₀ -Stetigkeit	$f_i(\tau_{X,i,\Theta_k}) = f_{i+1}(\tau_{X,i+1,\Theta_k})$	gleiche Punkte (keine Sprungstellen)
C ₁ -Stetigkeit	$f'_i(\tau_{X,i,\Theta_k}) = f'_{i+1}(\tau_{X,i+1,\Theta_k})$	gleiche Steigung (keine Knickstellen)
C ₂ -Stetigkeit	$f''_i(\tau_{X,i,\Theta_k}) = f''_{i+1}(\tau_{X,i+1,\Theta_k})$	gleiche Krümmung (keine Krümmungsänderungen)

Tab. 8.1: Stetigkeitsbedingungen für Splines

Die Tabelle 8.1 zeigt die für den RACER II verwendeten Stetigkeitsbedingungen. Die Sprungstellen (Abbildung 8.11) lassen sich durch Gleichsetzen der Funktionswerte an Θ_k vermeiden. Knickstellen (Abbildung 8.11) erfordern zusätzlich die Einführung der C₁-Stetigkeit, wodurch das Steigungsverhalten in Θ_k gleichgesetzt wird. Für die meisten Anwendungsfälle bei der Approximation einer Schienenoberfläche reichen diese Bedingungen aus, um einen gleichmäßigen Verlauf der Teilpolynome zu gewährleisten. Bei größeren Lücken kann es aufgrund fehlender Stützpunkte zu Ausschwingungen kommen. Dieser Effekt wird durch die Einführung der C₂-Stetigkeit verhindert.

Die Anwendung der Stetigkeitsbedingungen in Tabelle 8.1 auf (8.3) führt zu:

$$\begin{aligned} C_0: f_i(\tau_{X,i,\Theta_k}) &= f_{i+1}(\tau_{X,i+1,\Theta_k}) \\ \Rightarrow a_{0,i} + a_{1,i}\tau_{X,i,\Theta_k} + a_{2,i}\tau_{X,i,\Theta_k}^2 + a_{3,i}\tau_{X,i,\Theta_k}^3 &= a_{0,i+1} + a_{1,i+1}\tau_{X,i+1,\Theta_k} + a_{2,i+1}\tau_{X,i+1,\Theta_k}^2 + a_{3,i+1}\tau_{X,i+1,\Theta_k}^3 \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} C_1: f'_i(\tau_{X,i,\Theta_k}) &= f'_{i+1}(\tau_{X,i+1,\Theta_k}) \\ \Rightarrow a_{1,i} + 2a_{2,i}\tau_{X,i,\Theta_k} + 3a_{3,i}\tau_{X,i,\Theta_k}^2 &= a_{1,i+1} + 2a_{2,i+1}\tau_{X,i+1,\Theta_k} + 3a_{3,i+1}\tau_{X,i+1,\Theta_k}^2 \end{aligned} \quad (8.5)$$

$$\begin{aligned} C_2: f''_i(\tau_{X,i,\Theta_k}) &= f''_{i+1}(\tau_{X,i+1,\Theta_k}) \\ \Rightarrow 2a_{2,i} + 6a_{3,i}\tau_{X,i,\Theta_k} &= 2a_{2,i+1} + 6a_{3,i+1}\tau_{X,i+1,\Theta_k} \end{aligned} \quad (8.6)$$

Ausgleichung

Nach [Niemeier 2008] und [Schulze 2009] lassen sich Restriktionen in einem Ausgleichungsmodell wie folgt formulieren:

$$(\mathbf{B}_k \quad -\mathbf{B}_k) \cdot \begin{pmatrix} \tau_{i,\Theta_k} \\ \tau_{i+1,\Theta_k} \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (8.7)$$

Aus den Stetigkeitsbedingungen (8.4) bis (8.6) folgt daraus für

$$\mathbf{B}_k = \begin{pmatrix} 1 & \tau_{X,i,\Theta_k} & \tau_{X,i,\Theta_k}^2 & \tau_{X,i,\Theta_k}^3 \\ 0 & 1 & 2\tau_{X,i,\Theta_k} & 3\tau_{X,i,\Theta_k}^2 \\ 0 & 0 & 2 & 6\tau_{X,i,\Theta_k} \end{pmatrix} \text{ und } -\mathbf{B}_k = \begin{pmatrix} 1 & \tau_{X,i+1,\Theta_k} & \tau_{X,i+1,\Theta_k}^2 & \tau_{X,i+1,\Theta_k}^3 \\ 0 & 1 & 2\tau_{X,i+1,\Theta_k} & 3\tau_{X,i+1,\Theta_k}^2 \\ 0 & 0 & 2 & 6\tau_{X,i+1,\Theta_k} \end{pmatrix}. \quad (8.8)$$

\mathbf{B}_k und $-\mathbf{B}_k$ bilden die Bedingungsmatrizen für einen Intervallübergang am gemeinsamen Stützpunkt Θ_k . Die Gesamtmatrix \mathbf{B} für alle Θ_k setzt sich wie folgt zusammen:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_1 & -\mathbf{B}_1 & & & 0 \\ & \mathbf{B}_2 & -\mathbf{B}_2 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ 0 & & & \mathbf{B}_{n-1} & -\mathbf{B}_{n-1} \end{pmatrix} \text{ mit: } \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \mathbf{B}_1 & -\mathbf{B}_1 & & & \mathbf{0} \\ \hline & \mathbf{B}_2 & -\mathbf{B}_2 & & \\ \hline & & \ddots & \ddots & \\ \hline \mathbf{0} & & & \mathbf{B}_{n-1} & -\mathbf{B}_{n-1} \\ \hline \end{array} \quad (8.9)$$

Die Parameter eines Teilpolynoms werden nach (8.3) für jedes Intervall in der Designmatrix \mathbf{A}_i bestimmt, aus denen sich die Gesamtmatrix \mathbf{A} ableiten lässt:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \mathbf{A}_i & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & \mathbf{A}_n \end{pmatrix}, \text{ mit: } \mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 1 & \tau_{i,1} & \tau_{i,1}^2 & \tau_{i,1}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \tau_{i,j} & \tau_{i,j}^2 & \tau_{i,j}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \tau_{i,m_i} & \tau_{i,m_i}^2 & \tau_{i,m_i}^3 \end{pmatrix} \quad (8.10)$$

Auf der Grundlage von \mathbf{A} und \mathbf{B} werden die Parameter aller Teilpolynome in einer gemeinsamen Ausgleichung bestimmt (8.11). Dabei handelt es sich um ein um Restriktionen erweitertes Gauß-Markov-Modell

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (8.11)$$

[Niemeier 2008] mit den ausgeglichenen Parametern $\hat{\mathbf{x}}$, dem Korrelatenvektor \mathbf{k} und den Profilmerten τ im Beobachtungsvektor \mathbf{L} . Das stochastische Modell wird durch die Gewichtsmatrix

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{LL}^{-1} \text{ mit } \mathbf{Q}_{LL} = \frac{1}{\sigma_0^2} \boldsymbol{\Sigma}_{LL} = \mathbf{I} \quad (8.12)$$

repräsentiert. Ohne Kenntnisse über die Korrelationen zwischen den einzelnen Profilmerten wird unterstellt, dass alle τ_j als unkorreliert und gleichgewichtet betrachtet werden. Die Gewichtsmatrix \mathbf{P} entspricht damit der Einheitsmatrix \mathbf{I} . Die Vereinfachung an dieser Stelle ist vertretbar, da eine Messunsicherheitsanalyse nach GUM (Kapitel 5.4.2) nur mit unvertretbar hohem Aufwand durchgeführt und eine signifikante Verbesserung des stochastischen Modells sowie der Schätzergebnisse nicht erwartet werden kann.

Ungeachtet dessen muss der Einfluss von Ausreißern (Abbildung 8.11) auf die Ausgleichung der Teilpolynome eliminiert werden. Eine Möglichkeit stellt die Approximation der Schienenoberfläche durch drei Teilpolynome dritten Grads dar (Näherungsspline), wobei lediglich eine reduzierte Anzahl von Profilpunkten in die gemeinsame Ausgleichung eingehen. Die Profilpunkte können beispielsweise gleichverteilt innerhalb der Intervalle oder zufällig mittels RANSAC-Algorithmus (Kapitel 7.1.1) ausgewählt werden. Die Identifikation eines Ausreißers basiert auf der Bewertung des orthogonalen Abstands eines Profilpunkts zum Näherungspolynom. Näheres hierzu wird in Kapitel 8.2.3 vertieft.

Rasterbildung

Bei der Ermittlung der POI in Kapitel 8.2.4 werden im Wesentlichen Schnittpunkte aus Geraden mit der Schienenoberfläche gebildet. Die explizite Berücksichtigung der einzelnen Polynomfunktionen ist mathematisch aufwendig, insbesondere weil mehrere Teilpolynome berücksichtigt und entsprechende Fallunterscheidungen durchgeführt werden müssen. Zudem erfordert die POI-Ermittlung die vorherige Transformation des Splines in das MWS (vgl. (6.8)). Durch ein repräsentatives Approximationsverfahren lässt sich sowohl die mathematische Komplexität als auch die erforderliche Rechenzeit reduzieren.

Mit Hilfe der ausgeglichenen Parameter der Teilpolynome wird ein gleichmäßiges Punktraster erzeugt (Rasterbildung), das dem Verlauf der Teilpolynome entspricht. Die entstehende Punktmenge wird fortan als $\mathbf{L}_{R,PLS,k}$ bezeichnet für $k = 1, \dots, 4$ Lasertriangulationssensoren und $l = 1, \dots, y$ (gerasterte) Profilpunkte. Die Rasterweite wird in der Stellgrößendatei (Anlage 8.1) definiert und richtet sich nach der erforderlichen Genauigkeit der Zielgrößen. Ein engmaschiges Raster erhöht die Anzahl der Rasterpunkte und damit den Rechenaufwand bei der Auswertung. Als Grundeinstellung wird daher eine Rasterweite $\Delta_{RW} = 0,1$ mm in X-Richtung des PLS verwendet.

Zur mathematisch exakten Bestimmung des orthogonalen Abstands eines Punkts $\mathbf{P} = \{P_x, P_y\}$ zu einem Polynom (direkte Methode) muss die Forderung

$$\begin{aligned} d_{P,Q} &= \sqrt{(Q_x - P_x)^2 + (Q_y - P_y)^2} \rightarrow \min. \\ \Leftrightarrow d_{P,Q}^2 &= (Q_x - P_x)^2 + (Q_y - P_y)^2 \\ \Leftrightarrow d_{P,Q}^2 &= Q_x^2 - 2Q_x P_x + P_x^2 + Q_y^2 - 2Q_y P_y + P_y^2 \end{aligned} \quad (8.13)$$

erfüllt werden, wobei $\mathbf{Q} = \{Q_x, Q_y\}$ ein beliebiger Punkt des Polynoms und $d_{P,Q}$ der euklidische Abstand des Punktpaars P,Q ist. Die Komplexität der folgenden Formeln hängt vom Grad des Teilpolynoms ab. Die Auswertesoftware des RACER II verwendet im Regelfall Teilpolynome dritten Grades:

$$Q_y = a_0 + a_1 Q_x + a_2 Q_x^2 + a_3 Q_x^3 \quad (8.14)$$

Das Einsetzen von (8.14) in (8.13) führt zu

$$\begin{aligned}
 d_{P,Q}^2 &= Q_x^2 - 2Q_x P_x + P_x^2 + (a_0 + a_1 Q_x + a_2 Q_x^2 + a_3 Q_x^3)^2 \\
 &\quad - 2(a_0 + a_1 Q_x + a_2 Q_x^2 + a_3 Q_x^3) P_y + P_y^2 \\
 &= Q_x^2 - 2Q_x P_x + P_x^2 + a_0^2 + 2a_0 a_1 Q_x + 2a_0 a_2 Q_x^2 + a_1^2 Q_x^2 \\
 &\quad + 2a_0 a_3 Q_x^3 + 2a_1 a_2 Q_x^3 + 2a_1 a_3 Q_x^4 + a_2^2 Q_x^4 + 2a_2 a_3 Q_x^5 \\
 &\quad + a_3^2 Q_x^6 - 2a_0 P_y - 2a_1 Q_x P_y - 2a_2 Q_x^2 P_y - 2a_3 Q_x^3 P_y + P_y^2 \\
 &= a_0^2 + P_x^2 - 2a_0 P_y + P_y^2 + (2a_0 a_1 - 2a_1 P_x - 2P_x) Q_x \\
 &\quad + (1 + a_1^2 + 2a_0 a_2 - 2a_2 P_y) Q_x^2 + (2a_0 a_3 + 2a_1 a_2 - 2a_3 P_y) Q_x^3 \\
 &\quad + (a_2^2 + 2a_1 a_3) Q_x^4 + 2a_2 a_3 Q_x^5 + a_3^2 Q_x^6
 \end{aligned} \tag{8.15}$$

(8.15) berechnet den beliebigen Abstand eines Punkts \mathbf{P} zum Polynom. Der gesuchte orthogonale Abstand ist gleichzeitig der kürzeste Abstand d_{\min} von \mathbf{P} gegenüber dem Teilpolynom entsprechend Abbildung 8.10. Q_x von d_{\min} lässt sich dann mittels Nullstellensuche der ersten Ableitung von (8.15) berechnen:

$$\begin{aligned}
 Q_x(d_{\min}) &= 4(a_0 a_1 - a_1 P_x - P_x) + 4\left(\frac{1}{2} + a_1^2 + a_0 a_2 - a_2 P_y\right) Q_x \\
 &\quad + 6(a_0 a_3 + a_1 a_2 - a_3 P_y) Q_x^2 + 4(a_2^2 + 2a_1 a_3) Q_x^3 \\
 &\quad + 10a_2 a_3 Q_x^4 + 6a_3^2 Q_x^5 \\
 &\stackrel{!}{=} 0
 \end{aligned} \tag{8.16}$$

Die Berechnung nach (8.16) muss für jeden Profilpunkt τ_j separat durchgeführt werden und benötigt etwa dreimal so viel Rechenzeit wie das nachfolgende Näherungsverfahren. Der Mehraufwand der Rechenzeit hängt mit der verwendeten MatLab-Funktion zur automatischen Nullstellensuche zusammen. Das alternative Näherungsverfahren basiert auf der gerasterten Punktwolke der ausgeglichenen Teilpolynome \mathbf{L}_{R,PLS,k_l} , wobei lediglich der kleinste, euklidische Abstand d_{\min} eines Profilpunkts τ_j zur Punktmenge \mathbf{L}_{R,PLS,k_l} ermittelt wird. d_{\min} entspricht zwar nicht dem orthogonalen Abstand, die maximale Abweichung Δ_{\max} beträgt jedoch nur die Hälfte der gewählten Rasterweite Δ_{RW} .

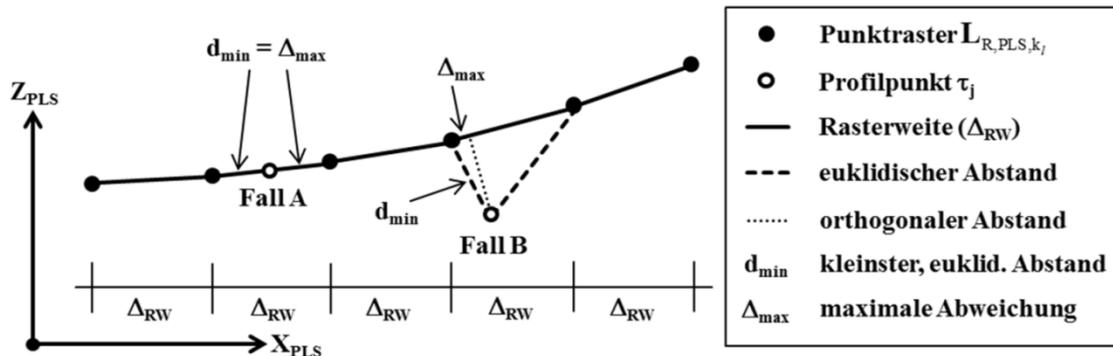


Abb. 8.12: Abweichung des Näherungsverfahrens gegenüber der direkten Methode

Die Abbildung 8.12 gibt die maximale Abweichung des Näherungsverfahrens gegenüber der direkten Methode wieder. „Fall A“ zeigt eine Situation, bei der τ_j gleichzeitig der Mittelpunkt der beiden nächstgelegenen Rasterpunkte L_{R,PLS,k_j} ist. Der orthogonale Abstand ist hier nahe Null, d.h. τ_j liegt nahezu innerhalb des Polynoms selbst. Der ermittelte euklidische Abstand ist dagegen d_{\min} und entspricht in diesem Fall $\Delta_{\max} \approx \frac{1}{2} \Delta_{RW}$. Die maximale Abweichung Δ_{\max} beträgt demnach etwa der halben Rasterweite Δ_{RW} . Wird Δ_{RW} signifikant unterhalb der angestrebten Messgenauigkeit des Gleisvermessungssystems definiert, wirkt sich der Einfluss des Näherungsverfahrens nicht aus. Zudem repräsentiert „Fall A“ den Extremfall. „Fall B“ veranschaulicht dagegen eine Situation, wie sie im Regelfall auftritt ($\Delta_{\max} \ll \frac{1}{2} \Delta_{RW}$).

8.2.3 Vergleich der Messdaten mit einer Soll-Geometrie

Ausreißer können bei der Ausgleichung der Teilpolynome als Hebelbeobachtungen wirken und müssen vorab eliminiert werden. Ergänzend zu den in Kapitel 8.2.2 vorgestellten Verfahren können Informationen der Soll-Geometrie einer Schienenoberfläche genutzt werden, wobei die Soll-Geometrie über einen iterativen Prozess bestmöglich an Position und Orientierung des Messprofils angepasst wird („Best Fit“, BF). Ausreißer lassen sich durch eine Schwellwertüberschreitung bei der geometrischen Abstandsfilterung der einzelnen Profilpunkte zur Soll-Geometrie identifizieren. Auf die Vorfilterung der Profilpunkte über einen Intensitätsschwellwert (Kapitel 8.2.1) kann an dieser Stelle verzichtet werden. Das folgende Verfahren lässt sich in vier wesentliche Arbeitsschritte unterteilen:

1. Transformation der Profilpunkte ins MWS
2. BF-Algorithmus mit einem Freiheitsgrad (1 DoF-BF)
3. BF-Algorithmus mit drei Freiheitsgraden (3 DoF-BF)
4. geometrische Abstandsfilterung

Das Verfahren basiert auf dem Vergleich der Messdaten L_τ mit der Soll-Geometrie einer Schienenoberfläche, welche in der Regel aus CAD-Daten (Planung, Konstruktion) abgeleitet wird. Stehen diese Daten nicht zur Verfügung, können sie alternativ aus der Vermessung eines Musterstücks abgeleitet werden. In beiden Fällen wird die Soll-Geometrie in eine Punktwolke L_{Ref} überführt (vgl. Rasterbildung in Kapitel 8.2.2), welche die Datengrundlage für den BF-Algorithmus bildet.

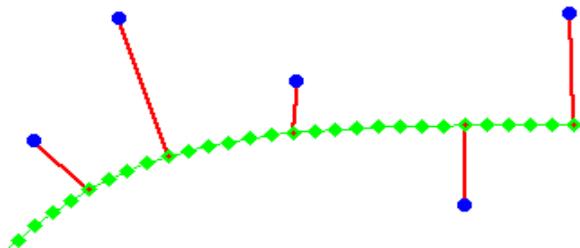


Abb. 8.13: Bildung der Punktpaare mittels ICP-Algorithmus (blau: Profilpunkte L_τ , grün: Soll-Profilpunkte L_{Ref} , rot: kürzester Abstand zwischen den betreffenden Punkten)

Der folgende BF-Algorithmus ist eine Variante eines ICP-Algorithmus (iterative closest point), bei dem die Abstände der Punktwolken \mathbf{L}_τ und \mathbf{L}_{Ref} über Koordinatentransformationen iterativ minimiert werden. Näheres zum ICP-Algorithmus kann beispielsweise in [Kapoutsis u.a. 1999], [Stewart u.a. 2003], [Chetverikov u.a. 2005] und [Minguez u.a. 2006] nachgeschlagen werden. Bei der hier vorgestellten Variante wird für jeden Punkt aus \mathbf{L}_τ der jeweils nächstgelegene Punkt aus \mathbf{L}_{Ref} bestimmt (Abbildung 8.13). \mathbf{L}_τ besteht dabei aus $r = 1, \dots, v$ und \mathbf{L}_{Ref} aus $s = 1, \dots, w$ Punkten. Die einzelnen Abstände

$$d_t = \sqrt{\left(L_{X,\text{Ref}_s} - L_{X,\tau_r}\right)^2 + \left(L_{Z,\text{Ref}_s} - L_{Z,\tau_r}\right)^2}, \text{ mit: } t = 1, \dots, v \cdot w \quad (8.17)$$

führen zu $v \cdot w$ Kombinationen, aus denen v Punktpaare gebildet werden, deren zugehörige d_t ein absolutes Minimum aufweisen (d_{\min}).

Damit der Algorithmus konvergieren kann, muss ein zusätzlicher Schwellwert d_{\max} eingeführt werden, der die Auswahl der in Frage kommenden Profilpunkte aus \mathbf{L}_τ begrenzt. Die Abbildung 8.14 zeigt, dass die dargestellte Punktgruppe nahe der Z-Achse unberücksichtigt bleibt, weil sie sich außerhalb von d_{\max} befindet. Bei jeder Iteration des BF-Algorithmus wird d_{\max} um einen einstellbaren Prozentsatz reduziert (dynamischer Schwellwert d_{\max}), so dass kontinuierlich weniger Ausreißer berücksichtigt werden.

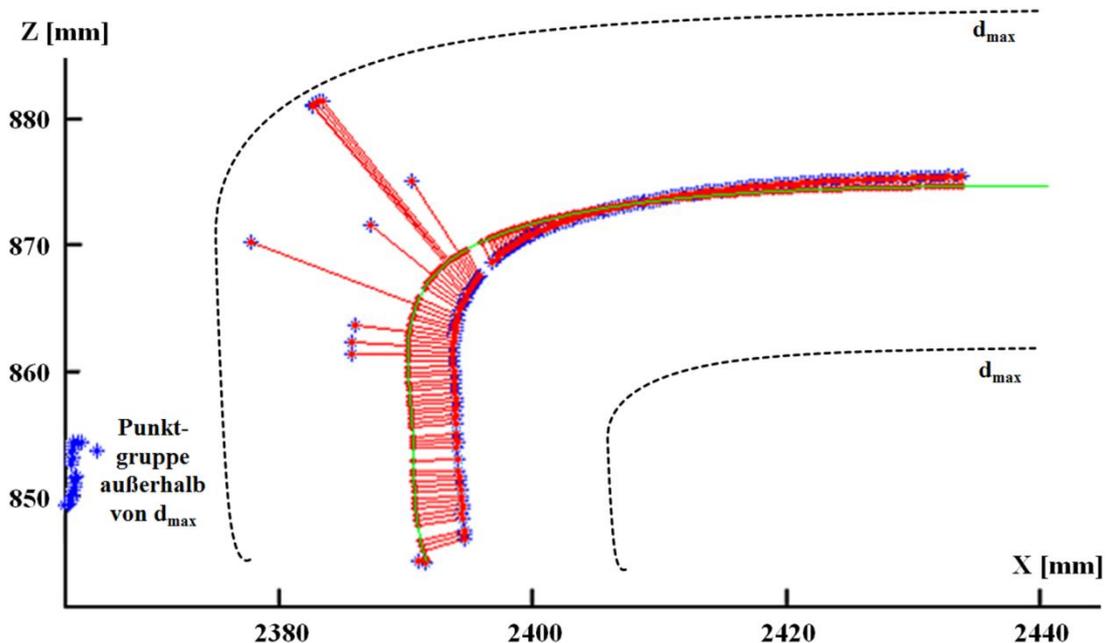


Abb. 8.14: Umsetzung des ICP-Algorithmus beim RACER II (Farbgebung wie in Abbildung 8.13)

Alternativ kann d_{\max} statistisch über Ausreißertests angepasst werden. Ferner können die minimalen Abstände d_{\min} in einem Histogramm ausgewertet werden, wobei deren größten Beträge unberücksichtigt bleiben, sofern ihre Häufigkeit einen bestimmten Schwellwert unterschreitet. Bei dieser Methode müssen die Abstände d_{\min} zuvor klassifiziert werden.

Von der Einführung eines konstanten Schwellwerts d_{\max} ist abzuraten, da die Ausgangslage des Soll-Profiles in Relation zum tatsächlichen Messprofil variieren kann. Ursächlich hierfür ist ins-

besondere der verbleibende Spielraum zwischen den Führungsrollen des Gleisvermessungssystems und den Schieneninnenkanten. Dadurch kommt es zu einer Translation des Soll-Profiles gegenüber dem gemessenen Profil in X-Richtung des MWS. Vor diesem Hintergrund wird vorab der 1 DoF-BF durchgeführt, bei dem lediglich die Translation X_0 als Parameter bestimmt wird. Der Parametervektor \mathbf{X} entspricht damit

$$\mathbf{X} = (X_0). \quad (8.18)$$

Dies ermöglicht eine optimale Vorausrichtung des Soll-Profiles gegenüber dem gemessenen Profil sowie eine Reduktion des Schwellwerts d_{\max} . Es folgt die exakte Ausrichtung des Soll-Profiles durch den 3 DoF-BF, bei dem als Parameter die Translationen in X und Z (X_0 und Z_0), sowie die Rotation um Y (φ) bestimmt werden. Analog zu (8.18) entspricht der Parametervektor \mathbf{X} für den 3 DoF-BF

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ \varphi \end{pmatrix}. \quad (8.19)$$

Beim Verzicht auf die Vorausrichtung mittels 1 DoF-BF besteht die Gefahr, dass das Soll-Profil anfangs zu stark um φ rotiert und der Algorithmus fehlerhaft konvergiert. Dies hängt insbesondere von der Anzahl und der Verteilung der Ausreißer ab. Beide BF-Algorithmen basieren auf dem GHM mit dem funktionalen Zusammenhang

$$f(\mathbf{X}, \mathbf{L}_r, \mathbf{L}_{\text{Ref}}) = \mathbf{0}. \quad (8.20)$$

Im konkreten Fall kann (8.20) wie folgt ergänzt werden:

$$\begin{aligned} f_{d,r} &= \sqrt{(f_{t,r}(X_{t,r}) - X_{\text{Ref},r})^2 + (f_{t,r}(Z_{t,r}) - Z_{\text{Ref},r})^2} = 0 \\ \Leftrightarrow & (f_{t,r}(X_{t,r}) - X_{\text{Ref},r})^2 + (f_{t,r}(Z_{t,r}) - Z_{\text{Ref},r})^2 = 0, \end{aligned} \quad (8.21)$$

wobei die Abstände aller Punktpaare $r = 1, \dots, v$ minimiert werden müssen. Die Y-Komponente der Koordinaten kann hierbei vernachlässigt werden, da es sich ausschließlich um eine zweidimensionale Fragestellung innerhalb in der X-Z-Ebene des MWS handelt. Innerhalb von (8.21) gilt für die Transformation der gemessenen Profilpunkte:

$$\begin{aligned} 1 \text{ DOF-BF} : \begin{pmatrix} X_{t,r} \\ Z_{t,r} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} X_0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{\text{Ref},r} \\ Z_{\text{Ref},r} \end{pmatrix} \\ \Rightarrow f_{t,r}(X_{t,r}) &= X_0 + X_{\text{Ref},r} \\ \Rightarrow f_{t,r}(Z_{t,r}) &= Z_{\text{Ref},r} \end{aligned} \quad (8.22)$$

$$\begin{aligned}
3 \text{ DOF-BF} : \begin{pmatrix} X_{t,r} \\ Z_{t,r} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} X_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{\text{Ref},r} \\ Z_{\text{Ref},r} \end{pmatrix} \\
\Rightarrow f_{t,r}(X_{t,r}) &= X_0 + X_{\text{Ref},r} \cos(\varphi) - Z_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) \\
\Rightarrow f_{t,r}(Z_{t,r}) &= Z_0 + X_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) + Z_{\text{Ref},r} \cos(\varphi)
\end{aligned} \tag{8.23}$$

Das Einsetzen von (8.22) bzw. (8.23) in (8.21) ergibt:

$$1 \text{ DOF-BF} : f_{d,r} = (X_0 + X_{\text{Ref},r} - X_{\tau,r})^2 + (Z_{\text{Ref},r} - Z_{\tau,r})^2 = 0 \tag{8.24}$$

$$\begin{aligned}
3 \text{ DOF-BF} : f_{d,r} &= (X_0 + X_{\text{Ref},r} \cos(\varphi) - Z_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) - X_{\tau,r})^2 \\
&+ (Z_0 + X_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) + Z_{\text{Ref},r} \cos(\varphi) - Z_{\tau,r})^2 = 0.
\end{aligned} \tag{8.25}$$

Die Lösung des GHM entspricht der Vorgehensweise in Kapitel 5.4.3. Die partiellen Ableitungen der Designmatrix \mathbf{A} sind in Anlage 8.3 und die der Bedingungsmatrix \mathbf{B} in Anlage 8.4 dokumentiert.

Die Einbeziehung von Informationen über die Soll-Geometrie der Schienenoberfläche ermöglicht eine zuverlässige Ausreißerdetektion, insbesondere bei Profilmessungen, die eine hohe Anzahl an Fehlmessungen enthalten. Darüber hinaus bietet die vorgestellte Methode einen Ansatz für die Analyse der Schienenabnutzung. Abbildung 8.15 zeigt, wie beispielsweise die Abnutzungsfläche bestimmt werden kann, indem die Flächen unterhalb des Soll-Profiles (F_S) und jene unterhalb des Messprofils (F_M) subtrahiert werden. F_S und F_M werden jeweils aus der Summe der Trapezflächen benachbarter Stützpunkte gebildet, wobei im Soll-Profil zwei zusätzliche Punkte A und E durch lineare Interpolation bestimmt werden müssen. Durch lineare Interpolation können auch vertikale Abnutzungsdifferenzen ΔH an beliebigen Stellen der Schienengeometrie bestimmt werden.

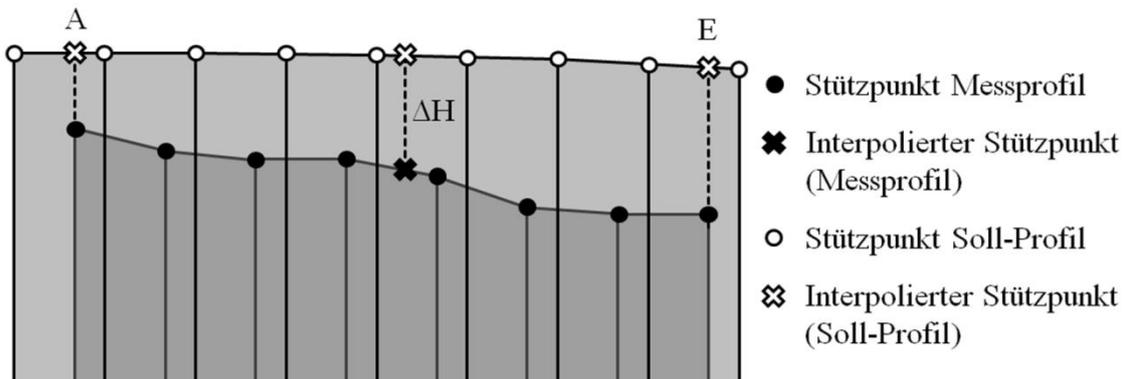


Abb. 8.15: Beispiele zur Analyse der Schienenabnutzung

Nachteilig bei der Einbeziehung der Soll-Geometrie der Schienenoberfläche ist jedoch, dass die Ausrichtung zwischen CAD-Modell und Profildaten vorab definiert werden muss. Andernfalls führen großflächige Abnutzungen dazu, dass sich das CAD-Modell der Abnutzung anschmiegt und lediglich kleinflächige Schadstellen aufgedeckt werden. Die gegenseitige Ausrichtung muss

über Schienenbereiche erfolgen, die von der Abnutzung nicht betroffen sind. Der in Abbildung 7.5 dargestellte Scanbereich der Lasertriangulationssensoren zeigt, dass auch ein Teil des Schienenfußes mit erfasst wird. Weitere Untersuchungen sind ratsam, ob dieser Bereich für die gegenseitige Ausrichtung von CAD-Modell und Profildaten genutzt werden kann.

Ferner muss der hohe Rechenaufwand durch die iterativen BF-Algorithmen berücksichtigt werden. Die Recheneinheit des RACER II benötigt für insgesamt 8 Iterationen (3 x 1 DoF-BF und 5 x 3 DoF-BF) und vier Lasertriangulationssensoren etwa 35 Sekunden. Vor diesem Hintergrund ist die Anwendung während des laufenden Messeinsatzes nicht praktikabel, da sich die Standzeit des Gleisvermessungssystems um 12 - 15 Sekunden verlängert. Die in Kapitel 8.2.1 vorgestellte Intensitätswertfilterung ist wesentlich effizienter und in Kombination mit den Schutzblenden (Kapitel 9.2) vollkommen ausreichend.

Für die Analyse der Schienenabnutzung kann auf die Stationierung des Gleisvermessungssystems mittels Tachymetrie verzichtet werden. Hier wäre eine kinematische Messdatenerfassung über die Lasertriangulationssensoren möglich. Die Auswertung der Messdaten kann im Nachgang der Messung erfolgen, so dass der erhöhte Rechenaufwand kein Problem darstellt. Folgende Aspekte sind noch näher zu untersuchen:

- Genauigkeitsanforderungen an die Positionierung
(ggf. reichen die Informationen der Anfangsstationierung und des zurückgelegten Wegs aus den Daten der Motorsteuerung nicht aus und es müssen zwischenzeitlich weitere Messungen durchgeführt werden)
- Genauigkeitsverlust eines gemessenen Profils während der Fahrt
(hängt insbesondere von der Oberflächenstruktur der Schiene und von der Fahrtgeschwindigkeit des Gleisvermessungssystems ab)
- räumliche Verzerrung des gemessenen Profils in Fahrtrichtung
(hängt insbesondere von der Messfrequenz des Lasertriangulationssensors und der Fahrtgeschwindigkeit des Gleisvermessungssystems ab)
- Ermittlung der maximalen Fahrtgeschwindigkeit des Gleisvermessungssystems
(bei Einhaltung aller Anforderungen einschließlich Synchronisation)

8.2.4 Ermittlung der POI

Ausgehend von den Ergebnissen aus Kapitel 8.2.3 erfordert die Ermittlung der POI die Transformation der aus Polynomfunktionen gerasterten Profilpunkte \mathbf{L}_{R,PLS,k_j} in das MWS (vgl. (6.8)). Dadurch liegen alle Profilpunkte \mathbf{L}_{R,MWS,k_j} bereits näherungsweise parallel zur Schienenoberkannte vor. Gleichzeitig verlaufen die SMA näherungsweise parallel zur Z-Achse des MWS. Aufgrund dieser Eigenschaft kann eine Punktemenge entlang der Schieneninnenkannte \mathbf{L}_{SIK} über einen Filterbereich aller Profilpunkte \mathbf{L}_{R,MWS,k_j} hinsichtlich der Z-Komponente isoliert werden. Der Filterbereich wird in der Stellgrößendatei (Anlage 8.1) definiert und hängt vom Schientyp

Die Schritte zur Ermittlung der POI finden ausschließlich als Vektorrechnung innerhalb der X-Z-Ebene des MWS statt. Streng genommen müssen bei dieser Vorgehensweise sämtliche Profilpunkte L_{R,MWS,k_i} auf die X-Z-Ebene des MWS projiziert werden. Aufgrund der präzisen mechanischen Positionierung der Lasertriangulationssensoren innerhalb des MWS kann dieser Auswerteschritt jedoch vernachlässigt werden. Der zu erwartende Einfluss liegt weit unterhalb der angestrebten Messunsicherheit des Gleisvermessungssystems.

Die weitere Vorgehensweise zur Ermittlung der POI ist mit der Abbildung 8.16 verdeutlicht. Durch Parallelverschiebung des Vektor P12R um einen festen „Abstand PSOK“ entsteht die Hilfsgerade g_2 . „Abstand PSOK“ ist einer der zentralen Parameter, welche den Schienentyp definieren. Der zweite zentrale Parameter ist der Winkel β , der das Steigungsverhältnis der Ausgangsgeraden g_1 gegenüber der Hilfsgeraden g_3 repräsentiert. Die zentralen Parameter werden vorab aus der Soll-Geometrie des jeweiligen Schienentyps abgeleitet und sind in der Stellgrößendatei definiert (Anlage 8.1).

Ausgehend von der Hilfsgeraden g_2 kann PSOK dadurch bestimmt werden, indem g_2 mit der Schienenoberfläche zum Schnitt gebracht wird. Bei hinreichend kleiner Rasterweite (Kapitel 8.2.2) entspricht PSOK (im Rahmen der angestrebten Systemgenauigkeit des RACER II) dem nächstgelegenen Profilpunkt aus L_{R,MWS,k_i} gegenüber der Hilfsgeraden g_2 .

Durch PSOK wird die Hilfsgerade g_3 durch den Vektor R12Rr2 gebildet, wobei P12R in PSOK um den Winkel β rotiert wird. Nach Abbildung 8.16 erfolgt die Rotation um β im Uhrzeigersinn. Bei der gegenüber liegenden Schiene liegt dagegen eine Auswertesituation vor, die sich ergibt, wenn die Abbildung 8.16 gespiegelt wird (vgl. Abbildungen 8.18 und 8.19). In dem Fall muss die Rotation von P12R um β gegen den Uhrzeigersinn erfolgen.

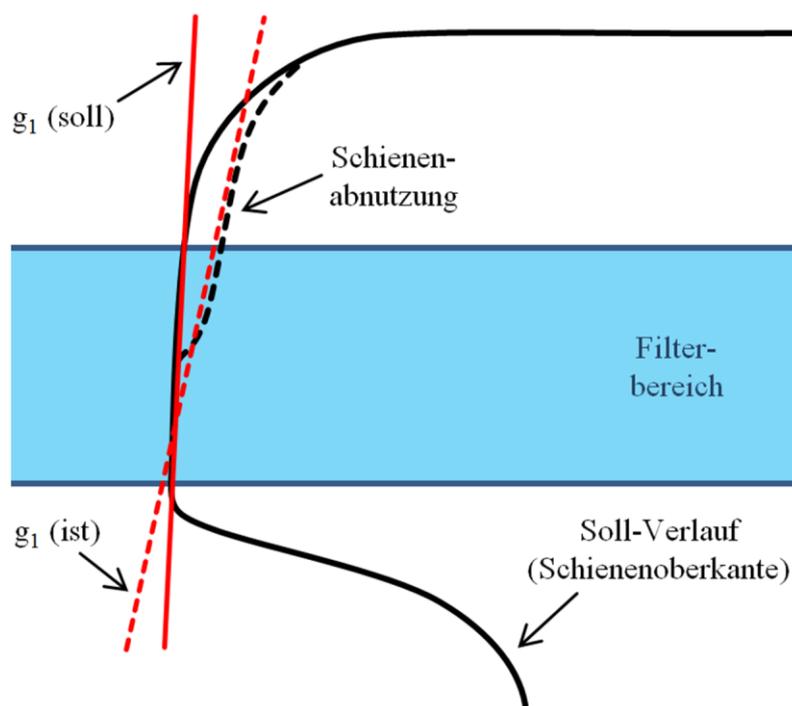


Abb. 8.17: Bedeutung der Geraden g_1 für die Ermittlung der POI

Die Hilfsgerade g_4 wird durch Parallelverschiebung der Hilfsgeraden g_3 um den Wert „Spurinnenlage“ gebildet. „Spurinnenlage“ ist ein vorgegebener Wert und bezeichnet den Kontaktpunkt des Radinnenkranzes eines Schienenfahrzeugs mit der Schienenoberfläche. Der entsprechende Wert beträgt i.d.R. 14 mm und wird in der Stellgrößendatei (Anlage 8.1) definiert.

Abschließend kann PSW auf die gleiche Weise ermittelt werden wie PSOK, indem die Hilfsgerade g_4 mit der Schienenoberfläche zum Schnitt gebracht wird. Auch hier reicht es aus, den nächstgelegenen Punkt aus \mathbf{L}_{R,MWS,k_i} gegenüber der Hilfsgeraden g_4 zu verwenden.

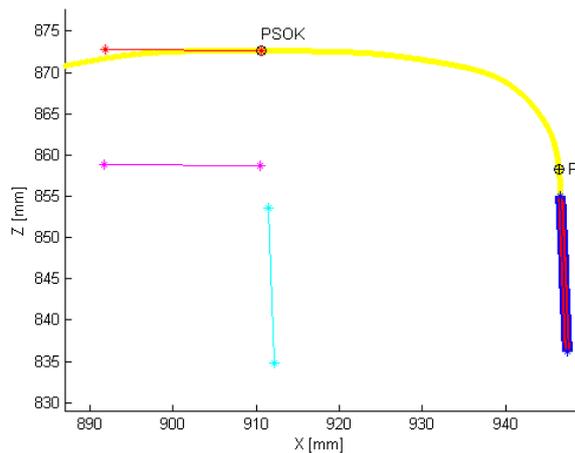


Abb. 8.18: POI-Ergebnisse der MatLab-Auswertung für die Lasertriangulationssensoren 2 und 3

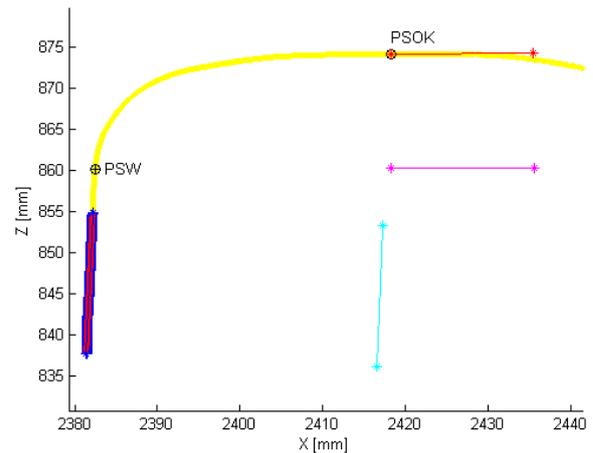


Abb. 8.19: POI-Ergebnisse der MatLab-Auswertung für die Lasertriangulationssensoren 1 und 4

Die Abbildungen 8.18 und 8.19 zeigen typische Ergebnisse der POI-Ermittlung auf Basis der MatLab-Implementierung des RACER II. Dargestellt ist unter anderem der Filterbereich der Ausgangsgeraden g_1 , sowie die Vektoren P12R (blau, cyan) und P12Rr2 (rot, magenta), welche die übrigen Hilfsgeraden repräsentieren. Die gerasterten Profilpunkte \mathbf{L}_{R,MWS,k_i} sind in Gelb dargestellt.

Die Vorgehensweise über eine Vektorrechnung in der X-Z-Ebene ermöglicht eine schnelle Berechnung der POI. Werden zudem beim Verschneiden der Schienenoberfläche mit den Hilfsgeraden die jeweils nächstgelegenen Profilpunkte aus \mathbf{L}_{R,MWS,k_i} verwendet, kann die Y-Komponente der POI direkt aus den ursprünglichen Daten zugewiesen werden. Ein weiterer Vorteil ist die Gewinnung des in Abbildung 8.16 dargestellten Winkels α , welcher aus dem Steigungsverhältnis der Hilfsgeraden g_3 und der X-Achse des MWS gebildet wird. α repräsentiert die relative Schiefstellung der GMA gegenüber der Querneigung des Gleises.

8.3 Ermittlung der Zielgrößen

Die Ergebnisse des Kapitels 8.2.4 bilden die Grundlage für die Berechnung der Zielgrößen des Gleisvermessungssystems RACER II. Im Folgenden werden jene Arbeitsschritte beschrieben, die in Abbildung 8.1 unter dem Punkt „Gesamtauswertung“ zusammengefasst sind. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in der vergleichbaren Abbildung 8.20 dargestellt mit Einbindung der Arbeitsschritte (weißer Hintergrund) in das übergeordnete Hauptprogramm (grauer Hintergrund).

Sämtliche Arbeitsschritte wurden mit der Programmierumgebung MatLab implementiert und lassen sich in drei wesentliche Abschnitte unterteilen:

- Stationierung
- Transformation MWS => GVS
- Berechnung der Zielgrößen

Bei der Stationierung werden die Messdaten des Tachymeters in lokale Koordinaten des MWS konvertiert. Damit liegen die gemessenen GVP im MWS vor und können als identische Punkte für die Transformation der POI in das übergeordnete GVS verwendet werden. Die Transformation ist notwendig, da die Ableitung der Zielgrößen Lage, Höhe, Längs- und Querneigung ein nivelliertes Bezugssystem voraussetzt. Lediglich die Zielgröße Spurweite ist davon ausgeschlossen.

Stationierung

Der erste Arbeitsschritt besteht in der Reduzierung der Messdaten des Tachymeters auf eine Fernrohrlage. Die Messung in zwei Fernrohrlagen ist optional und kann in der Stellgrößendatei als solche eingestellt werden (Anlage 8.1). Weitere Korrekturen wie Nullpunkts- und Maßstabkorrektur sowie Prismentyp werden vorab im Tachymeter eingestellt oder bei der Initialisierung des Tachymeters von der Betriebssoftware des RACER II übertragen. Nach Berücksichtigung der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Maßnahmen verbleiben:

- 1. Geschwindigkeitskorrektur
(noch nach Barrel & Sears 1939, ohne Luftfeuchte, [Kahmen 1997])
- Höhen- und Neigungsreduktion [Kahmen 1997]
- Abbildungsreduktion (abhängig vom Landessystem, [Kahmen 1997])

Bei der Neigungsreduktion wird die Schrägstrecke mit Hilfe des Zenitwinkels in eine Horizontalstrecke überführt. Außerhalb eines lokalen Netzes erfolgt zusätzlich eine Niveauekorrektur auf Basis der mittleren Standpunkthöhe im jeweiligen Landessystem (Koordinatensystem des GVS). Die genäherte, mittlere Standpunkthöhe wird vom Hauptprogramm aus den Koordinaten der beteiligten GVP übergeben.

Das Koordinatensystem des GVS kann in der Stellgrößendatei eingestellt werden (Anlage 8.1). Bislang wurden Landessysteme wie Gauß-Krüger und ETRS89/UTM sowie die Schweizer Landessysteme LV03 (CH1903) und LV95 (CH1903+) berücksichtigt. Die Abbildungsreduktion richtet sich nach dem voreingestellten Landessystem und wird als Maßstab m_{geo} berücksichtigt. Ferner ist aufgrund der kurzen Zielweiten von bis zu 130 m keine Richtungsreduktion erforderlich.

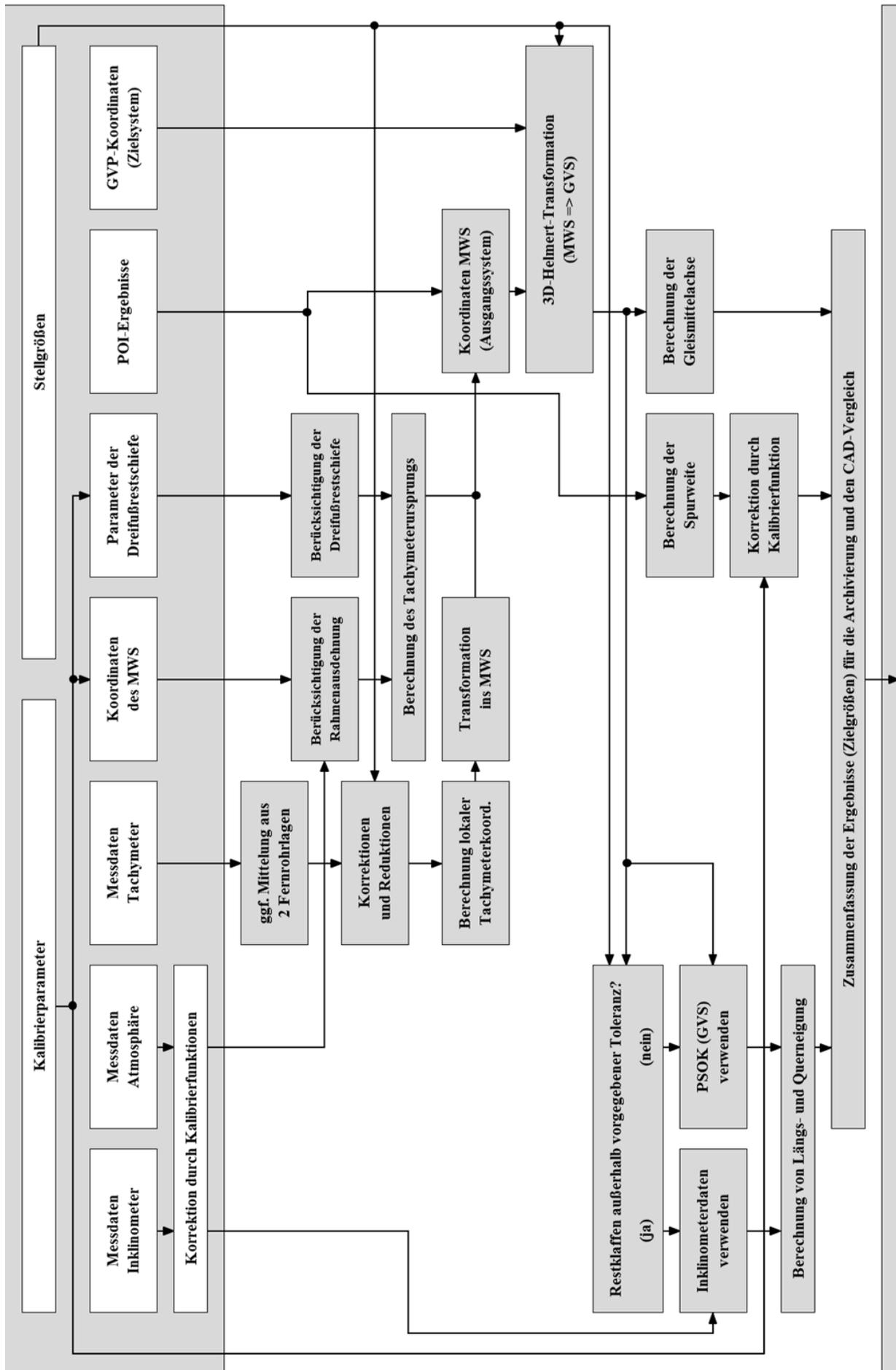


Abb. 8.20: Vorgehensweise zur Berechnung der Zielgrößen

Die Konvertierung der korrigierten und reduzierten Messdaten des Tachymeters in lokale Koordinaten des MWS erfordert Kenntnisse über die relative Orientierung des Tachymeters innerhalb des MWS (Kapitel 6.1). Ausgehend vom Mittelpunkt der Dreifußauflage (Abbildung 8.4, Punkt 91) wird unter Berücksichtigung der Dreifußrestschiefe und der Kippachshöhe des verwendeten Tachymeters der Tachymeterursprung im Punkt 99 (Abbildung 8.4) definiert. Diese Koordinaten hängen von der gegenwärtigen Materialtemperatur des Gleisvermessungssystems ab, so dass die in Abbildung 8.4 blau dargestellten Punkte des MWS vorab über (6.21) transformiert werden müssen.

Die Berechnung der lokalen Koordinaten des Tachymeters \mathbf{L}_{TMS} aus den korrigierten und reduzierten Messwerten (Horizontalstrecke s_{Hor} , Horizontalrichtung r_{Hz} und Zenitwinkel r_{v}) erfolgt über

$$\mathbf{L}_{\text{TMS}} = \begin{pmatrix} L_{\text{X,TMS}} \\ L_{\text{Y,TMS}} \\ L_{\text{Z,TMS}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{\text{geo}} \cdot s_{\text{Hor}} \cdot \sin(r_{\text{Hz}}) \\ m_{\text{geo}} \cdot s_{\text{Hor}} \cdot \cos(r_{\text{Hz}}) \\ \frac{s_{\text{Hor}}}{\tan(r_{\text{v}})} - \frac{s_{\text{Hor}}^2}{2R} \end{pmatrix} \quad (8.26)$$

unter Berücksichtigung der Erdkrümmungsreduktion mit $R = 6371$ km.

Transformation MWS => GVS

Die vom Tachymeter bestimmten Koordinaten der GVP \mathbf{L}_{TMS} bilden zusammen mit den POI aus Kapitel 8.2.4 die Koordinaten des Ausgangssystems \mathbf{P}_{MWS} . Sie sind in das nivellierte Zielsystem GVS zu transformieren, welches durch die Koordinaten der gemessenen GVP \mathbf{K}_{GVS} repräsentiert wird.

Die Überführung von \mathbf{P}_{MWS} nach \mathbf{P}_{GVS} erfolgt über eine 3D-Helmert-Transformation (3DHT), deren Ergebnis die transformierte Differenzmenge $\mathbf{P}_{\text{GVS}} = \mathbf{P}_{\text{MWS,T}} \setminus \mathbf{K}_{\text{GVS,T}}$ bildet. Bei der implementierten 3DHT handelt es sich um einen iterativen Ausgleichsalgorithmus, der Näherungswerte für die zu bestimmenden Transformationsparameter (3 Translationen, 3 Rotationen, 1 Maßstab) benötigt, wobei der Maßstab als Plausibilitätswert mitgeschätzt wird und nicht in die weitere Berechnung der Zielgrößen eingeht. Die Näherungswerte für die Translationsparameter X und Y sowie die Rotationsparameter Ω und Φ werden durch eine vorgeschaltete 2D-Helmert-Transformation (2DHT) gewonnen, wobei schwerpunktbezogene Koordinaten verwendet werden. Dieser Zwischenschritt ist sinnvoll, da die 2DHT gegenüber der 3DHT auch mit schwachen Näherungswerten zuverlässiger konvergiert.

Die detaillierten Zusammenhänge beider Transformationen sollen an dieser Stelle nicht vertieft werden und sind beispielsweise in [Drixler 1993], [Niemeier 2008] oder [Akyilmaz 2007] ersichtlich. Als Abbruchkriterium für den iterativen Ausgleichsprozess der 3DHT wird in der Stellgrößendatei (Anlage 8.1) ein Grenzwert definiert, der die angestrebte Genauigkeit der aus-

geglichenen Transformationsparameter repräsentiert. Das stochastische Modell der 3DHT wird dahingehend vereinfacht, dass eine einheitliche Gewichtung der eingehenden Koordinaten \mathbf{P}_{MWS} eingeführt wird. Sofern detaillierte Informationen über die einzelnen Messgrößen und die Koordinaten des GVS vorliegen, kann die implementierte 3DHT derzeit über die Einführung von Standardabweichungen hinsichtlich des Ausgangs- und des Zielsystems angepasst werden.

Berechnung der Zielgrößen

$\mathbf{P}_{GVS,T}$ enthält die in das GVS transformierten POI. Zur Veranschaulichung der folgenden Ausführungen wird auf die Abbildung 8.4 verwiesen, auf die sich auch die nachfolgenden Punktbezeichnungen beziehen. Bis auf die Spurweite werden sämtliche Zielgrößen des RACER II aus den transformierten PSOK berechnet.

Abhängig von einer Stellgröße (Anlage 8.1) wird zunächst festgelegt, ob die Zielgrößen für zwei separate Positionen (zwischen PSOK 112 und 122 sowie zwischen PSOK 132 und 142) oder eine gemeinsame Position (Punkt 88) bestimmt werden sollen. In der ersten Variante entstehen zwei Punkte der SMA, die aus dem Schwerpunkt der jeweils beteiligten PSOK gebildet werden (arithmetisches Koordinatenmittel). In der zweiten Variante wird eine gemeinsame Schwerpunktkoordinate aus allen vier PSOK gebildet. Die Schwerpunktkoordinaten enthalten in ihrer Eigenschaft als Punkte im GVS die Informationen über Lage und Höhe der SMA.

Analog zur GMA können per Stellgröße (Anlage 8.1) zwei separate oder ein gemeinsamer Wert bestimmt werden. In beiden Fällen werden die separaten Werte bestimmt und im Falle der gemeinsamen Zielgröße arithmetisch gemittelt. Die Zielgröße Längsneigung (LN) wird in Promille wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned} LN_{11-14} &= \frac{PSOK_{Z,14} - PSOK_{Z,11}}{\left(\begin{array}{c} PSOK_{X,14} \\ PSOK_{Y,14} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} PSOK_{X,11} \\ PSOK_{Y,11} \end{array} \right)} \cdot 1000 \\ LN_{12-13} &= \frac{PSOK_{Z,13} - PSOK_{Z,12}}{\left(\begin{array}{c} PSOK_{X,13} \\ PSOK_{Y,13} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} PSOK_{X,12} \\ PSOK_{Y,12} \end{array} \right)} \cdot 1000 \end{aligned} \quad (8.27)$$

Die Zielgröße Querneigung (QN) wird in Meter pro 1,5 m (m/1,5m) über

$$\begin{aligned} QN_{11-12} &= \frac{PSOK_{Z,12} - PSOK_{Z,11}}{\left(\begin{array}{c} PSOK_{X,12} \\ PSOK_{Y,12} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} PSOK_{X,11} \\ PSOK_{Y,11} \end{array} \right)} \cdot 1500 \\ QN_{13-14} &= \frac{PSOK_{Z,13} - PSOK_{Z,14}}{\left(\begin{array}{c} PSOK_{X,13} \\ PSOK_{Y,13} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} PSOK_{X,14} \\ PSOK_{Y,14} \end{array} \right)} \cdot 1500 \end{aligned} \quad (8.28)$$

bestimmt. Die Einheit m/1,5m entspricht näherungsweise der Raumstrecke zwischen den beiden GMA bei einer Soll-Spurweite von 1,435 m zuzüglich der Schienenkopfbreite einer 60E1-Vignolschiene mit 72 mm (Kapitel 2.2.2). Alternativ können LN und QN direkt aus den Messdaten des Inklinometers abgeleitet werden.

Die Spurweite kann als einzige Zielgröße direkt aus den PSW innerhalb des MWS gewonnen werden, da die Raumstrecke zweier gegenüberliegender PSW kein nivelliertes Bezugssystem benötigt. Analog zur GMA können per Stellgröße (Anlage 8.1) zwei separate oder ein gemeinsamer Wert für die Spurweite bestimmt werden. In beiden Fällen werden die separaten Werte als Raumstrecke aus jeweils gegenüberliegenden PSW bestimmt und im Falle der gemeinsamen Zielgröße arithmetisch gemittelt.

Die Implementierung in MatLab ist so angelegt, dass sie für eine unabhängige Nachrechnung genutzt werden kann. Dabei werden die identischen Skripte verwendet, wie sie im Messprogramm des RACER II integriert sind. Diese Nachrechnung in Form eines Post-Processings rekonstruiert den vollzogenen Messprozess anhand der originären Messdaten. So kann beispielsweise eine Nachrechnung mit anderen Kalibrierparametern durchgeführt werden. Weit häufiger tritt der Fall ein, dass GVP-Koordinaten im Nachhinein neu bestimmt wurden und im Postprocessing mit veränderten Koordinaten entsprechend berücksichtigt werden. Der nachträgliche Ausschluss von GVP, die Modellierung von Höhenindexfehlern aus Kalibrierprotokollen oder die zeitaufwändige Variante der POI-Auswertung nach Kapitel 8.2.3 sind weitere Beispiele für den Nutzen des Post-Processings.

Begrenzt werden die Möglichkeiten des Post-Processings insbesondere durch die originären Messungen des Tachymeters. Falsch gemessene GVP können nachträglich nicht korrigiert werden, so dass bereits während der Messung darauf zu achten ist, dass die GVP augenscheinlich in Ordnung und möglichst gut signalisiert sind. Letzteres betrifft insbesondere das manuelle Anbringen und Ausrichten der Präzisionsprismen.

8.4 Verwendung der Zielgrößen

Die Zielgrößen des RACER II repräsentieren allein die Trassengeometrie, d.h. den räumlichen Verlauf der GMA im übergeordneten Bezugssystem sowie die relative Lage der beiden Schienenstränge zueinander (Längsneigung, Querneigung, Spurweite). Durch Integration der Zielgrößen in eine CAD-Software (Trassierungssoftware) ist ein Soll-Ist-Vergleich mit der geplanten Trasse möglich.

CAD-Modelle bildet die Entwurfsvorlage sowohl für die erstmalige Erstellung, als auch für Änderungen im Bestand. Darüber hinaus bietet ein CAD-Modell Möglichkeiten wie beispielsweise:

- Produktdokumentation
- Ableitung von Fertigungsinformationen
- Kontrolle während der Erstellung

- Soll-Ist-Vergleich nach Abschluss der Erstellung
- Reverse Engineering

Neben den geometrischen Informationen können je nach Umfang der Konstruktionssoftware auch weitere Informationen eingebunden werden wie beispielsweise Eigenschaften statischer oder dynamischer Elemente oder Materialkenngrößen. Es gibt viele namenhafte Hersteller entsprechender Konstruktionssoftware. Im Folgenden werden stellvertretend drei Softwareprodukte für den Entwurf von Gleistrassen (Trassierungssoftware) genannt.

Die CAD-Software „ProVI CAD“ wird von der Firma „Obermeyer Planen+Beraten GmbH“ vertrieben. Das Software-Paket umfasst ein graphisch-interaktives Programmsystem für Verkehrs- und Infrastrukturplanungen in den Bereichen Straße, Schienen und Kanal. Es basiert auf den Funktionen der CAD-Software AutoCAD von Autodesk Inc. und wird unter anderem von der Deutschen Bahn als Trassierungssoftware genutzt [Obermeier 2015]. Alternativ bietet beispielsweise die Firma Bentley Systems Inc. ihr Software-Paket „Power Rail Track V8i“ an [Bentley 2015].

Die geometrischen Eigenschaften der Gleisführung einer zu planenden Trasse werden durch aneinandergereihte Abschnitte (Trassierungselemente) beschrieben. Zu den Grundelementen des horizontalen Verlaufs gehören Geraden, Kreise und Übergangsbögen. Letztere bilden die Verbindung zwischen Geraden und Kreisen, wobei durch einen stetig wachsenden Krümmungsradius ein kontinuierlicher Übergang von der Geraden in die Kreisbewegung erzielt wird und umgekehrt. Hinzu kommen Elemente für den vertikalen Verlauf wie Längsneigung (Gradienten) und Querneigungen (Überhöhung). Zu den gebräuchlichsten Übergangsbögen gehören Klothoiden, Sinusoiden, kubische Parabeln oder der Wiener Bogen [Weigend 2004].

Die Schweizer Bundesbahn (SBB) verwendet seit 1987 das absolute Gleisversicherungssystem NGV (Neue Gleisversicherung) und ersetzt damit das herkömmliche, relative Rückversicherungssystem Hallade (Kapitel 2.3.1). Etwa zeitgleich führte die SBB ihre eigens entwickelte Trassierungssoftware „Toporail“ zur effizienteren Planung und Projektierung der Geometrie von Gleisanlagen ein. Die graphisch-interaktive Programmoberfläche ermöglicht neben der geometrischen Beschreibung der Gleisführung auch die Überprüfung des Lichtraumprofils sowie integrierte Feldmodule für die Absteckung und Kontrolle von Gleisen, Weichen und Bauwerksachsen [Maron u. Beda 2004].

Die Software des RACER II kommuniziert mit der Trassierungssoftware Toporail bereits während des laufenden Messeinsatzes und ermöglicht damit den sofortigen Vergleich der gemessenen mit der in Toporail geplanten Gleislage. Die Interaktion erfolgt über eine Textdatei (Übergabedatei), auf welche die RACER II Software und Toporail abwechselnd zugreifen. Eine eigens für den RACER II implementierte Applikation in Toporail prüft in regelmäßigen Abständen, ob neue Inhalte in die Übergabedatei geschrieben wurden. Die ermittelten Zielgrößen werden von der RACER II Software nach Abschluss jeder Standpunktauswertung als neue Datenzeile in die Übergabedatei geschrieben.

Die Applikation in Toporail berechnet aus den übergebenen Daten die Abweichungen zur Soll-Geometrie und gibt diese in einem Informationsfenster und einer Protokolldatei aus. Der entsprechende Eintrag in der Protokolldatei wird von der RACER II Software nach Abschluss jeder Standpunktauswertung ausgelesen und auf der Benutzeroberfläche dargestellt. Auf diese Weise kann sofort überprüft werden, wie sich die einzelnen Abweichungen hinsichtlich Lage, Höhe, Überhöhung und Spurweite während des laufenden Messeinsatzes verhalten. Dadurch können Auffälligkeiten unmittelbar erkannt werden.

Neben dem kontinuierlichen Datenaustausch über die beiden Textdateien ist auch eine nachträgliche Gesamtauswertung im Rahmen des Post-Processings möglich. Die Applikation in Toporail nutzt erneut die Übergabedatei, welche diesmal sämtliche Datenzeilen der Auswertung des Post-Processings enthält. Die Berechnung der Abweichungen in Toporail läuft dann durch einmaligen Zugriff auf die Übergabedatei. Der Prozess benötigt nur wenige Sekunden und erzeugt unmittelbar die gesamte Protokolldatei eines gemessenen Trassenabschnitts.

8.5 Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement des RACER II gibt dem Anwender bereits während der Messung Hinweise, wenn sich Sensoren ungewöhnlich verhalten und die Gefahr besteht, fehlerhafte Ergebnisse zu erzeugen. Dazu werden weitere Schwellwerte eingeführt, die bei Überschreiten zu einer Reaktion der Auswertesoftware und / oder zu einer optischen Warnung auf der Benutzeroberfläche führen. Bei Letzterem ist die Erfahrung und Einschätzung des Anwenders erforderlich, um weitere Maßnahmen wie beispielsweise eine Wiederholungsmessung des betroffenen Abschnitts einzuleiten. Über den Reiter „QM“ innerhalb der grafischen Benutzeroberfläche (Abbildung 8.21) kann der Operator jederzeit während der Messung auf die verschiedenen Informationen zugreifen.

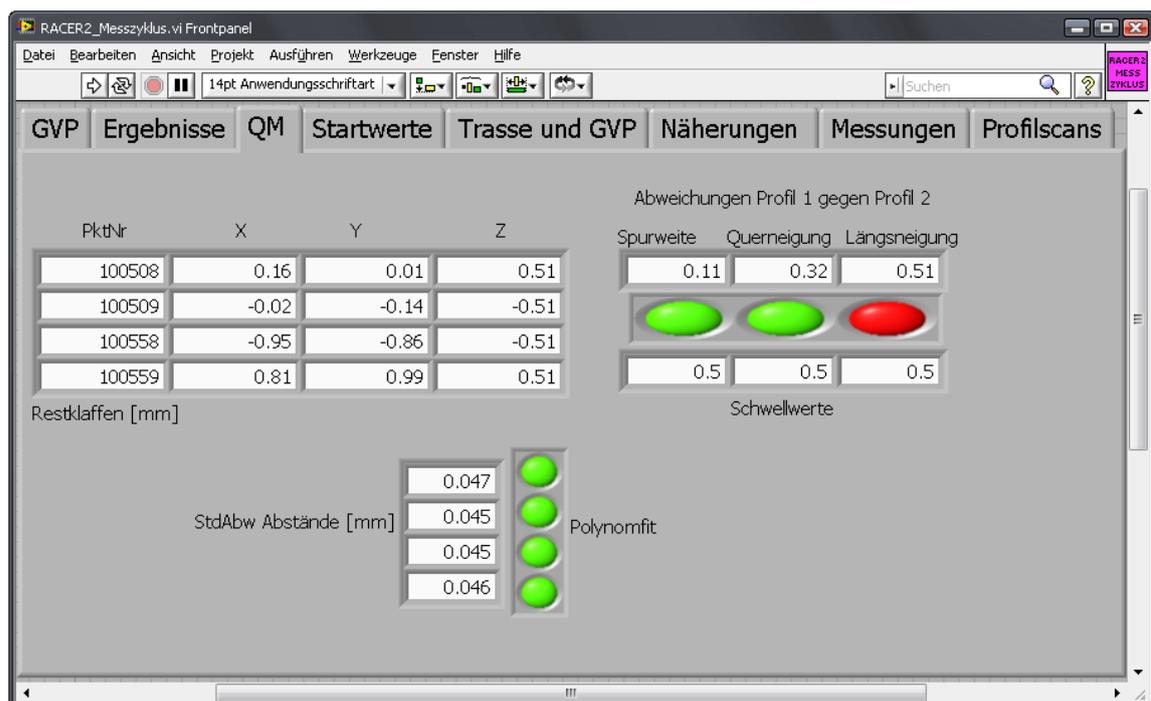


Abb. 8.21: Reiter „QM“ innerhalb der grafischen Benutzeroberfläche des RACER II

Die erste Plausibilitätsprüfung erfolgt anhand der verfügbaren Daten aus der POI-Auswertung (Kapitel 8.2.4). Sofern ein Lasertriangulationssensor ausfällt oder eine POI-Auswertung nicht möglich ist, wird anstatt der ermittelten POI (Ergebnismatrix) eine Nullmatrix übergeben. Wenn die POI-Auswertung ihrerseits Auffälligkeiten aufweist, kann ebenfalls eine Nullmatrix übergeben werden. Dieser Aspekt ist bislang jedoch dem Post-Processing vorbehalten (Kapitel 8.2.3).

Unter Hinzunahme der Messdaten des Inclinometers können die Zielgrößen Längs- und Querneigung unabhängig von den POI ermittelt werden. Die Zielgrößen Lage, Höhe und Spurweite erfordern dagegen mindestens die plausiblen POI-Auswertungen eines gegenüberliegenden Lasertriangulationssensor-Paars. Daher ist eine Bestimmung sämtlicher Zielgrößen auch dann möglich, wenn folgende POI-Auswertungen fehlschlagen:

- Nullmatrix bei einem (beliebigem) Lasertriangulationssensor
- Nullmatrizen bei den Lasertriangulationssensoren 11 und 12
- Nullmatrizen bei den Lasertriangulationssensoren 13 und 14

In allen anderen Konstellationen ist die Auswertung der Zielgrößen nur bedingt möglich und wird abgebrochen. In diesem Fall werden Nullwerte für die Zielgrößen gespeichert und keine Daten an die Schnittstelle zum CAD-Vergleich übergeben. Alle verfügbaren Messdaten werden dennoch aufgezeichnet, so dass gegebenenfalls eine spätere Auswertung im Post-Processing möglich bleibt.

Der Nachweis einer plausiblen POI-Auswertung ist in Abbildung 8.21 im Bereich „Polynomfit“ ersichtlich, sofern für den entsprechenden Lasertriangulationssensor ein grünes Anzeigefeld erscheint. Ist das Feld dagegen rot, wurde eine Nullmatrix übergeben. Zusätzlich wird die Standardabweichung der Abstände der Profilpunkte zum Punktraster der ausgeglichenen Teilpolynome angegeben. Dieser Wert ist jedoch informativ. Bisherige Ansätze, die betreffenden Standardabweichungen zur Detektion von Auffälligkeiten bei der POI-Auswertung zu nutzen, waren nicht zuverlässig. Das in Kapitel 8.2.3 vorgestellte Verfahren stellt bislang die wirksamste Umsetzung dieser Fragestellung dar.

Eine weitere wichtige Prüfung ist die der Restklaffen der 3D-Helmert-Transformation (Kapitel 8.3). Sie sind in Abbildung 8.21 im Bereich „Restklaffen [mm]“ zu finden. Die Qualität der 3DHT beeinflusst maßgeblich die Güte der Zielgrößen. Basierend auf den Erfahrungen mit dem Gleisvermessungssystem RACER hat sich ein Schwellwert von $S_{RK} = 2$ mm bewährt. Sobald eine Restklaffen-Komponente innerhalb der in Abbildung 8.21 dargestellten Matrix diesen Schwellwert überschreitet, werden folgende Maßnahmen eingeleitet:

- die Zielgrößen Längs- und Querneigung werden durch das Inclinometer bestimmt
- alle Messwerte werden archiviert, alle Ergebnisse (Zielgrößen) gespeichert
- es werden keine Daten an die Schnittstelle zum CAD-Vergleich übergeben

Der letzte Aspekt gewährleistet die gleichbleibende Qualität der Endergebnisse für den Auftraggeber. Obwohl die Zielgrößen Längs- und Querneigung durch die Messdaten des Inclinometers kompensiert werden, bleibt der Einfluss der Schwellwertüberschreitung bei der 3DHT hinsichtlich der Zielgrößen Lage und Höhe bestehen. S_{RK} wird in der Stellgrößendatei eingestellt (Anlage 8.1) und kann gegebenenfalls nachträglich im Rahmen des Post-Processings verändert werden.

Neben der Analyse der Restklaffen wurden weitere Plausibilitätsprüfungen implementiert. Sie sind in Abbildung 8.21 im Bereich „Abweichungen“ dargestellt. Die Kontrolllampe „Spurweite“ leuchtet rot, wenn die ermittelte Spurweite vom Schwellwert $S_{SW} = 1435 \pm 0,5$ mm (Anlage 8.1) abweicht. Das Kontrollfeld ist wichtig, weil die bisherigen Plausibilitätsprüfungen keinen Einfluss auf die unabhängige Bestimmung der Spurweite haben. Es folgen jedoch keine programm-internen Reaktionen, weil sich die Spurweite aufgrund baulicher Mängel tatsächlich außerhalb der voreingestellten Toleranz bewegen kann. Die entsprechende Anzeige dient lediglich der Information des Anwenders.

Neben der Spurweite wurden zwei weitere Anzeigeelemente für die Zielgrößen Längs- und Querneigung implementiert. Hierbei werden die aktuellen Ergebnisse mit den entsprechenden Werten der vorangehenden Epoche verglichen. Bei Überschreitung vordefinierter Schwellwerte leuchten die Anzeigenelemente rot auf. Entsprechende Schwellwerte sind in der Stellgrößendatei mit 0,5 ‰ für die Längs- und 0,5 mm/1,5m für die Querneigung definiert (Anlage 8.1). Auf diese Weise werden sprunghafte Änderungen angezeigt, welche auf eine Sensorstörung hindeuten können.

rer GVP. Messungen sind im Laborsystem nur möglich, indem die Mindestentfernung vom Tachymeter zum GVP in der Stellgrößendatei von 10 auf 2 m herabgesetzt wird (Kapitel 3).

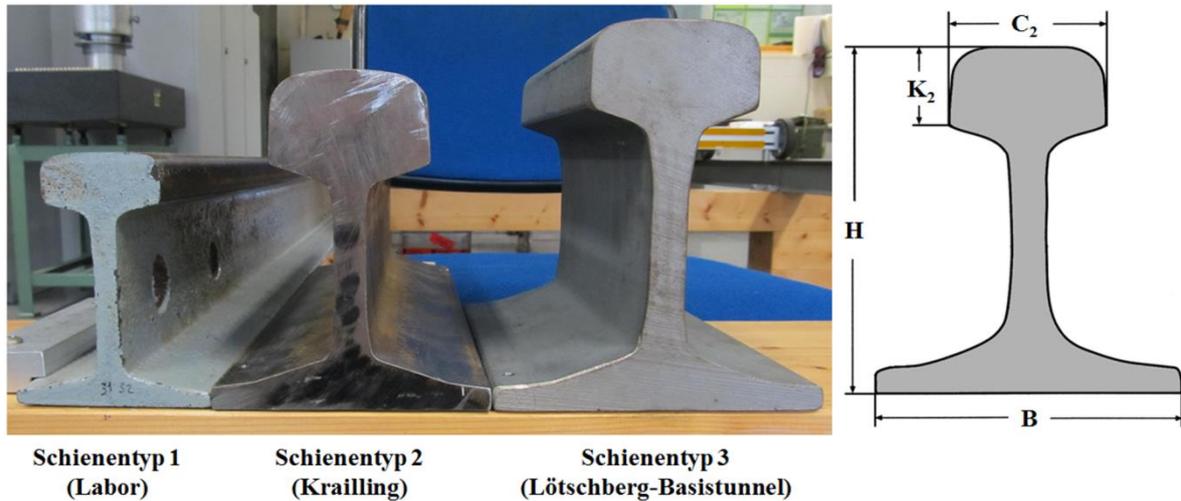


Abb. 9.2: Unterschiedliche Schienentypen der einzelnen Teststrecken

Zudem entsprechen die verfügbaren Schienen des Laborsystems nicht dem üblichen Standard im konventionellen Schienenverkehr (Kapitel 2.2.2). Es handelt sich um eine Kranschiene mit einer Schienenhöhe $H = 115$ mm und einer Kopfhöhe $K_2 = 23$ mm (Abbildung 9.2, Schientyp 1). Die Kranschiene ist gegenüber dem Schientyp der Teststrecke Krailling (Schientyp 2, Kapitel 9.2) und dem Lötschberg-Basistunnel (Schientyp 3, Kapitel 9.3) deutlich kleiner. Dies erfordert eine Anpassung der Schienenparameter bei der Berechnung der Zielgrößen zur Bestimmung der Gleisgeometrie (Anlage 8.1). Durch die geringe Kopfhöhe der Kranschiene stehen entsprechend weniger Profilverpunkte für die Ermittlung der Schieneninnenkannte zur Verfügung. Tabelle 9.1 zeigt die wichtigsten Parameter der drei Schientypen der Abbildung 9.2 im Überblick.

Parameter	Schientyp 1	Schientyp 2	Schientyp 3
H [mm]	115	149	172
B [mm]	90	125	150
K_2 [mm]	23	40	38
C_2 [mm]	53	70	74

Tab. 9.1: Parameter der unterschiedlichen Schientypen der einzelnen Teststrecken

Ein weiterer Nachteil ist durch die konstanten Lichtverhältnisse der Laborumgebung gegeben. Testfahrten auf der Versuchsstrecke Krailling haben gezeigt, dass die direkte Sonneneinstrahlung einen deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse der Lasertriangulationssensoren hat (Kapitel 9.2). Im Labor lassen sich diese Einflüsse nicht simulieren.

Neben den zuvor genannten Nachteilen bietet das Laborsystem aber auch Vorteile. Die Entwicklungsumgebung ist wetterunabhängig, sämtliche Instrumente können permanent mit Strom versorgt werden und die Programmierung wird durch die gegebene Infrastruktur vereinfacht. Zudem lassen sich die Schienen individuell ausrichten, so dass unterschiedliche Längs- und Quernei-

gungen simuliert werden können. Ferner ermöglicht die wetterunabhängige Umgebung die Durchführung einer Validierungsmessung (Kapitel 9.3.2).

9.2 Teststrecke Krailling

Um den Messablauf des Gleisvermessungssystems im vollen Umfang testen zu können, wurde eine Teststrecke auf einem abgelegenen Gelände in der Nähe der Gemeinde Krailling, Oberbayern, eingerichtet. Die vorhandene Gleisstruktur dient der Versorgung von Lagerstätten und wird selten befahren. Die Gleise sind vom Schientyp 2 (Abbildung 9.2, Tabelle 9.1) mit der konventionellen Spurweite von 1435 mm.

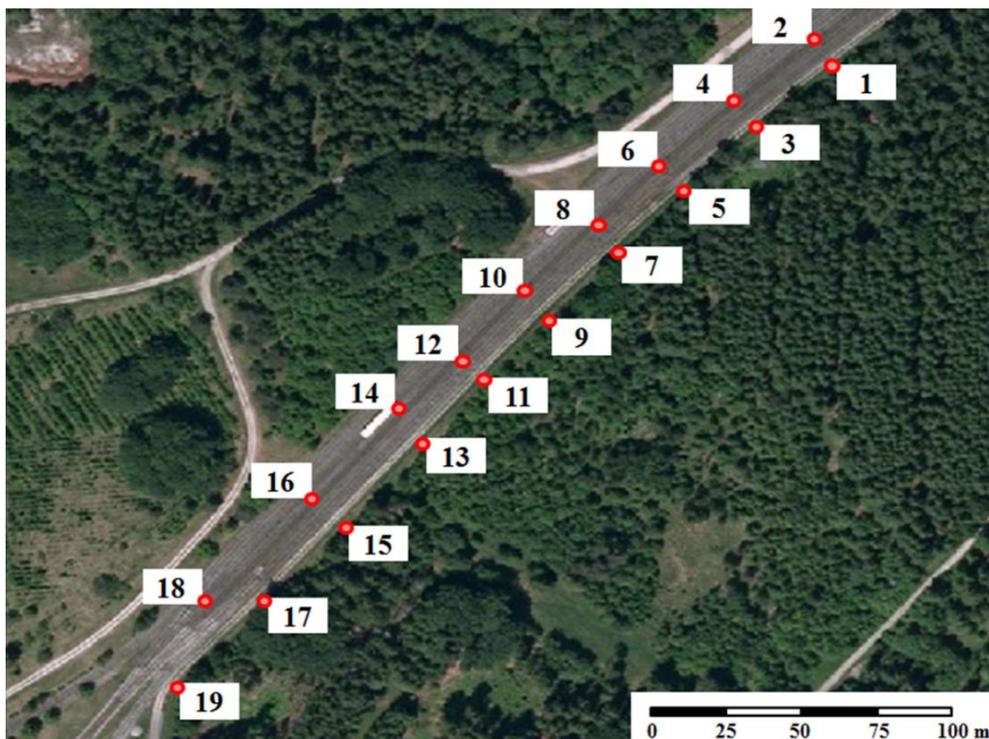


Abb. 9.3: GVP-Verteilung auf der Teststrecke Krailling (Google Maps)

Die Abbildung 9.3 zeigt einen Testabschnitt mit 19 GVP, welche für die Teststrecke montiert und vermessen wurden. Sie befinden sich überwiegend an bereits vorhandenen Masten, Schildern oder vergleichbaren stabilen Konstruktionen. Die durchschnittliche Entfernung zwischen den GVP-Paaren beträgt etwa 30 m. Im Bereich der GVP 17 bis 19 befinden sich mehrere Weichen. Die südlich anschließenden Streckenabschnitte enthalten zudem Kurven und Straßenquerungen. Die Nutzung der Teststrecke Krailling erweitert den Testumfang des RACER II gegenüber dem Laborsystem im Wesentlichen um folgende Aspekte:

- Simulation von GVP-Wechseln oder GVP-Ausfällen
- Licht- und Wetterverhältnisse unter realen Außenbedingungen (Feuchtigkeit / Regen, Temperaturschwankungen, Sonneneinstrahlung, etc.)
- Fahrverhalten bei unterschiedlicher Streckenführung (Kurven, Weichen, Straßenquerungen)

- Fahrverhalten bei Steigung und Gefälle
(Kontrolle der zurückgelegten Wegstrecke, Schlupfkompensation der Räder)

Unter realen Außenbedingungen kann vor allem die direkte Sonneneinstrahlung problematisch bei der Auswertung der Lasertriangulationssensoren sein. Die Strahlung der Sonne umfasst abgesehen von den Fraunhoferlinien das komplette elektromagnetische Spektrum des sichtbaren Lichts und damit auch den Wellenlängenbereich der Lasertriangulationssensoren. Daher können aus überbelichteten Schienenabschnitten keine Koordinaten erzeugt werden, wodurch die in Kapitel 8.2 beschriebene POI-Auswertung erschwert oder gar verhindert wird. Auf Grundlage dieser Erkenntnis verfügt der RACER II über Schutzblenden, welche die Intensität der Fremdlichteinflüsse deutlich reduzieren.

Ein weiteres wichtiges Testscenario ist die Untersuchung des Fahrverhaltens des Gleisvermessungssystems bei unterschiedlicher Streckenführung. Die Schienenführung des RACER II wird über jeweils vier Führungsrollen an dem Antriebs- und dem Messwagen realisiert. Der Antriebswagen verfügt über zwei Motoren, die den Messwagen je nach Fahrtrichtung über zwei Kupplungsstäbe schieben oder ziehen. Die Konstruktion ermöglicht die Durchfahrt enger Kurven sowie das Passieren von Straßenquerungen. Problematisch bleibt die Überquerung von Weichen. Hier muss der RACER II aufgrund des Entgleisungsschutzes stellenweise von Hand versetzt werden.

Bei Steigungen oder Gefälle innerhalb der Streckenführung wird der RACER II aufgrund seines Eigengewichts gebremst oder beschleunigt. Die Motoren kompensieren diese zusätzlich wirkenden Kräfte nicht vollständig, so dass ein geringer Maßstabsfehler bei der Berechnung des Fahrwegs durch die Antriebssteuerung entsteht. Der Maßstabsfehler kann durch kontinuierlichen Vergleich zwischen berechneter (Antriebssteuerung) und tatsächlich gefahrener Strecke (Stationierung bei der Zielgrößenbestimmung der Gleisgeometrie) kompensiert werden. Bei zu starken Anfahr- und Bremsrampen besteht zudem die Gefahr, dass die Antriebsräder den Kontakt zur Schiene verlieren und kurzzeitig durchdrehen (Schlupf). Die Verwendung von Gummiprofilen reduziert diesen Effekt deutlich.

9.3 Versuchsstrecke Lötschberg-Basistunnel

Der Lötschberg-Basistunnel ist ein rund 35 km langer Eisenbahntunnel in der Schweiz, der zwischen den Orten Frutigen und Raron die Alpen unterquert und im Juni 2007 in Betrieb genommen wurde [BLS 2005], [Rhomberg 2014]. Der Betreiber „BLS Alp Transit AG“ hat eine subterrane Versuchsstrecke eingerichtet, die heute vorrangig dem Tourismus zur Veranschaulichung der Bahntechnik dient. Das etwa 80 m lange Gleis entspricht dem der Hauptstrecke und stellt die beste Approximationsstufe zur Simulation der realen Messumgebung dar. Die Nutzung der Versuchsstrecke Lötschberg-Basistunnel erweitert den Testumfang des RACER II gegenüber dem Teststrecke Krailling im Wesentlichen um folgende Aspekte:

- Licht- und Wetterverhältnisse unter realen Tunnelbedingungen
(Luftfeuchte, Temperatur, Staubeentwicklung, etc.)

- Gleisgeometrie unter realen Tunnelbedingungen (GVP-Verteilung, Schientyp, Lichtraumprofil, etc.)
- hohe GVP-Genauigkeit (Stabilität)



Abb. 9.4: Wandbolzen eines GVP und dessen Signalisierung durch ein Präzisionsprisma in der Versuchsstrecke Lötischberg-Basistunnel

Die Gleise sind vom Schientyp 3 (Abbildung 9.2, Tabelle 9.1) mit der konventionellen Spurweite von 1435 mm. Dies entspricht den Bedingungen des projektbezogenen Einsatzgebiets im GBT, für den das Gleisvermessungssystem RACER II entwickelt wurde. In der Versuchsstrecke des Lötischberg-Basistunnels sind vier GVP-Paare im Abstand von etwa 20 m im Innengewölbe angeordnet. Die GVP werden durch genormte Wandbolzen realisiert (Abbildung 9.4). Das Punktzentrum entspricht dabei dem Reflexionszentrum eines Prismas der Firma Leica Geosystems. Bei der Verwendung des Präzisionsprismas Leica GPHIP (Abbildung 9.4) kann die höchste Genauigkeit bei der Signalisierung des GVP-Zentrums erzielt [UIC 2014] und damit die Transformation der MSP in das übergeordneten GVS unter optimalen Verhältnissen durchgeführt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Langzeitstabilität der GVP der Teststrecke Krailing aufgrund ihrer Montage an Masten und Schildern allein schon wegen der jahreszeitlich wechselnden Witterungsverhältnisse nicht in vergleichbarer Genauigkeit erreicht werden kann.

9.3.1 Konzept einer Validierungsmessung

Die Kalibrierung einer MSP ist ein komplexer Vorgang, bei dem die Modellierung sämtlicher Einflussgrößen zur Quantifizierung der Messunsicherheit des Gesamtsystems sehr aufwändig und teilweise auch unmöglich ist (Kapitel 5.4.2). Um dennoch die Messunsicherheit der Zielgrößen des RACER II quantifizieren zu können, muss sich das MSS in einem Referenzsystem bewegen, in dem die Zielgrößen hochgenau bestimmt werden können. Die Zielgrößen werden sowohl im MWS durch den RACER II (Ist), als auch im Referenzsystem durch ein unabhängiges Messverfahren (Referenzmesssystem = Soll) bestimmt. Die Differenz = Soll – Ist enthält die Summe der verbleibenden Messunsicherheiten des MSS zuzüglich der Messunsicherheit des Referenzmesssystems. Letztere lässt sich über Herstellerangaben und Erfahrungen quantifizieren (GUM, Ermittlungsmethode B).

Die Transformation des MWS in das GVS hängt insbesondere von der Qualität der GVP ab. Zudem ist die Messunsicherheit des Tachymeters größer als die des Lasertrackers als Referenzmesssystem. Mit Hilfe der PB lässt sich ein unmittelbarer Bezug zwischen MWS und LTS herstellen, wodurch ein Teil der Zielgrößen des RACER II unter Ausschluss einer vorherigen Transformation in das GVS mit den Messdaten des Referenzmesssystems direkt verglichen werden kann.

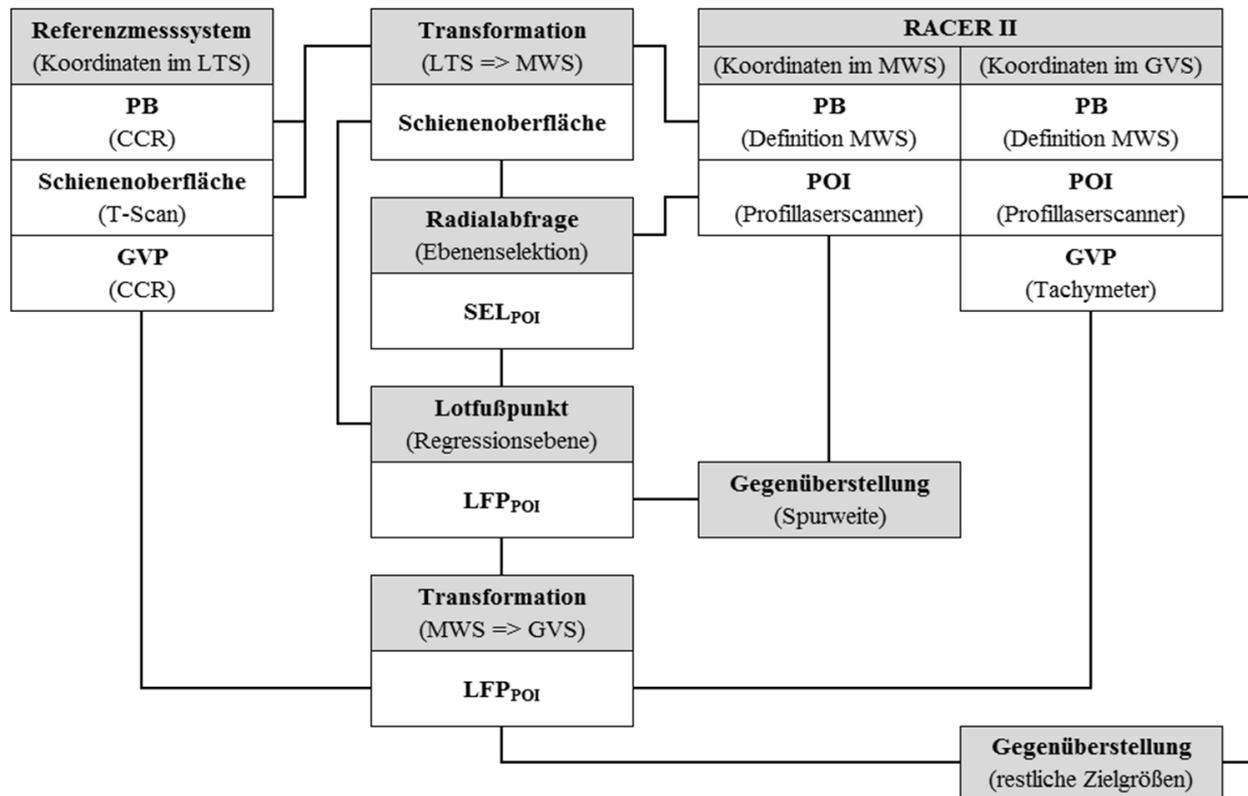


Abb. 9.5: Ablaufschema einer Validierungsmessung

Die Abbildung 9.5 zeigt das Ablaufschema einer Validierungsmessung. Sämtliche Zielgrößen des RACER II liegen nach entsprechender POI-Auswertung sowohl im MWS, als auch im GVS vor und repräsentieren den Ist-Zustand. Die korrespondierenden Zielgrößen des Soll-Zustands werden aus den Messdaten des Referenzmesssystems berechnet und liegen zunächst im LTS vor. Um sie mit den Ist-Werten vergleichen zu können, müssen beide Zielgrößen-Sätze im gleichen Koordinatensystem vorliegen. Die entsprechende Transformation erfolgt über die PB des RACER II, wobei die Schienenoberfläche als Punktwolke über eine 3D-Helmert-Transformation vom LTS in das MWS überführt wird.

Über eine Radialabfrage werden zunächst die Punktgruppen SEL_{POI} aus der Punktwolke der Schienenoberfläche selektiert, wobei die POI jeweils die Mittelpunkte einer Radialabfrage bilden. Das Verfahren ist analog zu Kapitel 6.2.3, (6.3). Mit einem voreingestellten Radius von 1,2 mm werden durchschnittlich etwa $SEL_{POI} = 8-10$ Punkte pro POI selektiert. Sie repräsentieren den Teil der Schienenoberfläche, der sich in kürzester Distanz zum jeweiligen POI befindet. Bei kleinen Radien können etwaige Krümmungen innerhalb der Schienenoberfläche vernachlässigt und SEL_{POI} als Ebene approximiert werden. Aus den Parametern a_1, \dots, a_4 der zugehörigen Regressionsebene wird ein Lotfußpunkt LFP_{POI} wie folgt berechnet:

$$\begin{pmatrix} \text{LFP}_X \\ \text{LFP}_Y \\ \text{LFP}_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{POI}_X \\ \text{POI}_Y \\ \text{POI}_Z \end{pmatrix} + \Psi \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}, \text{ mit } \Psi = \frac{-a_4 - a_1 \text{POI}_X - a_2 \text{POI}_Y - a_3 \text{POI}_Z}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \quad (9.1)$$

LFP_{POI} ist die Projektion eines POI auf die zugehörige Regressionsebene und repräsentiert damit einen Punkt innerhalb der Schienenoberfläche der Referenzmessung. Über die PSW als Teilmenge der POI (Kapitel 8.2) kann bereits die Spurweite im Soll-Ist-Vergleich bestimmt werden. Die restlichen Zielgrößen des RACER II leiten sich aus den PSOK ab, welche jedoch ein nivelliertes Bezugssystem voraussetzen. Ein nivelliertes Bezugssystem ist weder beim LTS, noch beim MWS gegeben, wodurch eine zusätzlich Transformation der LFP_{POI} in das GVS erforderlich ist. Hierbei fließen zusätzlich die Messunsicherheiten des Tachymeters und des GVS ein, die sich in den Restklaffen der Transformation widerspiegeln.

Um die Messunsicherheiten bei der Signalisierung der Punktidentität der GVP zu reduzieren, werden statt Präzisionsprismen (Abbildung 9.4) spezielle Adapter zur Aufnahme eines CCR eingesetzt. Damit messen sowohl der Lasertracker als auch das Tachymeter des RACER II auf ein identisches Ziel. Alternativ kann die abschließende Transformation der LFP_{POI} in das GVS übergangen werden, indem der Lasertracker im Vorfeld der Messung horizontalisiert wird. Dies ist beispielsweise durch ein aufsetzbares, zweiachsiges Präzisionsinklinometer wie der NIVEL 20 von Leica möglich. In dem Fall bildet das LTS gleichzeitig das nivellierte Bezugssystem und das in Abbildung 9.5 dargestellte Messschema kann entsprechend vereinfacht werden.

9.3.2 Durchführung der Validierungsmessung

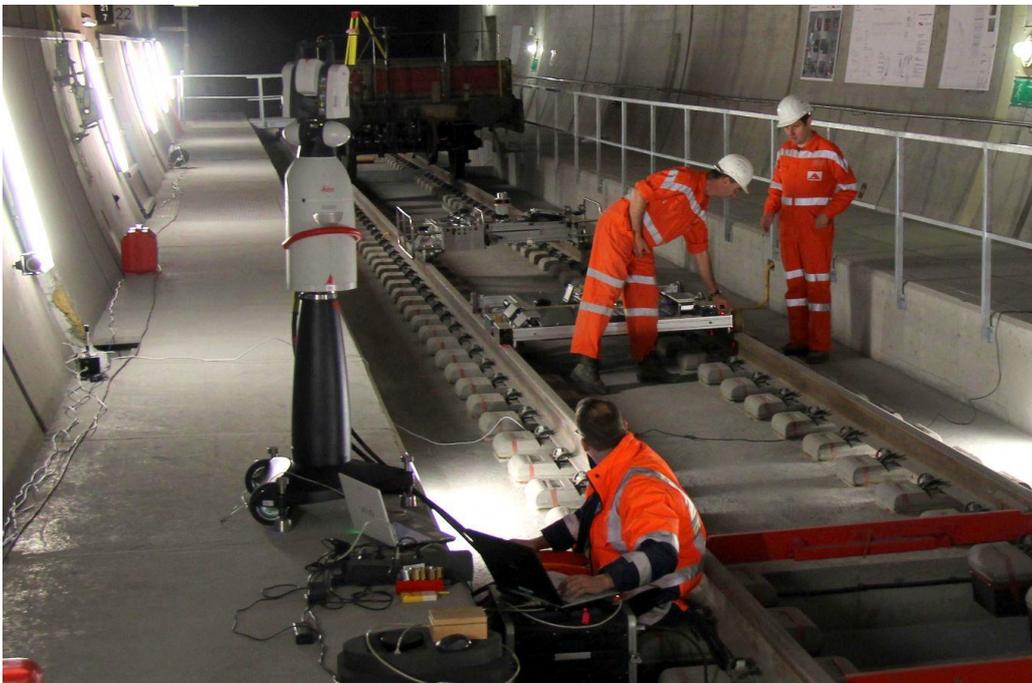


Abb. 9.6: Validierungsmessung auf der Versuchsstrecke des Lötschberg-Basistunnels

Erste Erkenntnisse über die Messunsicherheiten der Zielgrößen des RACER II konnten durch eine Validierungsmessung im Laborsystem gewonnen werden (Abbildung 9.1). Die Ergebnisse

sind in Anlage 9.1 dargestellt, wobei die Messunsicherheit des Lasertrackers als Referenzmesssystem $U_{\text{Ges.}} = \pm 0,07$ mm beträgt.

Die Abbildung 9.6 zeigt die Durchführung der Validierungsmessung auf der Versuchsstrecke des Lötschberg-Basistunnels. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Anlage 9.2 dargestellt. Aufgrund der höheren Zielweiten ergibt sich eine geringfügig höhere Messunsicherheit des Referenzmesssystems mit $U_{\text{Ges.}} = \pm 0,08$ mm. Die Tabelle 9.2 stellt die Ergebnisse beider Validierungsmessungen gegenüber.

Zielgröße RACER II	Laborsystem		Lötschberg-Basistunnel	
	Genauigkeit (1σ)	Präzision (1σ)	Genauigkeit (1σ)	Präzision (1σ)
Stationierung _X [mm]	0,20	0,14	0,09	0,08
Stationierung _Y [mm]	0,16	0,13	0,13	0,13
Stationierung _Z [mm]	0,10	0,07	0,09	0,09
Spurweite [mm]	0,18	0,07	0,23	0,03
Längsneigung [%]	0,23	0,02	0,13	0,02
Querneigung [mm/1,5m]	0,08	0,07	0,15	0,06

Tab. 9.2: Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Validierungsmessungen

Die Ergebnisse der Tabelle 9.2 basieren auf der Analyse der Differenzen ΔL_i mit $i = 1, \dots, n$ aus dem Soll-Ist-Vergleich entsprechend Abbildung 9.5. Die innere Genauigkeit s_p (Präzision) beschreibt die Streuung dieser Differenzen vom ihrem gemeinsamen Mittelwert ΔL_m

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_i - \Delta L_m)^2}{n-1}} \quad (9.2)$$

Zur Aufdeckung systematischer Messabweichungen muss eine Analyse unter Ausschluss von ΔL_m im Rahmen der äußeren Genauigkeit s_G (Genauigkeit) durchgeführt werden:

$$s_G = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_i)^2}{n-1}} \quad (9.3)$$

Die Ergebnisse der Validierungsmessung im Laborsystem zeigen deutliche Differenzen zwischen der Genauigkeit s_G und Präzision s_p in allen Zielgrößen mit Ausnahme der Querneigung. Im Gegensatz dazu sind in den Ergebnissen des Lötschberg-Basistunnels lediglich die Zielgrößen Spurweite, Längs- und Querneigung betroffen. Im Laborsystem sind die Entfernungen zwischen Tachymeter und GVP sehr gering, wodurch die Qualität der Stationierung des RACER II im Vergleich zur Versuchsstrecke im Lötschberg-Basistunnel deutlich geringer ist (Kapitel 9.1). Die Ergebnisse hinsichtlich s_G können mit Ausnahme der Spurweite nur bedingt für eine qualitative Aussage verwendet werden. Sie liefern aber erste Erkenntnisse über die erwartende Größenordnung hinsichtlich der Messunsicherheiten der einzelnen Zielgrößen.

Die Versuchsstrecke im Lötschberg-Basistunnel bietet eine optimale Testumgebung für die Durchführung einer repräsentativen Validierungsmessung. Die Tabelle 8.2 zeigt einen deutlichen Versatz in den Zielgrößen Spurweite, Längs- und Querneigung. Die Zielgrößen Längs- und Querneigung werden durch das GVS beeinflusst, welches auf der Versuchsstrecke nur näherungsweise nivelliert wurde. Für weiterführende Untersuchungen in einem nivellierten System wird auf Kapitel 9.3.3 verwiesen. Es verbleibt die Differenz zwischen der Genauigkeit s_G und Präzision s_P hinsichtlich der Zielgröße Spurweite, die als einzige Zielgröße unabhängig von der Transformation des MWS in das GVS ermittelt werden kann.

9.3.3 Vergleichsmessung RACER \Leftrightarrow RACER II

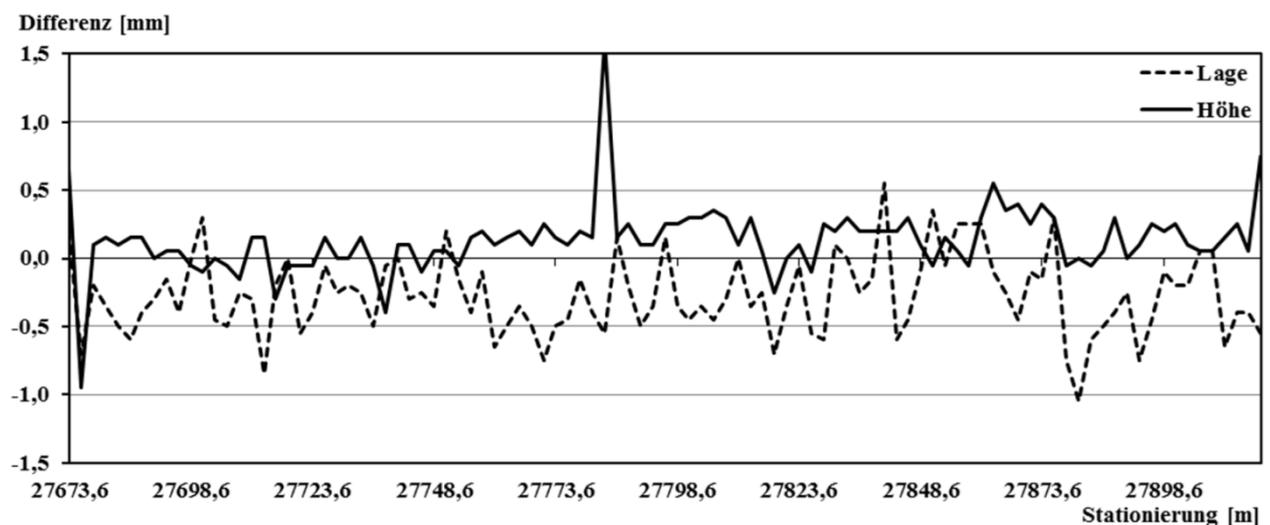


Abb. 9.7: Vergleich beider Gleisvermessungssysteme (Zielgrößen Lage und Höhe)

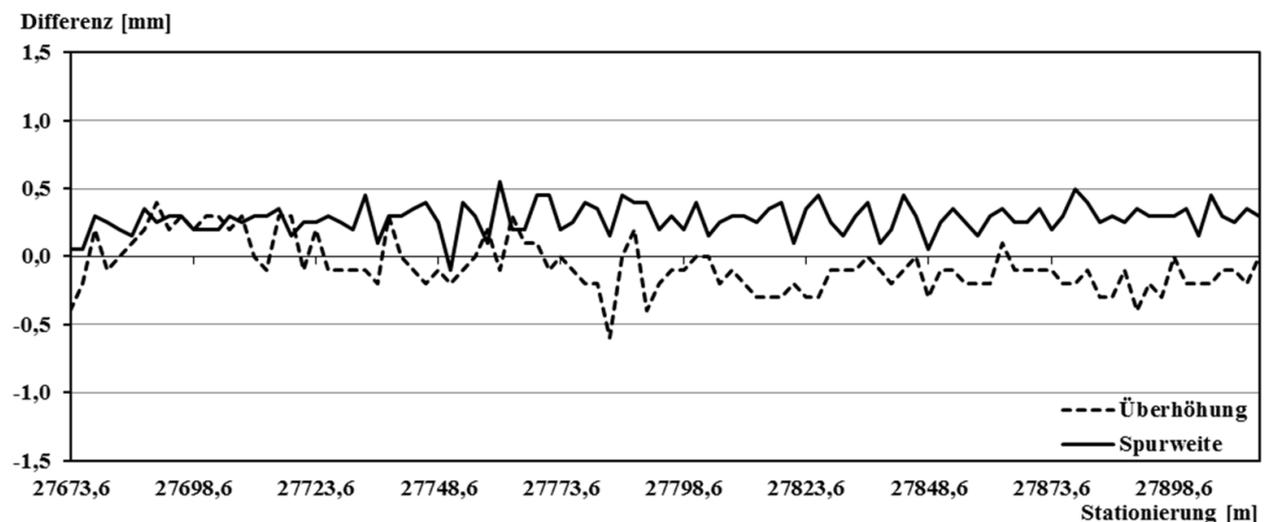


Abb. 9.8: Vergleich beider Gleisvermessungssysteme (Zielgrößen Überhöhung und Spurweite)

Da das Vorgängersystem RACER mit vergleichbaren Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich der Bestimmung der Zielgrößen konzipiert wurde, kann zusätzlich zur Validierungsmessung eine Vergleichsmessung durchgeführt werden, wobei beide Gleisvermessungssysteme den gleichen Streckenabschnitt im Lötschberg-Basistunnel vermessen. Aus der Gegenüberstellung der Zielgrößen können weitere Erkenntnisse über die Messunsicherheit des RACER II gewonnen werden.

Die Differenzen = Zielgröße_{RACER} – Zielgröße_{RACER II} sind in den Abbildungen 9.7 und 9.8 dargestellt. Analog zu (9.2) und (9.3) werden s_P und s_G bestimmt (Tabelle 9.3). Im Gegensatz zur Tabelle 9.2 werden anstatt der ursprünglichen Zielgrößen des RACER II vier abgeleitete Zielgrößen verwendet, welche die Ablagen der Gleisgeometrie bezogen in der Trassierungssoftware Toporail repräsentieren (Kapitel 8.4). Diese Zielgrößen lassen sich aus denen des RACER II ableiten und können direkt mit den Ergebnissen des RACER verglichen werden.

Zielgröße RACER II	Genauigkeit s_G (1σ)	Präzision s_P (1σ)
Lage [mm]	0,40	0,29
Höhe [mm]	0,27	0,25
Überhöhung [mm]	0,20	0,19
Spurweite [mm]	0,30	0,11

Tab. 9.3: Zusammenstellung der Ergebnisse aus dem Vergleich beider Gleisvermessungssysteme

Die Tabelle 9.3 zeigt einen deutlichen Versatz in den Zielgrößen Lage und Spurweite. Die Vergleichsmessung wurde im gleichen Zeitraum durchgeführt wie die Validierungsmessung. Die in Kapitel 9.3.2 gewonnenen Erkenntnisse über die zusätzliche Kalibrierfunktion der Spurweitenberechnung wurden zu diesem Zeitpunkt noch nicht berücksichtigt. Daher ist der systematische Anteil s_G mit etwa 0,2 mm (Tabelle 9.2) mit vergleichbarem Betrag im entsprechenden s_G der Tabelle 9.3 enthalten. Der Versatz hinsichtlich der Zielgröße Lage ist auf die unterschiedlichen Tachymeter beider Gleisvermessungssysteme zurückzuführen.

Bei Betrachtung der Differenzen muss berücksichtigt werden, dass das Vorgängersystem RACER eine andere Technik zur Ermittlung der Zielgrößen verwendet. Die mechanische Klemmung des RACER an die Schienenführung orientiert die MSP über zwei Punkte an einer der beiden Schienen. Der RACER II führt dagegen berührungslose Messungen an vier Bereichen der Schienenoberfläche durch und orientiert die MSP über beide Schienen. Obwohl die Stationierungen beider Gleisvermessungssysteme näherungsweise gleich sind, beziehen sich die Zielgrößen auf unterschiedliche Bereiche der Schienenoberfläche.

10 Schlussbemerkungen

Mit dem Gleisvermessungssystem RACER II wurde die Abnahmevermessung von rund 114 km FF im GBT erfolgreich durchgeführt. Die geforderten Genauigkeiten (Kapitel 3.4.1) können mit dem RACER II nachweislich erzielt werden (Kapitel 9), wobei die Georeferenzierung maßgeblich von der Qualität der GVP-Koordinaten bestimmt wird. Die Online-Auswertung der Messdaten während eines Messzyklus ermöglicht den direkten Vergleich mit der Trassierungssoftware TOPORAIL. Auf einem via WLAN mit dem MSS kommunizierenden Notebook werden die Ablagen zur Sollgeometrie des Gleises unmittelbar numerisch und grafisch dargestellt, so dass der Anwender bei Unstimmigkeiten sofort reagieren kann. Letztere kamen in den durchgeführten Messkampagnen im GBT allerdings äußerst selten vor und nur unter außergewöhnlichen Umgebungsbedingungen wie beispielsweise bei Sichthindernissen im Trassenumfeld oder fehlerhaften GVPs. Im Postprocessing können durch die Berücksichtigung mittels Neuvermessung korrigierter GVP-Koordinaten diesbezüglich erkannte Effekte beseitigt werden.

Die bei der Konzeption angestrebte Zeitoptimierung von 20% gegenüber dem Vorgängersystem RACER (Kapitel 3.4.1) konnte mit rund 25% sogar übertroffen werden. Dabei führt der RACER II einen Stationierungszyklus mit durchschnittlich 45 – 50 Sekunden bei 2,5 m Stationsintervallen durch. Maßgebend für die Zeitersparnis ist der Wegfall des Vorgangs hinsichtlich Heben, Senken und Klemmen des RACER sowie die Beschleunigung des Antriebs beim Verfahren. Der vollautomatisierte Betrieb des RACER II verlief in allen Messkampagnen im GBT reibungslos. Es verbleibt lediglich die manuelle Ausrichtung der Präzisionsprismen und die Kontrolle der Ergebnisse der Online-Auswertung durch den Anwender.

Durch die Neukonzeptionierung des RACER II wird der Messwagen mit einem separaten Antriebswagen verfahren. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Fertigung des Messwagens in Leichtbauweise, was die Entnahme des Gleisvermessungssystems bei Zugdurchfahrten, den generellen Transport und die Kalibriervorgänge erheblich erleichtert. Zudem ermöglicht der Antriebswagen das bequeme Mitführen zusätzlicher Ausrüstung. Ferner bietet der Antriebswagen Potential für die Anbringung weiterer Sensoren wie beispielsweise einem terrestrischen Laserscanner zur Erfassung des Lichtraumprofils.

Die Verwendung von Pedelec-Akkus für die Energieversorgung hat sich während der Messkampagnen bewährt. Die Batterien liefern mit 48 V eine hohe Ausgangsspannung für eine große Bandbreite an Sensormodulen. Sie sind in wenigen Stunden aufgeladen und aufgrund der ursprünglichen Anwendung für Fahrräder mit Elektroantrieb wetterfest. Zudem können die handelsüblichen Pedelec-Akkus im Schadensfall problemlos ersetzt werden. Die gesamte Sensorik des RACER II kann mit einer Batterieladung durchschnittlich 12 Stunden betrieben werden.

Das Gleisvermessungssystem RACER II kann auch außerhalb von Tunnelbauwerken zur Vermessung von Trassen in Schotterbauweise eingesetzt werden, sofern ein entsprechendes GVS vorhanden ist und sich die GVP mittels Präzisionsprismen signalisieren lassen. Voraussetzung

für einen effizienten Einsatz ist, dass der Messprozess nach erfolgter Initialisierung bei befahrenen Strecken möglichst nicht unterbrochen wird.

Möglichkeiten zur Weiterentwicklung ergeben sich durch die Wahl anderer Sensormodule, die Integration zusätzlicher Sensormodule, konstruktive Maßnahmen der MSP und die Optimierung der Systemkalibrierung.

Wahl anderer Sensormodule

Unter Beibehaltung des SGM können beispielsweise portable Lasertracker wie der AT-402 von Hexagon Metrology [Hexagon Metrology 2013] verwendet werden. Dadurch wären sowohl Messgeschwindigkeit als auch die Messgenauigkeit einer Einzelpunktmessung deutlich erhöht. Ferner ist es denkbar, aufgrund der höheren Messgeschwindigkeit zusätzliche GVP in ein Messprofil einzubeziehen oder alternativ die standardmäßige Messung in zwei Fernrohrlagen zur strengen Elimination der Achsfehler durchzuführen.

Das positionsgebende Sensormodul kann gegebenenfalls auch durch einen terrestrischen Laserscanner ersetzt werden, der im SGM einen 360°-Panoramascan durchführt, wobei die Signalisierung der GVP durch Kugeln realisiert wird. Auf diese Weise können neben den eigentlichen Zielgrößen geometrische Informationen der unmittelbaren Messumgebung abgeleitet werden wie beispielsweise das Lichtraumprofil oder die Position der Bahntechnik. Das Verfahren eignet sich aufgrund des zeitlichen Mehraufwands eines Panoramascans nicht für kurze Intervalle zwischen den einzelnen Messprofilen. Für weitere Details zu diesem Ansatz wird auf [Neumann u.a. 2010] verwiesen. Weitere, im Hinblick auf ihre Eignung jedoch noch zu untersuchende Alternativen zur Bestimmung der äußeren Orientierung der MSP stellen beispielsweise Indoor-Navigationssysteme wie das iGPS [Nikon 2010], [Wagner 2012] (Kapitel 3.4.3.1) oder die von [Amberg 2015] verwendete IMU dar, welche gleichzeitig die kinematische Messdatenerfassung ermöglichen würden.

Integration zusätzlicher Sensormodule

Für die Erweiterung des Anwendungsspektrums ist die Einbindung neuer Sensoren bzw. Sensormodule wie beispielsweise Ultraschallsensoren zur Detektion von Haarrissen innerhalb der Schienenstränge oder terrestrische Laserscanner, die im Profilmodus zur Analyse des Lichtraumprofils eingesetzt werden können, zu untersuchen.

Konstruktive Maßnahmen

Wenngleich es sich aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit dem RACER II nicht aufdrängt, wäre die Vereinigung von Mess- und Antriebswagen eine Option für eine Weiterentwicklung. Dadurch reduzieren sich die Gleisentnahmezeiten (entkuppeln, getrennte Entnahme und anschließendes Wiedereinsetzen beider Wagen), das Transportgewicht insgesamt und die räumliche Ausdehnung des Gesamtsystems. Gleichzeitig wird jedoch das Gewicht des Messwagens erhöht und die Montage weiterer Sensoren und Sensormodule aufgrund der reduzierten Monta-

gefläche der MSP erschwert. Ferner kann zur Steigerung der Stehzeiten und somit der Reichweite die Verwendung einer Brennstoffzelle in Betracht gezogen werden, wobei der Einfluss des durch den Methanolverbrauch entstehenden Gewichtsverlusts auf die Stabilität der MSP untersucht werden sollte.

Optimierung der Systemkalibrierung

Mit der indirekten Bestimmung der 6-DoF-Parameter der Lasertriangulationssensoren über Referenzgeometrien (Kapitel 6.2) können die angestrebten Genauigkeiten der inneren Orientierung erzielt werden. Ausschlaggebend sind die Genauigkeit des Referenzmesssystems sowie die Auswahl und Anordnung der Referenzgeometrien. Die Referenzkörper (Kapitel 6.2.1) wurden aus anschaulichen Überlegungen heraus modelliert. Zur Optimierung bietet es sich an, die Auswahl und Anordnung der Referenzgeometrien im Vorfeld zu simulieren.

Neben solchen Erweiterungen bieten die bereits beim RACER II vorhandenen Sensormodule bisher ungenutzte Potentiale. So enthalten die Profildaten der Lasertriangulationssensoren Informationen der Schienenoberfläche, aus denen beispielsweise die Schienenabnutzung abgeleitet werden kann, indem die gemessenen Profildaten mit einem Sollprofil verglichen werden (Kapitel 8.2.3). Aus dem Vergleich solcher Aufnahmen kann auf den Verschleiß der Schiene durch den Betrieb geschlossen werden. Dieser Ansatz erfordert weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der relativen Orientierung des Soll-Profiles gegenüber den Profildaten sowie zwecks Abspaltung die Erkennung von Fremdkörpern oder Verschmutzungen auf der Schienenoberfläche.

Abkürzungsverzeichnis

ADM	Absolute Distance Measurement
ATG	AlpTransit Gotthard AG
CAD	Computer-Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CCR	Corner-Cube-Reflektor
DB	Deutsche Bahn AG
DB_REF	bundeseinheitliches GVS der DB
DHHN 92	Deutsches Haupthöhennetz 1992
DoF	Degrees of Freedom
EDM	Elektrooptischer Distanzmesser
ETRF 89	European Terrestrial Reference Frame 1989
FF	Feste Fahrbahn
GBT	Gotthard-Basistunnel
GeoLab	Geodätisches Labor (UniBwM)
GG	Gegengewicht
GHM	Gauß-Helmert-Modell
GK	Gauß-Krüger-Abbildung
GMA	Gleismittelachse
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements
GVP	Gleisvermarkungspunkte (Gleisversicherungspunkte, SBB)
GVS	Gleisvermarkungssystem (Gleisversicherungssystem, SBB)
HK	Homogenitätskriterium
IDU	Integrated Detector Units
IFM	Interferometrische Messung
IKS	Inklinometer-Koordinatensystem
IMU	Inertial Measuring Unit
LED	Light-Emitting Diode
LN02	Landesnivellementnetz 1902
LUT	Look-Up-Table
LN02	Landesnivellement-Netz von 1902 (Schweiz)
LV03	Schweizerische Landesvermessung 1903
LV95	Schweizerische Landesvermessung 1995
MEMS	Micro Electronic Mechanical System
MMS	Mobile Mapping System
MSP	Multisensorplattform
MSS	Multisensorsystem
MWS	Messwagen-Koordinatensystem
NIST	National Institute of Standards and Technology

NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline
PB	Passbohrung
PLS	Profillaserscanner-Koordinatensystem
POI	Point of Interest
PSOK	Punktobjekt Schienenoberkante
PSW	Punktobjekt Spurweite
RACER	Rapid Automated Control Equipment for Rails
RFG	Referenzflächengeometrie(-Koordinatensystem)
S	Sensor-Koordinatensystem
SBB	Schweizer Bundesbahn
SBB03	bundeseinheitliches GVS der SBB
SGM	„Stop & Go“-Modus
SLAM	Simultaneous Localisation and Mapping
SMA	Schienenmittelachse
TIN	Triangulated Irregular Network
TMS	Tachymeter-Koordinatensystem
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
UniBwM	Universität der Bundeswehr München
USB	Universal Serial Bus

Literaturverzeichnis

- [Akyilmaz 2007] Akyilmaz, O.: *Total Least Squares Solution of Coordinate Transformation*, Survey Review, Ausgabe 39, S. 68-80, 2007.
- [Amberg 2015] Amberg Technologies: *Gleisvermessung: schneller, effizienter und genauer*, Datenblatt, www.ambergtechnologies.ch, letzter Zugriff 03/2015.
- [Arras u. Siegart 1997] Arras, K.O., Siegart, R.Y.: *Feature Extraction and Scene Interpretation for Map-based Navigation and Map Building*, Proceedings of SPIE, Mobile Robotics XII, S. 42-53, 1997.
- [Bähr u. Vögtle 2005] Bähr, H.-P., Vögtle, T.: *Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*, 4. Auflage, ISBN-3-87907-409-7, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005.
- [Baltzakis u.a. 2003] Baltzakis, H., Argyros, A., Trahanias, P.: *Fusion of Laser and Visual Data for Robot Motion Planning and Collision Avoidance*, Machine Vision and Application, Ausgabe 12, S. 431-441, 2003.
- [Becker u.a. 2004] Becker, R., Benning, W., Effkemann, C.: *3D Monoplotting, kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen*, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Ausgabe 5, S. 347-355, Wißner Verlag, 2004.
- [BLS 2005] BLS Alp Transit AG: *Lötschberg-Basistunnel: von der Idee zum Durchschlag*, ISBN 3-7272-1174-1, Stämpfli Verlag, Bern, 2005.
- [Böhm 2005] Böhm, J.: *Modellbasierte Segmentierung und Objekterkennung aus Distanzbildern*, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Ausgabe C/583, 2005.
- [Campbell u. Flynn 2001] Campbell, R.J., Flynn, R.J.: *A Survey of Freeform Object Representation and Recognition Techniques*, Computer Vision Image Understanding, Ausgabe 81/2, S. 166-210, 2001.
- [Castro u.a. 2004] Castro, D., Nunes, U., Ruano, A.: *Feature Extraction for moving Objects Tracking System in Indoor Environments*, Proceedings of the 5th IFAC/Euron Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, S. 5-7, 2004.
- [Chetverikov u.a. 2005] Chetverikov, D., Stepanov, D., Krsek, P.: *Robust Euclidean Alignment of 3D Point Sets: the trimmed Iterative Closest Point Algorithm*, Image and Cision Computing, IEEE, Vol. 23, I. 3, S. 299-309, 2005.
- [Deumlich u. Staiger 2002] Deumlich, F., Staiger, R.: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*, 9. Auflage, ISBN 3-87907-305-8, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002.
- [DIN-13005 1999] Deutsches Institut für Normung (DIN): *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*, DIN V ENV 13005:1999, deutsche Fassung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1999.
- [DIN-18710 2010] Deutsches Institut für Normung (DIN): *Ingenieurvermessung*, DIN-18710, ICS 07.040, Normausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, September 2010.
- [Dold 2010] Dold, C.: *Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans*, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik, Ausgabe 283, Hannover, 2010.

- [Drixler 1993] Drixler, E.: *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*, Dissertation, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Deutsche Geodätische Kommission, Ausgabe C/409, 1993.
- [Dymel 2004] Dymel, T.: *Überprüfung des Laser Trackers Leica LTD500 und Einsatz bei Messaufgaben in der industriellen Messtechnik*, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie, München, 2004.
- [Eichhorn 2005] Eichhorn, A.: *Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung*, Dissertation, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Deutsche Geodätische Kommission, Ausgabe C/641, 2005.
- [Fastenrath 1977] Fastenrath, F. (Hrsg.): *Die Eisenbahnschiene - Theoretische und praktische Hinweise zur Beanspruchung, Werkstoffbeschaffenheit, Profilwahl, Verschweißung und Behandlung in Gleis und Werkstatt*, ISBN 3433007837, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin, München, Düsseldorf, 1977.
- [Forsberg u.a. 1993] Forsberg, J., Ahmann, P., Wernersson, A.: *The Hough Transform inside the Feedback Loop of a Mobile Robot*, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Vol. 1, S. 791-798, 1993.
- [Gielsdorf u.a. 2008] Gielsdorf, F., Gruendig, L., Milev, I.: *Deformation Analysis with 3D Laser Scanning*, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon (Portugal), 2008.
- [Goldschmidt 2003] Goldschmidt, S.: *Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen*, Dissertation, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Bonifatius Verlag, Paderborn, 2003.
- [Gräfe 2003] Gräfe, G.: *Mobile Mapping with Laser Scanners using the MoSES*, Optical 3D-Measurement Techniques VI, Zürich, Ausgabe 1, S. 381-388, 2003.
- [Gräfe 2007] Gräfe, G.: *Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenbau*, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Ausgabe 84, Neubiberg, 2007.
- [Hassan u.a. 2008] Hassan, T., El-Sheimy, N., Lavigne, M.: *VISAT: The Avenue to Highway Data Bank*, 7th International Conference on Managing Pavement Assets, Calgary Alberta, 2008.
- [Haykin 2001] Haykin, S.: *Kalman Filtering and Neural Networks*, John Wiley & Son Inc., New York S. 1-22, 2001.
- [Haynes 2011] Haynes, W. M.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, ISBN 987-1-4398-5511-9, 92. Auflage, Taylor & Francis, 2011.
- [Heister u.a. 2007] Heister, H., Liebl, W., Pink, S., Riesen, H.-U.: *RACER – ein automatisiertes, kinematisches System zur Gleisvermessung*, Ingenieurvermessung 07 – Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, S. 55 - 68, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.
- [Hennes 2013] Hennes, M.: *Zum Umgang mit Unsicherheiten bei geodätischen Mess- und Auswerteverfahren*, DVW Schriftenreihe, Band 71, S. 25-46. ISBN 978-3-89639-917-5, 2013.

- [Hesse 2008] Hesse, C.: *Hochauflösende, kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern*, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik, Ausgabe 268, Hannover, 2008.
- [Heunecke 2014] Heunecke, O.: *Eignung geodätischer Messverfahren zur Maßkontrolle im Hochbau*, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Ausgabe 4, S. 241-251, Wißner Verlag, 2014.
- [Hewlett-Packard 1986] Hewlett-Packard: *Quartz Thermometer 2804A - Operating and Service Manual*, Datenblatt, Hewlett-Packard Company, California, 1986.
- [Hexagon Metrology 2007] Hexagon Metrology: *emScon Reference Manual*, Handbuch, Leica Geosystems AG, Metrology Division, Version 3.0, Schweiz, 2007.
- [Hexagon Metrology 2013] Hexagon Metrology: *Leica Absolute Tracker AT402*, Datenblatt, Hexagon Metrology, AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig, 2013.
- [Hygrosens Instruments 2009] Hygrosens Industries: *Drucksensormodul mit Spannungsausgang und I2C-Bus*, Datenblatt, Hygrosens Instruments GmbH, Löffingen, 2009.
- [IGI 2012] Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH (IGI): *StreetMapper 360*, Datenblatt, www.igi.eu, 2012, letzter Zugriff 03/2015.
- [JCGM 2008] Working Group 1 of the Joint Committee of Guides in Metrology (JCGM): *Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, Richtlinie, GUM 1995 with minor corrections, JCGM100:2008, 1st Edition, 2008, www.bipm.org, letzter Zugriff 10/2014.
- [Kahmen 1997] Kahmen, H.: *Vermessungskunde*, ISBN 3-11-015399-8, 19. überarbeitete Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, 1997.
- [Kapoutsis u.a. 1999] Kapoutsis, C., Vavoulidis, C., Pitas, I.: *Morphological Iterative Closest Point Algorithm*, IEEE Transactions on Image Processing, Ausgabe 8/11, S. 1644-1646, 1999.
- [Kern 2003] Kern, F.: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*, Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, Ausgabe 19, 2003.
- [Knothe 2001] Knothe, K.: *Gleisdynamik*, ISBN 3-433-01760-3, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2001.
- [Koch 2004] Koch, K.R.: *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*, 4. bearbeitete Auflage, www.igg.uni-bonn.de, ehemals Ferdinand Dümmlers Verlag, Bonn, 2004, letzter Zugriff: 09/2013.
- [Kraus 2004] Kraus, K.: *Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*, Band 1, 7. Auflage, ISBN 3-11-017708-0, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 2004.
- [Leica 1989] Leica Heerburg AG: *Nivel 20 Handbuch*, Handbuch, Version 2.92, Leica Heerburg AG - Photogrammetrie und Metrologie, Unterfelden, Schweiz, 1989.
- [Leica 2009] Leica Geosystems: *Leica TM30 - Technical Data*, Datenblatt, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 2009.

- [Leica 2013] Leica Geosystems: *PCMM Systemspezifikationen, Leica Absolute Tracker und Leica T-Produkte*, Datenblatt, Leica Geosystems, Metrology Products, CH-5035 Unterfeldern, 2010, <http://metrology.leica-geosystems.com>, letzter Zugriff 09/2013.
- [Leica 2014] Leica Geosystems AG: *Leica Pegasus:Two - Mobile Mapping Solution*, Datenblatt, www.leica-geosystems.com, 2014, letzter Zugriff 03/2015.
- [Lichtberger 2003] Lichtberger, B.: *Handbuch Gleisbau - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*, ISBN 3-87814-803-8, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2003.
- [Mach u. Petschek 2006] Mach, R., Petschek, P.: *Visualisierung digitaler Gelände- und Landschaftsdaten*, ISBN 10 3-540-30532-7, Springer Verlag, Heidelberg, 2006.
- [Maron 2015] Maron, M.: *Gleisversicherung SBB und koordinatenbasierter Gleisbau*, Vortrag, VDV-Seminar "Gleisbau 2015", 27.-28.02.2015, Berlin., 2015.
- [Maron u. Beda 2004] Maron, M., Beda, R.: *Das absolute Gleisversicherungssystem der SBB*, Geomatik Schweiz, 102/12, S. 730-734, 2004.
- [Martinez-Cantin u.a. 2006] Martinez-Cantin, R., Castellanos, J.A., Tardos, J.D., Montiel, J.M.M.: *Adaptive Scale Robust Segmentation for 2D Laser Scanner*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 796-801, 2006.
- [MEAS 2010] Measurement Specialties (MEAS): *D-Series Inclinometer*, Datenblatt, MEAS Deutschland GmbH, Dortmund, 2010.
- [MEL 2010] MEL, Intelligente Sensoren und Messsysteme: *M2-iLAN-2 Laserscanner*, Datenblatt, Eching, www.MELsensor.de, 2010, letzter Zugriff 03/15.
- [Meyer u. Ahrend 2010] Meyer, A., Ahrendt, C.: *Die Bestimmung der "Soll"-Strecken der Kalibrierbasis der Universität der Bundeswehr München durch Anwendung verschiedener Präzisionsdistanzmessverfahren*, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie, München, 2010.
- [Minguez u.a. 2006] Minguez, J., Montesano, L., Lamiroux, F.: *Metric-based Iterative Closest Point Scan Matching for Sensor Displacement Estimation*, Robotics IEEE Transactions, Vol. 22, I. 5, S. 1047-1054, 2006.
- [Minten 2011] Minten, H.: *Railmapper - a Mobile Mapping Solution for Rails*, News-Letter, Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH (IGI), www.igi.eu, 2011, letzter Zugriff 03/2015.
- [Möser u.a. 2000] Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H., Werner, H.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Eisenbahnbau*, 2. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 3-87907-297-3, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- [Neitzel u.a. 2010] Neitzel, F., Mordwinzew, W., Lerche, C.: *Untersuchung von Registrierungsverfahren hinsichtlich des Einsatzes terrestrischer Laserscanner in der Deformationsmessung*, Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), Ausgabe 117/6, S. 213-219, 2010.
- [Neumann u.a. 2010] Neumann, I., Liebl, W., Heister, H.: *Simultane Endkontrolle der Gleisgeometrie und 3D-Bestandsdatenerfassung im Tunnelbau mit dem automatisierten Gleismesswagen RACER*, Beiträge des 16. Internationalen Kurses für Ingenieurvermessung, München, Wichmann Verlag, S. 79-91, 2010.

- [Nguyen u.a. 2005] Nguyen, V., Martinelli, A., Tomatis, N., Siegart, R.: *A Comparison of Line Extraction Algorithms using 2D Laser Rangefinder for Indoor Mobile Robotics*, Artikel, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), Edmonton, 2005.
- [Niemeier 2008] Niemeier, W.: *Ausgleichsrechnung*, 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Walter de Gruyter Verlag, ISBN 3110190559, 2008.
- [Nikon 2010] Nikon Metrology Group: *iSpace - Large Volume Metrology, Tracking and Positioning*, Datenblatt, Nikon Metrology GmbH, Deutschland, 2010.
- [Nikon 2011] Nikon Metrology Group: *Indoor GPS principles of operating*, Leuven, Belgien, 2011.
- [NIST 2006] National Institute of Standards and Technology (NIST): *Performance Evaluation of Laser-based Spherical Coordinate Measurement Systems*, ASME B89.4.19-2006 Standard, www.asme.org, 2006, letzter Zugriff 05/2015.
- [Paroscientific 1997] Paroscientific Inc.: *Digiquartz Intelligent Barometers and Barometric Standards*, Datenblatt, Paroscientific Inc., Washington, 1997.
- [Pavlidis u. Horowitz 1974] Pavlidis, T., Horowitz, S.L.: *Segmentation of Plane Curves*, IEEE Transactions on Computers, Vol. C-23, No. 8, S. 860-870, 1974.
- [Piegl u. Tiller 1997] Piegl, L., Tiller, W.: *The NURBS Book: Monographs in Visual Communication*, 2nd Edition, ISBN 978-3-3642-59223-2, Springer Verlag, Heidelberg, 1997.
- [Premebida u. Nunes 2005] Premebida, C., Nunes, U.: *Segmentation and Geometric Primitives Extraction from 2D Laser Range Data for Mobile Robot Applications*, Robotica 2005 - Actas do Encontro Cientifico, Institute of Systems and Robotics, University of Coimbra, 2005.
- [Retscher 1996] Retscher, G.: *3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearem Filterverfahren*, Dissertation, Technische Universität Wien, Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, 1996.
- [Riebold 2000] Riebold, K.: *Großmaschinen für Arbeiten am Eisenbahnoberbau*, Tiefbau, Jg. 112, Nr. 7, S. 416-424, ISSN 0944-8780, 2000.
- [Rietdorf 2005] Rietdorf, A.: *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischen Messprinzip*, Dissertation, C.H. Beck Verlag, München, ISBN 978-3-7696-5021-1, 2005.
- [Ril. DB 2003] Deutsche Bahn AG: *Grundlagen der Oberbauinspektion*, Richtlinie 821.1000: Oberbau inspizieren: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.05.2003, 2003.
- [Ril. DB 2006-1] Deutsche Bahn AG: *Fahrbahnen abstecken*, Richtlinie, Richtlinie 883.0031: Gleis- und Bauvermessung: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.01.2006, 2011.
- [Ril. DB 2006-2] Deutsche Bahn AG: *Oberbauarbeiten beurteilen und abnehmen; Gleisneu- oder Gleisumbau abnehmen*, Richtlinie 824.8110: Gleis- und Bauvermessung: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.01.2006, 2011.

- [Ril. DB 2007] Deutsche Bahn AG: *Herstellen und aktualisieren des Festpunktsystems und der Vermarkung; Beauftragungsverfahren*, Richtlinie 824.0310: Oberbauarbeiten durchführen: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.01.2007, 2007.
- [Ril. DB 2008] Deutsche Bahn AG: *Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn*, Richtlinie in Verbindung mit der technischen Mitteilung zum oberbautechnischen Regelwerk RO 03/2002, 4. überarbeitete Auflage, Stand 01.08.2002, 2008.
- [Ril. DB 2011-1] Deutsche Bahn AG: *Festpunktfelder einrichten und nachweisen; Geodätisches Datum DB_REF*, Richtlinie 883.0020, Anlage 1: Gleis- und Bauvermessung: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.01.2011, 2011.
- [Ril. DB 2011-2] Deutsche Bahn AG: *Fahrbahnen aufmessen*, Richtlinie 883.0025: Gleis- und Bauvermessung: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.01.2011, 2011.
- [Ril. DB 2011-3] Deutsche Bahn AG: *Fahrbahnen abstecken; vermessungstechnische Anforderungen zum Bau der Festen Fahrbahn*, Richtlinie 883.0031, Anlage 1: Gleis- und Bauvermessung: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.01.2011, 2011.
- [Rump 1999] Rump, S.M.: *INTLAB - INTerval LABORatory*, Developments in Reliable Computing, S. 77-104, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Scharfschwerdt 2010] Scharfschwerdt, M.: *Erzeugung hierarchischer Gitter mittels globaler Parametrisierung von NURBS-Flächenverbänden*, Dissertation, Fakultät für Mathematik, Technische Universität Dortmund, 2010.
- [Schmidt 2015] Schmidt, U.: *GNSS in der Gleisvermessung, Grenzen der Genauigkeiten, Höhenproblematik*, Vortrag, VDV-Seminar "Gleisbau 2015", 27.-28.02.2015, Berlin, 2015.
- [Schrack 1977] Schrack, K.: *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik - Anleitung und Beispiele*, Oldenburg Verlag, München, 1977.
- [Schulz u. Ingensand 2004] Schulz, T., Ingensand, H.: *Laserscanning - Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen*, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Kap. Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik, Kap. Laserscanning - Genauigkeitsuntersuchungen, S. 90-97, 2004.
- [Schulze 2009] Schulze, M. J.: *Optimale Auswertung von kinematischen Neigungsmessungen mit simultaner tachymetrischer Positionsbestimmung bei einem kinematischen Gleismesssystem*, Diplomarbeit, Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover, 2009.
- [Selimovic 2006] Selimovic, I.: *Improved Algorithms for the Projection of Points on NURBS Curves and Surfaces*, Computer Aided Geometric Design, Vol. 23/5, S. 439-445, 2006.
- [Staiger 2001] Staiger, R.: *Motivation und Strategie zur Prüfung Geodätischer Instrumente*, Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, DVW-Schriftenreihe 42, S. 8-23, Konrad Wittwer Verlag, 2001.
- [Staiger 2005] Staiger, R.: *The geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS)*, FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Kairo, Ausgabe TS 38.5, 2005.

- [Stauning 2003] Stauning, O.: *Flexible automatic Differentiation using Templates and Operator Overloading in C++*, Präsentation, Automatic Differentiation Workshop at Shrivenham Campus, Cranfield University, www.fadbad.com, 2003, letzter Zugriff 09/2013.
- [Stewart u.a. 2003] Stewart, C.V., Chia-Ling, T., Roysam, B.: *The Dual-Bootstrap Iterative Closest Point Algorithm with Application to Retinal Image Registration*, Medical Imaging, IEEE Transactions, Vol. 22, I. 11, S. 1379-1394, 2003.
- [Strübing u. Neumann 2013] Strübing, T., Neumann, I.: *Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen*, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Ausgabe 3, S. 210-221, Wißner Verlag, 2013.
- [Toth 2009] Toth, C.K.: *R&D of Mobile Lidar Mapping and Future Trends*, ASPRS 2009 Annual Conference, Baltimore, 2009.
- [Trimble 2013] Trimble: *GODO CE 2.0: für Gleisstopparbeiten*, Datenblatt, www.trimble.com, 2013, letzter Zugriff 03/2015.
- [Thrun u.a. 2005] Thrun, S., Burgard, W., Fox, D.: *Probabilistic Robotics – Intelligent Robotics and autonomous Agents*, 20. gebundene Ausgabe, The Mit Press Verlag, ISBN 9780262201629, 2005.
- [Vennegeerts 2011] Vennegeerts, H.: *Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme*, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik, Hannover, Ausgabe 290, ISSN 0174-1454, 2011.
- [Völter 2011] Völter, U.: *Vermessungsarbeiten für die Feste Fahrbahn im Gotthard-Basistunnel*, EI – Der Eisenbahningenieur, Bd. 62, Ausgabe 09/2011, S. 6-13, ISSN 0013-2810, 2011.
- [Wagner 2011] Wagner, C.: *Genauigkeits- und Effizienzsteigerung für die tachymetrische Georeferenzierung bei dem automatischen Gleismesssystem RACER II*, Oberseminararbeit (unveröffentlicht), Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie, München, 2011.
- [Wagner 2012] Wagner, C.: *Untersuchung des Potentials von iGPS zur schnellen statischen und kinematischen 6 DoF Georeferenzierung mobiler Plattformen*, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie, München, 2012.
- [Wang u.a. 2008] Wang, C., Hassan T., El-Sheimy, N., Lavigne, M.: *Automatic Road Vector Extraction for Mobile Mapping Systems*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Ausgabe XXXVII/B3b, Beijing, S. 515-522, 2008.
- [Weigend 2004] Weigend, M.: *Linienführung und Gleisplangestaltung*, VDEI-Schriftenreihe, DVV Media Group GmbH, Eurailpress, Hamburg, ISBN 978-3-7771-0321-1, 2004.
- [Wirth 2008] Wirth, H.: *Der neue Lichtraummesszug LIMEZ III der Deutschen Bahn AG*, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Ausgabe 3, S. 180-186, Wißner Verlag, 2008.
- [ZMD 2006] ZMD: *TSic - High Precision Temperature Sensor IC*, Datenblatt, ZMD AG, Dresden, 2006.

Internetquellen

- [AlpTransit Gotthard 2015] AlpTransit Gotthard AG: www.alptransit.ch/de/home, letzter Zugriff: 05/2015.
- [Bentley 2015] Bentley Systems Inc.: www.bentley.com/de-DE/Products, letzter Zugriff 02/2015.
- [intermetric 2015] intermetric GmbH: www.intermetric.de, letzter Zugriff 03/2015.
- [Obermeier 2015] Obermeier Planen+Bauen, Autodesk Inc.: www.provi-cad.de, letzter Zugriff 02/2015.
- [P3D Systems 2015] P3D Systems: www.p3dsystems.com, letzter Zugriff 04/2015.
- [Plasser u. Theurer 2015] Plasser & Theurer: www.plassertheurer.com, letzter Zugriff 03/2015.
- [Rheinmetall Defence 2015] Rheinmetall Defence: www.rheinmetall-defence.com, letzter Zugriff 04/2015.
- [Rhomberg 2014] Rhomberg Bahntechnik GmbH: www.btloetschberg.ch, letzter Zugriff 10/2014.
- [Ristag 2015] Ristag Ingenieure AG: www.ristag.ch, letzter Zugriff 05/2015.
- [SenGIS 2014] SenGIS: www.sengis.uni-hohenheim.de, letzter Zugriff 04/2015.
- [UDV 2015] Unfallforschung der Versicherer (UDV): www.udv.de/de/fahrzeug/pkw/fahrer-assistenzsysteme, letzter Zugriff 04/2015.
- [UIC 2014] Internationaler Eisenbahnverband (UIC): www.uic.org, letzter Zugriff 01/2014.

Abbildungsverzeichnis

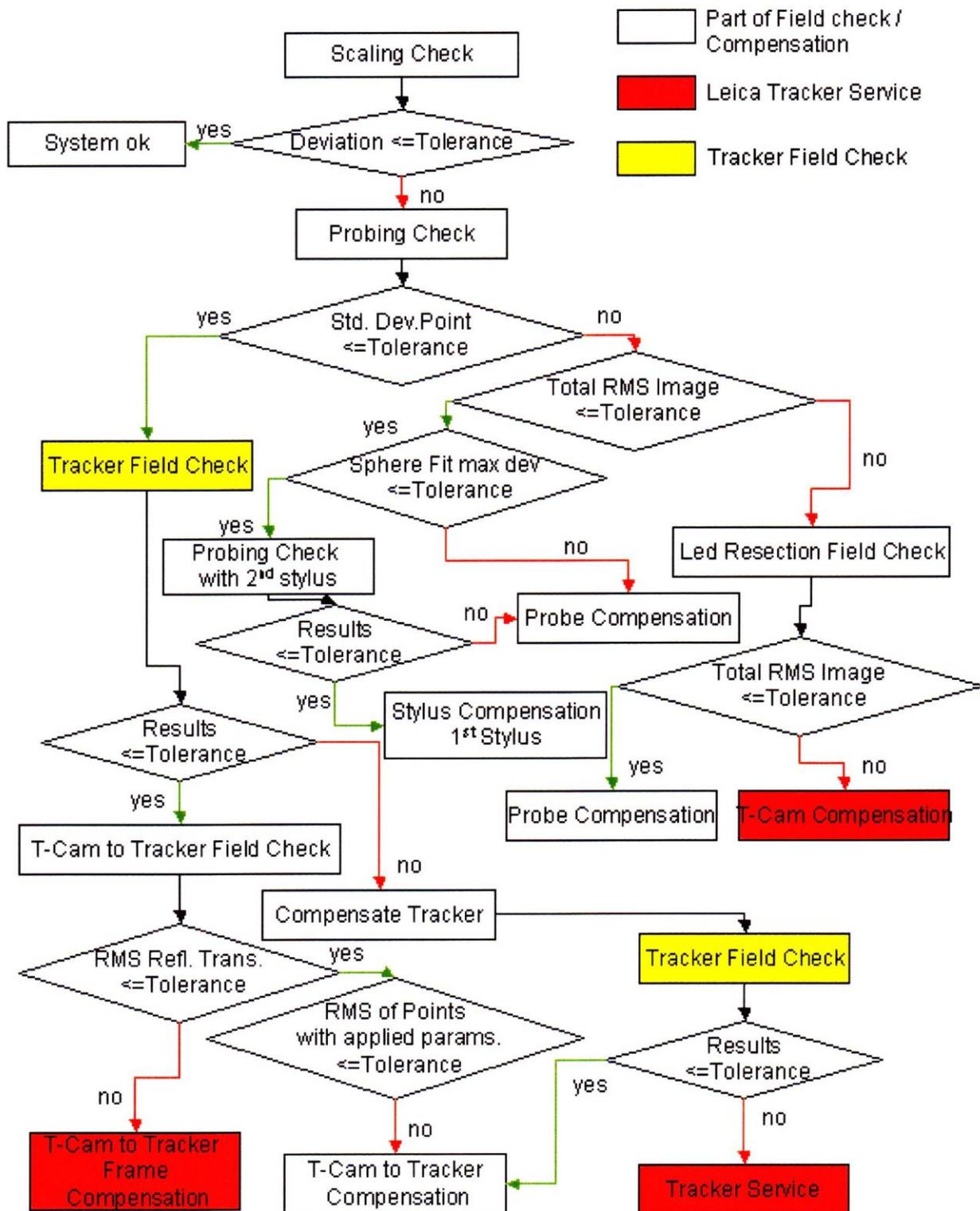
Abb. 2.1: Wesentliche Bestandteile eines Gleiskörpers nach [Lichtberger 2003]	6
Abb. 2.2: Definition der Gleisparameter	7
Abb. 2.3: Schienenprofil einer Vignolschiene nach [Lichtberger 2003].....	10
Abb. 2.4: Maximal zulässige, seitliche Schienenabnutzung (Längenangaben in mm) [Lichtberger 2003]	11
Abb. 2.5: Beispiel einer Gleisvermarkung – Bolzenmontage mit Prisma (SBB, Längenangaben in mm), nach [Maron u. Beda 2004]	13
Abb. 2.6: Ablaufschema einer Gleisvermessung hinsichtlich der Erstellung und Kontrolle der Gleislage	14
Abb. 2.7: Grundprinzip der relativen Gleisvermessung	15
Abb. 2.8: Grundprinzip der absoluten Gleisvermessung am Beispiel des Langsehnenverfahrens	16
Abb. 2.9: Prüfung auf Toleranzüberschreitung [Heunecke 2014].....	20
Abb. 2.10: Einsatzmöglichkeiten eines MMS bei der Gleisvermessung.....	22
Abb. 2.11: Sensoren des Lichtraumprofil-Messtriebwagens LiMez III, [Wirth 2008]	23
Abb. 2.12: Bestimmung der Gleisparameter über eine Langsehne (iGW, intermetric) [intermetric 2015]	24
Abb. 2.13: Bestimmung der Gleisparameter mittels IMU (Amberg IMS 1000), [Amberg 2015]	24
Abb. 3.1: Gleisvermessungssystem RACER	31
Abb. 3.2: Gleisvermessungssystem RACER II	32
Abb. 3.3: Messwagen (Draufsicht)	36
Abb. 3.4: Messwagen (Seitenansicht)	36
Abb. 3.5: iGPS mit vier Transmittern, [Nikon 2011].....	38
Abb. 3.6: „inverses iGPS“ mit vier IDUs, [Nikon 2011]	38
Abb. 3.7: Lasertriangulationssensor MEL M2-ILAN 120/60 innerhalb der MSP des RACER II.....	39
Abb. 3.8: Inklinometer der Firma MEAS, Typ NS-15/DMG2-U [MEAS 2010].....	40
Abb. 3.9: Einfluss der Meteorologiesensorik auf die Sensormodule des RACER II	40
Abb. 4.1: Prinzipskizze eines Kalibrierprozesses [Hesse 2008]	44
Abb. 4.2: Messaufbau zur Untersuchung des Auftreffwinkels (Seitenansicht).....	51
Abb. 4.3: alternativer Messaufbau zur Untersuchung des Auftreffwinkels (Seitenansicht).....	51
Abb. 4.4: Messaufbau zur kombinierten Überprüfung des Lasertriangulationssensors	52
Abb. 4.5: Abweichungen der X- und Y-Achse des Inklinometers zum Nullpunkt bei 20 °C, rot = aufsteigende Temperaturen, blau = absteigende Temperaturen, grün = Polynom dritten Grades	54
Abb. 4.6: Abweichungen der Temperaturdifferenz gegenüber dem Referenzthermometer, rot = aufsteigende Temperaturen, blau = absteigende Temperaturen, grün = Regressionsgerade	55
Abb. 4.7: Messergebnisse zur Bestimmung des Luftdruck-Offsets, blau = DRMOD-I ² C (RACER II), rot = Digiquartz 760 (Referenz).....	55
Abb. 5.1: Koordinatensystem eines Lasertriangulationssensors, nach [MEL 2010]	57
Abb. 5.2: Koordinatensysteme bei der Kalibrierung eines MSS.....	60
Abb. 5.3: Herleitung der Korrelationen im stochastischen Modell aus physikalischen Eingangsgrößen	67
Abb. 6.1: Funktionen der Sensoren innerhalb des MWS	70
Abb. 6.2: Horizontierung des MWS.....	71
Abb. 6.3: Ermittlung des Rotationswinkels κ' mit Hilfe des Laserlots.....	73
Abb. 6.4: Ermittlung der mittleren Laserlotachse in Relation zum MWS	73

Abb. 6.5: Modifiziertes Corner-Cube-Prisma auf Kreuzschlitten	74
Abb. 6.6: Kalibriervorrichtung des RACER II auf stabilem Metalltisch	75
Abb. 6.7: Referenzkörper mit jeweils fünf Referenzebenen in zwei unterschiedlichen Varianten	76
Abb. 6.8: Schematischer Messaufbau einer Kalibrierung von Lasertriangulationssensoren.....	77
Abb. 6.9: Notwendige Modifikationen für die Kalibrierung von Lasertriangulationssensoren	78
Abb. 6.10: Ersatzgewichte für das Tachymeter und CCR-Adapterscheibe mit aufgesetztem CCR	79
Abb. 6.11: Messbereich der Referenzebenen in Messposition 1 (rot) und Messposition 2 (grün).....	79
Abb. 6.12: Ablaufschema zur Messdatenaufbereitung.....	81
Abb. 6.13: Definition des Messwagensystems (MWS).....	82
Abb. 6.14: Flächenselektion über Radialabfrage (rot) oder Polygonabfrage (grün)	84
Abb. 6.15: Profildatensatz im originären PLS	85
Abb. 6.16: rotierter Profildatensatz	85
Abb. 6.17: Grafische Darstellung der Schlussproben	89
Abb. 6.18: Messsituation im Lötschberg-Basistunnel.....	92
Abb. 6.19: Messaufbau mit Messpunkten und Streckenkombinationen	94
Abb. 6.20: Lineare Regression zur Bestimmung des Längenausdehnungskoeffizienten.....	96
Abb. 6.21: Entwürfe zur Montage einer Referenzgeometrie (In-situ-Prüfung RACER II).....	98
Abb. 7.1: Schematische Darstellung eines Profilschans	103
Abb. 7.2: (a) Messdaten des Lasertriangulationssensors, (b) 3D-Modell [Baltzakis u.a. 2003]	105
Abb. 7.3: Beispiel eines komplexen Verbunds einzelner geometrischer Grundelemente	106
Abb. 8.1: Schematische Darstellung eines Messzyklus des RACER II	109
Abb. 8.2: Scanbereich des Lasertriangulationsensors	111
Abb. 8.3: Definition der Objektpunkte (PSOK und PSW).....	111
Abb. 8.4: Relative Lage der POI (PSOK = rot, PSW = grün) zum MWS (blau)	112
Abb. 8.5: Einfluss der Sensoranordnung auf die Berechnung der Spurweite	113
Abb. 8.6: Einfluss der Verdrehung des Gleismesswagens auf die Berechnung der Spurweite.....	113
Abb. 8.7: Messdaten der Lasertriangulationssensoren in ihren originären Koordinatensystemen (PLS)	114
Abb. 8.8: Filterungstechniken zur Trennung der interessierenden Messdaten (rot) vom Rest (blau)	114
Abb. 8.9: Approximationsverfahren zur Erhöhung der Punktdichte der Schienenoberfläche	115
Abb. 8.10: Unterteilung der Schienenoberfläche in feste Intervalle	116
Abb. 8.11: Modellierung über Teilpolynome ohne Einführung von Restriktionen.....	117
Abb. 8.12: Abweichung des Näherungsverfahrens gegenüber der direkten Methode	121
Abb. 8.13: Bildung der Punktpaare mittels ICP-Algorithmus (blau: Profilpunkte $L\tau$, grün: Soll-Profilpunkte $LRef$, rot: kürzester Abstand zwischen den betreffenden Punkten)	122
Abb. 8.14: Umsetzung des ICP-Algorithmus beim RACER II (Farbgebung wie in Abbildung 8.13).....	123
Abb. 8.15: Beispiele zur Analyse der Schienenabnutzung.....	125
Abb. 8.16: Vorgehensweise bei der Bestimmung der POI.....	127
Abb. 8.17: Bedeutung der Geraden g_1 für die Ermittlung der POI.....	128
Abb. 8.18: POI-Ergebnisse der MatLab-Auswertung für die Lasertriangulationssensoren 2 und 3	129
Abb. 8.19: POI-Ergebnisse der MatLab-Auswertung für die Lasertriangulationssensoren 1 und 4	129
Abb. 8.20: Vorgehensweise zur Berechnung der Zielgrößen.....	131
Abb. 8.21: Reiter „QM“ innerhalb der grafischen Benutzeroberfläche des RACER II	136

Abb. 9.1: Laborsystem mit Versuchsgleis und RACER II.....	139
Abb. 9.2: Unterschiedliche Schientypen der einzelnen Teststrecken	140
Abb. 9.3: GVP-Verteilung auf der Teststrecke Krailing (Google Maps).....	141
Abb. 9.4: Wandbolzen eines GVP und dessen Signalisierung durch ein Präzisionsprisma in der Versuchsstrecke Lötschberg-Basistunnel.....	143
Abb. 9.5: Ablaufschema einer Validierungsmessung	144
Abb. 9.6: Validierungsmessung auf der Versuchsstrecke des Lötschberg-Basistunnels	145
Abb. 9.7: Vergleich beider Gleisvermessungssysteme (Zielgrößen Lage und Höhe).....	147
Abb. 9.8: Vergleich beider Gleisvermessungssysteme (Zielgrößen Überhöhung und Spurweite)	147

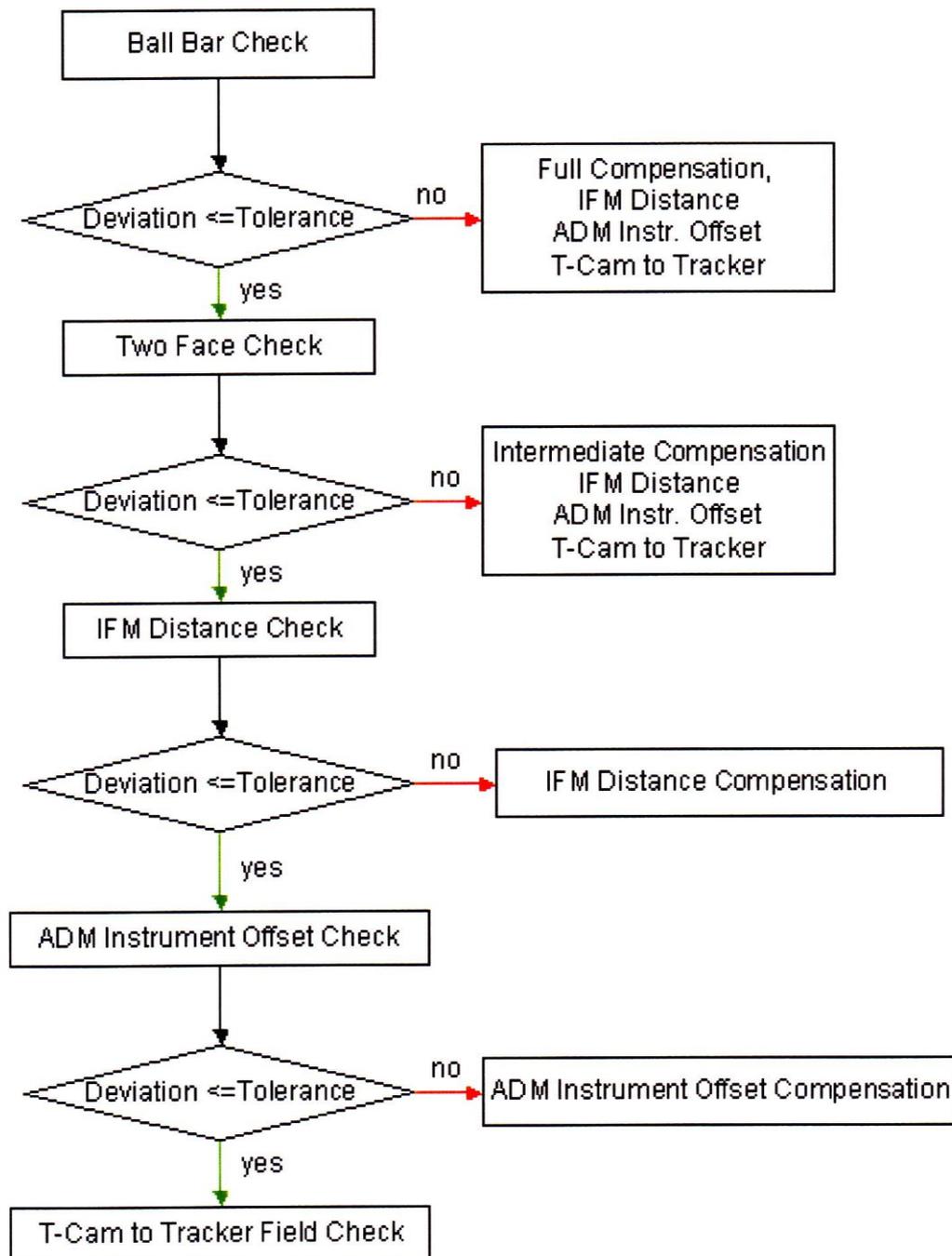
Anlagen

4.1: 6-DoF Field Check



Überprüfung und Kalibrierung eines Lasertrackers von Leica Geosystems / Hexagon Metrology; Prüf- und Kalibrierkonzept für den AT-901-LR mit T-Cam und T-Probe / T-Scan [Hexagon Metrology 2007].

4.2: Tracker Field Check



Überprüfung und Kalibrierung eines Lasertrackers von Leica Geosystems / Hexagon Metrology; Prüf- und Kalibrierkonzept für den AT-901-LR [Hexagon Metrology 2007]. Der „Tracker Field Check“ ist gleichzeitig Bestandteil des „6-DoF Field Checks“ (Anlage 4.1).

6.1: Kalibrierung der Lasertriangulationssensoren, A-Matrix

Partielle Ableitungen der funktionalen Zusammenhänge nach den Parametern (Kapitel 6.2.4):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial X_0} & \frac{\partial f_1(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_1(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Z_0} & \frac{\partial f_1(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Omega} & \frac{\partial f_1(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Phi} & \frac{\partial f_1(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial X_0} & \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Z_0} & \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Omega} & \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Phi} & \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{o_n}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial X_0} & \frac{\partial f_{o_n}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Y_0} & \frac{\partial f_{o_n}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Z_0} & \frac{\partial f_{o_n}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Omega} & \frac{\partial f_{o_n}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Phi} & \frac{\partial f_{o_n}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial K} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial X_0} = a_1$$

$$\frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Y_0} = a_2$$

$$\frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial Z_0} = a_3$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Omega} &= a_2 X_L (\cos(\Omega) \sin(\Phi) \cos(K) + \sin(\Omega) \sin(K)) \\ &+ a_2 Y_L (\cos(\Omega) \sin(\Phi) \sin(K) - \sin(\Omega) \cos(K)) \\ &+ a_2 Z_L \cos(\Omega) \cos(\Phi) \\ &+ a_3 X_L (-\sin(\Omega) \sin(\Phi) \cos(K) + \cos(\Omega) \sin(K)) \\ &+ a_3 Y_L (-\sin(\Omega) \sin(\Phi) \sin(K) - \cos(\Omega) \cos(K)) \\ &- a_3 Z_L \sin(\Omega) \cos(\Phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial \Phi} &= a_1 (-X_L \sin(\Phi) \cos(K) - Y_L \sin(\Phi) \sin(K) - Z_L \cos(\Phi)) \\ &+ a_2 (X_L \sin(\Phi) \cos(\Phi) \cos(K) + Y_L \sin(\Phi) \cos(\Phi) \sin(K) - Z_L \sin(\Phi) \sin(\Phi)) \\ &+ a_3 (X_L \cos(\Phi) \cos(\Phi) \cos(K) + Y_L \cos(\Phi) \cos(\Phi) \sin(K) - Z_L \cos(\Phi) \sin(\Phi)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{k_j}(\mathbf{L}, \mathbf{X})}{\partial K} &= -a_1 X_L \cos(\Phi) \sin(K) + Y_L \cos(\Phi) \cos(K) \\ &- a_2 X_L (\sin(\Omega) \sin(\Phi) \sin(K) + \cos(\Omega) \cos(K)) \\ &+ a_2 Y_L (\sin(\Omega) \sin(\Phi) \cos(K) - \cos(\Omega) \sin(K)) \\ &- a_3 X_L (\cos(\Omega) \sin(\Phi) \sin(K) - \sin(\Omega) \cos(K)) \\ &+ a_3 Y_L (\cos(\Omega) \sin(\Phi) \cos(K) + \sin(\Omega) \sin(K)) \end{aligned}$$

8.1: Beispiel einer Stellgrößendatei

Stand: 30.04.2013

[MESSUNGEN]

Abbildungssystem / Landessystem (integer) [/];

0 = lokales System

1 = LV03 (Schweiz), Beispielformat <Y/R, X/H, Z> = <713418.144, 137967.623, 323.078>

2 = LV95 (Schweiz), Beispielformat <Y/E, X/N, Z> = <2713418.144, 1137967.623, 323.078>

3 = Gauß-Krüger (Deutschland), Beispielformat <Y/R, X/H, Z> = <3554643.584, 5808517.070, 112.451>

4 = ETRS89/UTM (Deutschland), Beispielformat <Y/E, X/N, Z> = <32554549.526, 5806633.017, 112.451>

ABBS:1

Prismen-Typ (integer) [/];

0 = Leica Rundprisma GRP / GPH1P, 7 = 360° Mini GRZ101, 9 = UserDef CCR 1.5"

TMPT:0

ATR-Wiederholungsversuche (integer) [/]

ATRW:2

Mindestabstand zum Gleisversicherungspunkt für ATR (double) [m]

MAATR:10

Anzahl der Laserprofile des Profils scanners (integer) [/]

ANLP:10

Anzahl der Neigungsmessungen des Inklinometers (integer) [/]

ANNM:3

Anzahl der Messungen der Wettersensorik (integer) [/];

Temperatursensor (Luft), Temperatursensor (Material), Luftdrucksensor

ANTM:3

[SCHIENENTYP]

Sollspurweite, Toleranz (double double) [mm mm]

SSWR:1435.0 0.5

Sollabstand des Spurweiten-Innenpunkts zur Schienenoberkante (double) [mm]

APSW:14.0

SollwertBeta als Parameter für die POI-Berechnung (double) [rad];

S60 = 1.520838, Labor = 1.574057, Krailling = 1.58

SGBT:1.520838

SollwertAbstandPSOK als Parameter für die POI-Berechnung (double) [mm];

S60 = 35.241, Labor = 26.447, Krailling = 35.0

SGAP:35.241

[BERECHNUNGEN]

Online-Korrektur der Neigungen aus Transformationsdaten (integer double double) [/ mm/1,5m °/oo];

{0,1}-Trigger (nein/ja), Toleranz für Querneigung, Toleranz für Längsneigung

OKIK:0 0.5 0.5

Toleranzbereich für den Neigungsvergleich aus jeweils zwei Profilen (double double) [mm/1,5m °/oo];

Toleranz für Querneigung, Toleranz für Längsneigung

TBIK:0.5 0.5

Abstandskorrektur der Profilsensoren in Stationierungsrichtung (integer double) [/ m];

{0,1}-Trigger (nein/ja), Abstand der Profilsensoren in Stationierungsrichtung

PSAS:0 0.6

Auswertemethode (integer) [/];

1 = Nutzung von einem gemittelten Querschnitt

2 = Nutzung zweier Querschnitte

PSAM:1

Parameter der Vorfilterung für die POI-Berechnung (double integer) [mm /];

Schwellwert für Höhe und Intensität (Vorfilterung der Profilpunktswolke),

S60 = [60 80], Labor = [45 80], Krailling = [50 80]

PEVF:60 80

Polynom-Fitting-Parameter für die POI-Berechnung (integer double) [/ mm];

Anzahl der Teilpolynome, Rasterauflösung des ausgeglichenen Polynoms

PEPF:30 0.1

Polynom-Fitting-Toleranzbereich für die POI-Berechnung (double) [mm];

maximal zulässiger, orthog. Abstand eines Messpunkts zum ausgegl. Polynom

PEFT:0.3

Filterraum-Parameter für die POI-Berechnung (double double) [mm mm];

Unterer + oberer Schwellwert des Filterraums für Hilfsgerade g1,

S60 = [836 855], Labor = [855 862], Krailling = [850 860]

PEFR:836 855

Parameter der Helmert-Transformation (double double double) [mm mm mm];

Standardabweichungen der Gewichtseinheit: sGVP, sMWS, Abbruchkriterium

STRG:1.000000 1.000000 0.000001

Schwellwert für die Restklaffen im Postprocessing (double) [mm];

Verwerfung der Transformation im Falle einer Überschreitung

PPRK:2

8.2: Beispiel einer Kalibrierparameterdatei

Stand: 07.07.2014

[GMW]

Ausdehnungskoeffizient des GMW-Rahmens (double double) [1/°C °C];
 Ausdehnungskoeffizient (ppm), Materialtemperatur zum Kalibrierzeitpunkt
 GMWR:21.7 22.3

Koordinaten der Passbohrungen (integer double double double) [/ mm mm mm];
 Definieren das lokale Koordinatensystem des GMW

GMWBP1:	11	2326.0533	1000.0000	1000.0000
GMWBP2:	12	1000.0000	1000.0000	1000.0000
GMWBP3:	13	1000.2494	1750.3102	1000.0000
GMWBP4:	14	2326.1462	1750.2237	998.4828
GMWDF:	91	1663.2944	1375.2424	1072.1141

[TACHYMETER]

Kippachshöhe (double double) [m m];
 Optische Achse zu Aufsatzfläche im Dreifuß und weiter zu OK-Schiene
 TKAH:0.1957 0.1995

Restschiefe des Tachymeterdreifußes (double double) [°/oo mm/1,5m];
 Längsabweichung L, Querabweichung Q
 TRSD:0.0015 -0.0002

Additionskonstante der Offset-Winkel für die Nullrichtung im GMW-System (double double) [rad rad];
 Horizontale Nullrichtung H, vertikale Nullrichtung V
 LLNR:-0.00398228 0.00089368

[PROFILSCANNER]

Parameter der Profilscanner (double double double double double double) [mm mm mm rad rad rad];

3 Translationen, drei Rotationswinkel => Transformationsparameter für das Messwagensystem

PVPS1:	2408.4399	1075.1712	912.2832	0.00500862	-2.36168324	-0.00300405
PVPS2:	974.2633	1074.8060	855.8894	-0.00065616	2.33511141	-0.00594190
PVPS3:	918.0276	1675.3312	913.1577	3.14074509	0.78764790	0.00070855
PVPS4:	2351.9950	1675.2890	854.4114	3.14977864	-0.80039216	-0.01461296

Standardabweichungen der einzelnen Widerspruchsvektoren (double double double double) [mm mm mm mm];

Scanner 1, Scanner 2, Scanner 3, Scanner 4
 SAWS: 0.065 0.050 0.054 0.057

[NEIGUNGSMESSER]

Additionskonstante / Offset (double double) [deg deg];
 X-Achse = Querabweichung Q, Y-Achse = Längsabweichung L
 KFNO:0.233 0.015

Temperatur-Kalibrierfunktion (double double double double) [deg/°C deg/°C deg/°C deg/°C]; X-Achse; Y-Achse; Formel: Neigkorrr = Neigmes + (a0 + a1*tempL + a2*tempL^2 + a3*tempL^3)

KFNTX:	0.004	0.000000219	-0.0000153	0.000000219
KFNTY:	0.003	-0.000396	0.0000287	-0.000000822

[TEMPERATURSENSOREN]

Kalibrierfunktion für Luftsensor und Materialsensor (double double) [/ /];
Formel: Tempkorr = Tempmes + (a0 + a1*Tempmes)
KFTL: -0.15 0.0303
KFTM: -0.15 0.0301

[LUFTDRUCKSENSOR]

Kalibrierfunktion Luftdrucksensor (double) [hPa]
KFLD:-23.5

8.3: BF-Algorithmus, A-Matrix

Partielle Ableitungen der funktionalen Zusammenhänge nach den Parametern (Kapitel 8.2.3):

1 DoF-BF:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{d,l}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_{d,v}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} = 2X_0 + 2X_{\text{Ref},r} - 2X_{\tau,r}$$

3 DoF-BF:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{d,l}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} & \frac{\partial f_{d,l}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial Z_0} & \frac{\partial f_{d,l}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial \varphi} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} & \frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial Z_0} & \frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial \varphi} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{d,v}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} & \frac{\partial f_{d,v}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial Z_0} & \frac{\partial f_{d,v}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial \varphi} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial X_0} = 2X_0 + 2X_{\text{Ref},r} \cos(\varphi) - 2Z_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) - 2X_{\tau,r}$$

$$\frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial Z_0} = 2Z_0 + 2X_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) + 2Z_{\text{Ref},r} \cos(\varphi) - 2Z_{\tau,r}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{d,r}(\mathbf{X}, \mathbf{L}_\tau, \mathbf{L}_{\text{Ref}})}{\partial \varphi} &= -2X_0 X_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) - 2X_0 Z_{\text{Ref},r} \cos(\varphi) - 4X_{\text{Ref},r}^2 \sin(\varphi) \cos(\varphi) \\ &\quad + 4Z_{\text{Ref},r}^2 \sin(\varphi) \cos(\varphi) + 2X_{\text{Ref},r} X_{\tau,r} \sin(\varphi) + 2Z_{\text{Ref},r} Z_{\tau,r} \cos(\varphi) \\ &\quad + 2Z_0 X_{\text{Ref},r} \cos(\varphi) - 2Z_0 Z_{\text{Ref},r} \sin(\varphi) - 2X_{\text{Ref},r} Z_{\tau,r} \cos(\varphi) \\ &\quad + 2Z_{\text{Ref},r} Z_{\tau,r} \sin(\varphi) \end{aligned}$$

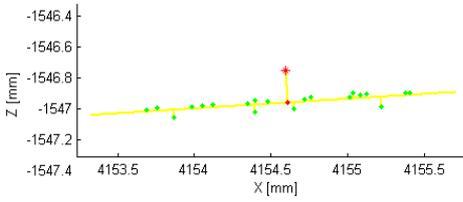
9.1: Unsicherheiten des RACER II, Untersuchung GeoLab

Unsicherheiten des RACER II bei der Untersuchung im Geodätischen Labor der UniBwM am 01.12.2011

(1) Genauigkeit und Präzision der Zielgrößen

Stationierung	Genauigkeit s_G (1σ)	Präzision s_P (1σ)
X-Achse (Querrichtung)	0,20 mm	0,14 mm
Y-Achse (Fahrtrichtung)	0,16 mm	0,13 mm
Z-Achse (Höhe)	0,10 mm	0,07 mm
Spurweite	0,18 mm	0,07 mm
Längsneigung	0,23 ‰	0,02 ‰
Querneigung	0,08 mm/1,5m	0,07 mm/1,5m

(2) Messunsicherheiten der Referenzmessung

Leica AT 901	Erweiterte Messunsicherheit ($k = 2, 2\sigma$)	
Stationierung	$U_{xyz} = \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}^{(1)}$ $= \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m} \cdot 4,81 \text{ m}^{(2)}$ $= \pm 0,04 \text{ mm}$	
T-Scan Punktwolke	$U_{xyz} = \pm 80 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}^{(1)}$ $= \pm 80 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m} \cdot 4,0 \text{ m}^{(3)}$ $= \pm 0,09 \text{ mm}$	
Ebenenmodellierung	$U_{xyz} = \pm 0,04 \text{ mm}^{(4)}$	
<p>Der Referenzpunkt (Grafik, roter Punkt) zum RACER-2-POI (Point of Interest, Grafik, roter Stern) wird als Projektionspunkt auf eine Regressions ebene (Grafik, gelb) der umliegenden T-Scan-Punkte (Grafik, grün) berechnet.</p>		
Zentrierunsicherheit	$U_{xyz} = \pm 0,10 \text{ mm}^{(5)}$	
Zusammenfassung	$U_{\text{Ges.}} = \pm \sqrt{(0,02 \text{ mm})^2 + (0,045 \text{ mm})^2 + (0,02 \text{ mm})^2 + (0,05 \text{ mm})^2}$ $= \pm 0,07 \text{ mm}$	
<p>Die Messunsicherheit $U_{\text{Ges.}} = \pm 0,07 \text{ mm}$ muss bei der Betrachtung der Unsicherheiten der Zielgrößen entsprechend berücksichtigt werden. Die Messunsicherheit der Zielgröße „Stationierung“ ist insbesondere vom verwendeten Tachymeter und dessen Kalibrierung abhängig. Im konkreten Fall wurde das verwendete Tachymeter (Leica 1201) im Vorfeld gründlich kalibriert. Zudem wurden für Tachymeter- und Lasertracker-messungen CCR verwendet, so dass die verbleibende Zentrierunsicherheit möglichst gering ist.</p>		

(1) Herstellerangaben (PCMM Systemspezifikationen, Leica Absolute Tracker und Leica T-Produkte)

(2) Mittelwert aller Entfernungen des Lasertrackers zu den Gleisvermarkungspunkten (Wertebereich: 10,72m – 11,42m)

(3) Mittelwert aller Entfernungen des Lasertrackers zur T-Scan-Messung (Wertebereich: 3,7m – 6,2m)

(4) Mittelwert aller Abstände der T-Scan-Punkte zu den jeweiligen Regressions Ebenen (empirische Durchschnittswerte)

(5) Variierender Prismenmittelpunkt bei Rotation / Auslenkung des Prismas bei guter Ausrichtung (empirischer Schätzwert)

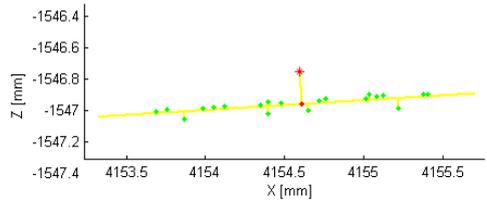
9.2: Unsicherheiten des RACER II, Untersuchungen Lötschberg-Basistunnel

Unsicherheiten des RACER II bei der Untersuchung im Versuchstollen des Lötschberg-Basistunnels am 11.12.2011

(1) Genauigkeit und Präzision der Zielgrößen

Stationierung	Genauigkeit s_G (1σ)	Präzision s_P (1σ)
X-Achse (Querrichtung)	0,09 mm	0,08 mm
Y-Achse (Fahrtrichtung)	0,13 mm	0,13 mm
Z-Achse (Höhe)	0,09 mm	0,09 mm
Spurweite	0,23 mm	0,03 mm
Längsneigung	0,13 ‰	0,02 ‰
Querneigung	0,15 mm/1,5m	0,06 mm/1,5m

(2) Messunsicherheiten der Referenzmessung

Leica AT 901	Erweiterte Messunsicherheit ($k = 2, 2\sigma$)
Stationierung	$U_{xyz} = \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}^{(1)}$ $= \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m} \cdot 11,07 \text{ m}^{(2)}$ $= \pm 0,08 \text{ mm}$
T-Scan Punktwolke	$U_{xyz} = \pm 80 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}^{(1)}$ $= \pm 80 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m} \cdot 5,0 \text{ m}^{(3)}$ $= \pm 0,10 \text{ mm}$
Ebenenmodellierung Der Referenzpunkt (Grafik, roter Punkt) zum RACER-2-POI (Point of Interest, Grafik, roter Stern) wird als Projektionspunkt auf eine Regressions ebene (Grafik, gelb) der umliegenden T-Scan-Punkte (Grafik, grün) berechnet.	$U_{xyz} = \pm 0,04 \text{ mm}^{(4)}$ 
Zentrierunsicherheit	$U_{xyz} = \pm 0,10 \text{ mm}^{(5)}$
Zusammenfassung	$U_{Ges.} = \pm \sqrt{(0,04 \text{ mm})^2 + (0,05 \text{ mm})^2 + (0,02 \text{ mm})^2 + (0,05 \text{ mm})^2}$ $= \pm 0,08 \text{ mm}$ <p>Die Messunsicherheit $U_{Ges.} = \pm 0,08 \text{ mm}$ muss bei der Betrachtung der Unsicherheiten der Zielgrößen entsprechend berücksichtigt werden. Die Messunsicherheit der Zielgröße „Stationierung“ ist insbesondere vom verwendeten Tachymeter und dessen Kalibrierung abhängig. Im konkreten Fall wurde das verwendete Tachymeter (Leica TS30) unmittelbar im Teststollen auf ca. 25 m Entfernung kalibriert. Zudem wurden für Tachymeter- und Lasertrackermessungen CCR verwendet, so dass die verbleibende Zentrierunsicherheit möglichst gering ist.</p>

(1) Herstellerangaben (PCMM Systemspezifikationen, Leica Absolute Tracker und Leica T-Produkte)

(2) Mittelwert aller Entfernungen des Lasertrackers zu den Gleisvermarkungspunkten (Wertebereich: 10,72m – 11,42m)

(3) Mittelwert aller Entfernungen des Lasertrackers zur T-Scan-Messung (Wertebereich: 3,7m – 6,2m)

(4) Mittelwert aller Abstände der T-Scan-Punkte zu den jeweiligen Regressionebenen (empirische Durchschnittswerte)

(5) Variierender Prismenmittelpunkt bei Rotation / Auslenkung des Prismas bei guter Ausrichtung (empirischer Schätzwert)

Lebenslauf

Name Thorsten Strübing
 Geburtsdatum 10.02.1979
 Geburtsort Soest, Nordrhein-Westfalen

Schulbildung

1985 – 1989 Grundschule Welper
 1989 – 1998 Conrad-von-Soest Gymnasium
 Abschluss: allgemeine Hochschulreife

Grundwehrdienst

07/1998 – 05/1999 Transportbataillon 801, Lippstadt
 05/1999 – 07/1999 Anschlusswehrübung (TrspBtl 493, Lippstadt)

Beruflicher Werdegang

08/1999 – 01/2002 Ausbildung beim Amt für Agrarordnung Soest
 Abschluss: Vermessungstechniker
 01/2002 – 10/2002 Angestellter beim Amt für Agrarordnung Soest
 10/2002 – 10/2007 Studium der Geodäsie und Geoinformatik
 an der Leibniz Universität Hannover
 Abschluss: Diplom-Ingenieur (univ.)
 02/2008 – 03/2010 Vermessungsreferendariat beim Innenministerium
 des Landes Nordrhein-Westfalen, Arnsberg
 Abschluss: Vermessungsassessor
 08/2010 – 04/2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Labor,
 Universität der Bundeswehr München
 04/2012 – 05/2013 Bereichsleiter Ingenieurgeodäsie beim Ingenieurbüro
 Dr. Hesse und Partner Ingenieure, Hamburg
 seit 09/2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geodäsie,
 Universität der Bundeswehr München

Danksagung

Abschließend möchte ich allen Personen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit in vielfältiger Weise unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke für die Übernahme des Referats und seine Unterstützung in allen Bereichen des Promotionsvorhabens. Prof. Heunecke hat insbesondere durch seine uneingeschränkte Hilfe bei allen Fragen und Unsicherheiten mit konstruktiven Vorschlägen und Anregungen entscheidend zur Motivation und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann danke ich für die Übernahme des Korreferats und ganz besonders für die vielen, detaillierten Anregungen und seine breite, fachliche Betrachtungsweise, welche die Arbeit um weitere, bedeutsame Aspekte bereichert hat. Für seine tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung des Gleisvermessungssystems möchte ich mich an dieser Stelle ganz besonders bedanken.

Ferner gilt mein Dank den Kolleginnen und Kollegen des Geodätischen Instituts und des Geodätischen Labors der Universität der Bundeswehr München, die mich in vielfältiger Weise während des gesamten Prozesses unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Wolfgang Liebl für die enge, zielführende und äußerst angenehme Zusammenarbeit bei der Entwicklung des Gleisvermessungssystems sowie der Durchführung der Messkampagnen. Den Kollegen Peter Pongratz und Dipl.-Ing. Gerhard Kestel möchte ich in gleicher Weise danken für ihre unentbehrliche Unterstützung.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hansbert Heister für seine generelle Unterstützung durch Anregungen und Ideen sowie Dipl.-Ing. Christian Wagner, der die Entwicklung des Gleisvermessungssystems durch seine studienbegleitenden Arbeiten unterstützt hat.

Mein spezieller Dank gilt der Ristag Ingenieure AG und seinen Mitarbeitern und Kooperationspartnern. Ich danke insbesondere Herrn Hans-Ueli Riesen für die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ferner danke ich Herrn Michael Reifenhäuser für seine Unterstützung bei der Recherche der Vorschriften der Deutschen Bahn AG.

Mein abschließender, persönlicher Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Bruder für die unentwegte moralische Unterstützung und den andauernden Rückhalt. Ihr Verständnis und die familiäre Kommunikation haben maßgeblich zur Vollendung dieser Arbeit beigetragen.

Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München

Bisher erschienene Hefte:

Heft 1/1978 (*vergriffen*)

Schödlbauer, Albert (Bearb.): Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München. 53 S.

Heft 2/1978

Chrzanowski, Adam / Dorrer, Egon (Hrsg.): Proceedings „Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems“. Workshop held in Munich, Federal Republic of Germany, 1-2 June, 1977. Assisted by *J. McLaughlin*. VII, 181 S.

Heft 3/1978

Caspary, Wilhelm / Geiger, Axel: Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser. 62 S.

Heft 4/1979

Baumann, Eberhard / Caspary, Wilhelm / Dupraz, Hubert / Niemeier, Wolfgang / Pelzer, Hans / Kuntz, Eugen / Schmitt, Günter / Welsch, Walter: Seminar über Deformationsanalysen, gehalten an der Hochschule der Bundeswehr München. 106 S.

Heft 5/1981

Torlegård, Kennert: Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry. 68 S.

Heft 6/1982

Caspary, Wilhelm / Welsch, Walter (Hrsg.): Beiträge zur großräumigen Neutrassierung. 271 S.

Heft 7/1982

Borre, Kai / Welsch, Walter M. (Hrsg.): International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Survey Control Networks“. Meeting of Study Group 5B, 7th-9th July, 1982, Aalborg University Centre, Denmark. 431 S.

Heft 8/1982

Geiger, Axel: Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente. Dissertation. 125 S.

Heft 9/1983

Welsch, Walter (Hrsg.): Deformationsanalysen '83. Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodätischer Netze. Beiträge zum Geodätischen Seminar 22. April 1983. 339 S.

Heft 10/1984

Caspary, Wilhelm / Schödlbauer, Albert / Welsch,

Walter (Hrsg.): 10 Jahre Hochschule der Bundeswehr München. Beiträge aus dem Institut für Geodäsie. 244 S.

Heft 11/1984 (*vergriffen*)

Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert (Hrsg.): Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 23. September 1983. 270 S.

Heft 12/1984

Schwintzer, Peter: Analyse geodätisch gemessener Punktlageänderungen mit gemischten Modellen. Dissertation. 159 S.

Heft 13/1984

Oberholzer, Gustav: Landespflege in der Flurbereinigung. 81 S.

Heft 14/1984

Neukum, Gerhard: Fernerkundung der Planeten und kartographische Ergebnisse. Mit Beiträgen von *G. Neugebauer*. Herausgegeben von *G. Neugebauer*. 102 S.

Heft 15/1984

Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.): Satelliten-Doppler-Messungen. Beiträge zum Geodätischen Seminar 24./25. September 1984. 396 S.

Heft 16/1985 (*vergriffen*)

Szacherska, Maria Krystyna / Welsch, Walter M.: Geodetic Education in Europe. 234 S.

Heft 17/1986

Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W.: A Contribution to 3d-Operational Geodesy. Part 4: The Observation Equations of Satellite Geodesy in the Model of Integrated Geodesy. 190 S.

Heft 18/1985

Oberholzer, Gustav: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil II. 116 S.

Heft 19/1986 (*vergriffen*)

Landau, Herbert / Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W.: GPS Research 1985 at the Institute of Astronomical and Physical Geodesy. 210 S.

Heft 20/1985

Heft 20-1

Welsch, Walter / Lapine, Lewis A. (Hrsg.): International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Inertial, Doppler and GPS Measurements for

National and Engineering Surveys“. Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Band 1. 310 S.

Heft 20-2

Welsch, Walter / Lapine, Lewis A. (Hrsg.): International Federation of Surveyors – FIG. Proceedings „Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys“. Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C, July 1-3, 1985. Band 2. S. 311 - 634.

Heft 21/1986

Oberholzer, Gustav: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil III. 100 S.

Heft 22/1987

Caspary, Wilhelm / Hein, Günter W. / Schödlbauer, Albert (Hrsg.): Beiträge zur Inertialgeodäsie. Geodätisches Seminar 25./26. September 1986. 386 S.

Heft 23/1987

Dorrer, Egon / Peipe, Jürgen (Hrsg.): Motografie. Symposium 11./12. März 1986. 285 S.

Heft 24/1987

Neugebauer, Gustav (Hrsg.): Brenta-Monographie – Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hochgebirgskartographie. Mit Beiträgen von *D. Beineke, H. C. Berann, W. de Concini, G. Hell, D. Herm, H. Immel, U. Kleim, G. Neugebauer und K. Ringle.* 187 S.

Heft 25/1987

Perehmuter, Avraam: Beiträge zur Ausgleichung geodätischer Netze. 75 S.

Heft 26/1987

Ellmer, Wilfried: Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches. Dissertation. 109 S.

Heft 27/1988

Heister, Hansbert: Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente. Habilitationsschrift. 213 S.

Heft 28/1987

Paßberger, Ernst H.: Systemstudie zur Sicherung ökologischer Vorrangflächen mittels Bodenordnung in Bayern / System study for the protection of ecological priority areas by means of Land rearrangement in Bavaria. Dissertation. 186 S.

Heft 29/1987

Glasmacher, Hans: Die Gaußsche Ellipsoid-Abbildung mit komplexer Arithmetik und numerischen Näherungsverfahren. Dissertation. 131 S.

Heft 30/1987

Zhang, Yan: Beiträge zum Entwurf von optimalen Beobachtungsplänen für tektonische Überwachungsnetze. Dissertation. 151 S.

Heft 31/1988

Lechner, Wolfgang: Untersuchung einer kreiselorientierten Landfahrzeug-Navigationsanlage im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der Höhenübertragung. Dissertation. 165 S.

Heft 32/1988

König, Rolf: Zur Fehlertheorie und Ausgleichung inertialer Positionsbestimmungen. Dissertation. 143 S.

Heft 33/1988

Borutta, Harald: Robuste Schätzverfahren für geodätische Anwendungen. Dissertation. 161 S.

Heft 34/1988

Landau, Herbert / Hehl, Klaus / Eissfeller, Bernd / Hein, Günter W. / Reilly, Ian W.: Operational Geodesy Software Packages. 325 S.

Heft 35/1988

Oberholzer, Gustav / Paßberger, Ernst: Landespflege in der Flurbereinigung, Teil IV. 153 S.

Heft 36/1988

Landau, Herbert: Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Softwareentwicklung und Analyse. Dissertation. 287 S.

Heft 37/1989

Eissfeller, Bernd: Analyse einer geodätischen raumstabilisierten Inertialplattform und Integration mit GPS. Dissertation. 327 S.

Heft 38/1990 (*vergriffen*)

Heft 38-1

Schödlbauer, Albert (Hrsg.): Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil I: Global Positioning System. 352 S.

Heft 38-2

Schödlbauer, Albert (Hrsg.): Moderne Verfahren der Landesvermessung. Beiträge zum 22. DVW-Seminar 12.-14. April 1989. Teil II: Nivellement. Teil III: Vermessungskreisel. S. 353 - 551.

Heft 39/1989

Kersting, Norbert / Welsch, Walter (Hrsg.): Rezente Krustenbewegungen. Seminar 8./9. Juni 1989. 307 S.

Heft 40/1989

Oberholzer, Gustav: Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung. 214 S.

Heft 41/1990

Hein, Günter W. / Hehl, Klaus / Eissfeller, Bernd / Ertel, Michael / Jacoby, Wolfgang / Czerek, Dirk: On Gravity Prediction Using Density and Seismic Data. 148 S.

Heft 42/1992

Kersting, Norbert: Zur Analyse rezenter Krustenbewe-

gungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Dissertation. V, 246 S.

Heft 43/1992

Hehl, Klaus: Bestimmung von Beschleunigungen auf einem bewegten Träger durch GPS und digitale Filterung. Dissertation. XII, 206 S.

Heft 44/1992

Oswald, Wolfgang: Zur kombinierten Ausgleichung heterogener Beobachtungen in hybriden Netzen. Dissertation. 128 S.

Heft 45/1993

Institut für Geodäsie (Hrsg.): Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung. Beiträge zum Geodätischen Seminar 12.-14. Mai 1993. 314 S.

Heft 46/1994

Brunner, Kurt / Peipe, Jürgen (Hrsg.): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Egon Dorrer zum 60. Geburtstag. 254 S.

Heft 47/1994

Heft 47-1

Thiemann, Karl-Heinz: Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil I: Renaturierungsleitbild, Naturschutzverfahren. XXXVI, 384 S.

Heft 47-2

Thiemann, Karl-Heinz: Die Renaturierung strukturarmer Intensivagrargebiete in der Flurbereinigung aus ökologischer und rechtlicher Sicht. Dissertation. Teil II: Planungsrechtliche Aspekte. XXXVI, S. 385 - 572.

Heft 48/1994

Schwartz, Christian: Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter besonderer Berücksichtigung systematischer Einflüsse. Dissertation. VIII, 192 S.

Heft 49/1995

Scheuring, Robert: Zur Qualität der Basisdaten von Landinformationssystemen. Dissertation. 126 S.

Heft 50/1997

Welsch, Walter M. / Lang, Martin / Miller, Maynard M. (Hrsg.): Geodetic Activities, Juneau Icefield, Alaska, 1981-1996. 268 S.

Heft 51/1996

Blomenhofer, Helmut: Untersuchungen zu hochpräzisen kinematischen DGPS-Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse. Dissertation. X, 168 S.

Heft 52/1997

Wang, Jian Guo: Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung. Dissertation. XV, 138 S.

Heft 53/1996

Chen, Guoping: Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Zeitbereich. Dissertation. III, 128 S.

Heft 54/1997

Dold, Jürgen: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. Dissertation. 140 S.

Heft 55/1997

Eissfeller, Bernd: Ein dynamisches Fehlermodell für GPS Autokorrelationsempfänger. Habilitationsschrift. XII, 182 S.

Heft 56/1997

Sutor, Thomas: Robuste Verfahren zur Analyse linearer stochastischer Prozesse im Spektralbereich. Dissertation. 123 S.

Heft 57/1997

Oberholzer, Gustav: Ländliche Kulturgeschichte und Landentwicklung, Teil II. 186 S.

Heft 58/1997

Zhong, Detang: Datumsprobleme und stochastische Aspekte beim GPS-Nivellement für lokale Ingenieurnetze. Dissertation. 160 S.

Heft 59/1997

Jiang, Ting: Digitale Bildzuordnung mittels Wavelet-Transformation. Dissertation. II, 136 S.

Heft 60/2000

Heft 60-1

Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.): 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 1: Wissenschaftliche Beiträge und Berichte. 331 S.

Heft 60-2

Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.): 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 2: Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen. 113 S.

Heft 60-3

Caspary, Wilhelm / Heister, Hansbert / Schödlbauer, Albert / Welsch, Walter (Hrsg.): 25 Jahre Institut für Geodäsie. Teil 3: Aus dem Leben des Instituts. 149 S.

Heft 61/1998

Cui, Tiejun: Generierung hochwertiger Digitaler Geländemodelle aus analogen Karten mittels Mathematischer Morphologie. Dissertation. 188 S.

Heft 62/1999

Brunner, Kurt / Welsch, Walter M. (Hrsg.): Hochgebirgs- und Gletscherforschung. Zum 100. Geburtstag von Richard Finsterwalder. 114 S.

Heft 63/1999

Fosu, Collins: Astrogeodetic Levelling by the Combination of GPS and CCD Zenith Camera. Dissertation. 155 S.

Heft 64/1999

Werner, Wolfgang: Entwicklung eines hochpräzisen DGPS-DGLONASS Navigationssystems unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolites. Dissertation. 226 S.

Heft 65/1999

Krack, Klaus: Dreizehn Aufgaben aus der Landesvermessung im Geographischen Koordinatensystem. 84 S.

Heft 66/2000

Joos, Gerhard: Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten. Dissertation. 150 S.

Heft 67/2000

Sternberg, Harald: Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Meßsystem. Dissertation. 158 S.

Heft 68/2000

Oberholzer, Gustav: Die Weiterentwicklung der Kulturlandschaft. Landespflege in der Flurbereinigung, Teil V. 150 S.

Heft 69/2000

Hollmann, Rolf: Untersuchung von GPS-Beobachtungen für kleinräumige geodätische Netze. Dissertation. 350 S.

Heft 70/2001

Roßbach, Udo: Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS. Dissertation. 167 S.

Heft 71/2001

Beineke, Dieter: Verfahren zur Genauigkeitsanalyse für Altkarten. Dissertation. 155 S.

Heft 72/2001

Oehler, Veit: Entwicklung eines „end-to-end“ Simulators zur Satellitennavigation unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolite gestützten GNSS-Landesystemen. Dissertation. 212 S.

Heft 73/2001

Schüler, Torben: On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Dissertation. 370 S.

Heft 74/2001

Neudeck, Stefan: Zur Gestaltung topografischer Karten für die Bildschirmvisualisierung. Dissertation. 131 S.

Heft 75/2002

Shingareva, Kira B. / Dorrer, Egon: Space Activity in Russia – Background, Current State, Perspectives. 135 S.

Heft 76/2002

Tiemeyer, Bernd: Performance Evaluation of Satellite Navigation and Safety Case Development. Dissertation. 151 S.

Heft 77/2004

Shi, Wei: Zum modellbasierten Austausch von Geodaten auf Basis XML. Dissertation. 115 S.

Heft 78/2004

Plan, Oliver: GIS-gestützte Verfolgung von Lokomotiven im Werkbahnverkehr. Dissertation. 115 S.

Heft 79/2004

Ebner, Matthias: Ein Beitrag zur monetären Bewertung von digitaler Netzinformation in Versorgungsunternehmen. Dissertation. 107 S.
[nicht in gedruckter Form, nur digital]

Heft 80/2005

Forstner, Gustav: Längenfehler und Ausgangsmeridiane in alten Landkarten und Positionstabellen. Dissertation. 319 S.

Heft 81/2006

Dutescu, Eugen: Digital 3D Documentation of Cultural Heritage Sites Based on Terrestrial Laser Scanning. Dissertation. 140 S.

Heft 82/2007

Schäuble, Doris: Nutzungstausch auf Pachtbasis als neues Instrument der Bodenordnung. Dissertation. 176 S.

Heft 83/2008

Pink, Sönke: Entwicklung und Erprobung eines multifunktionalen Geo-Sensornetzwerkes für ingenieur-geodätische Überwachungsmessungen. Dissertation. 180 S.

Heft 84/2009

Gräfe, Gunnar: Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum. Dissertation. 177 S.

Heft 85/2010

Heichel, Wolfgang: Chronik der Erschließung des Karakorum. Teil II – Central Karakorum I. 460 S.

Heft 86/2010

Riesner, André: Möglichkeiten und Grenzen der Bewegung von Landentwicklungsprozessen und deren Nachhaltigkeit. Dissertation. 222 S.

Heft 87/2012

Beineke, Dieter / Heunecke, Otto / Horst, Thomas / Kleim, Uwe G. F. (Hrsg.): Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Brunner anlässlich des Ausscheidens aus dem aktiven Dienst. 328 S.

Heft 88/2012

Lüdecke, Cornelia / Brunner, Kurt (Hrsg.): Von A(ltenburg) bis Z(eppelin). Deutsche Forschung auf Spitzbergen bis 1914. 100 Jahre Expedition des Herzogs Ernst II. von Sachsen-Altenburg. Tagung 2011 des Fachausschusses Geschichte der Meteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft und des Arbeitskreises Geschichte der Polarforschung der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung, 24.-25. September 2011, Naturkundliches Museum Mauritium, Altenburg. 120 S.

Heft 89/2012

Hinz, Silvia Arabella: Ganzheitliches Wertschöpfungsmodell der Waldflurbereinigung und deren Effizienzsteigerung. Dissertation. 257 S.

Heft 90/2015

Krack, Klaus / Oberholzer, Gustav: Die Ostausrichtung der mittelalterlichen Kirchen und Gräber. 194 S.

Heft 91/2015

Strübing, Thorsten: Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Dissertation. 182 S.

