



Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 934

Dirk Dennig

**Entwicklung eines kinematischen Profilvermessungssystems
am Beispiel Kranbahnvermessung**

München 2024

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5346-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 395, Hannover 2024



DGK Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 934

Entwicklung eines kinematischen Profilvermessungssystems am Beispiel Kranbahnvermessung

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

von

Dipl.-Ing. Dirk Dennig

München 2024

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5346-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 395, Hannover 2024

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München
Telefon +49 - 331 - 6264 1685 • E-Mail post@dgk.badw.de
<http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission:

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

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke (Universität der Bundeswehr München)
Prof. Dr. rer. pol. Philipp Otto

Tag der mündlichen Prüfung: 10.07.2023

© 2024 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

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

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5346-5

Kurzfassung

Die hochgenaue, geometrische Erfassung von Objekten und deren Umfeld mit geodätischen Messsystemen wie Lasertrackern und 3D Laserscannern wird bereits seit einigen Jahren durchgeführt. Bei langgezogenen Profilen, z. B. Führungs-, Fahr-, und Leitschienen, mit Längen von bis zu mehreren hundert Metern, wie sie bei Kranbahnen oder Hochregallagern vorkommen, ist bisher eine punktuelle, linienhafte Erfassung üblich. Aus den Messdaten werden Zustandsgrößen abgeleitet, die in Richtlinien, wie z. B. der VDI 3576 beschrieben sind. Zur Reduzierung der Absturzgefahr beim Signalisieren hochliegender Schienenprofile und zur Beschleunigung des Messprozesses, können motorisierte Plattformen für den Transport von Reflektoren eingesetzt werden.

Die Bewertung des Zustands der übrigen Bereiche erfolgt bei einer Krananlage jährlich durch einen Sachverständigen. Hierin eingeschlossen sind die Abnutzung des Profils sowie der Zustand der Schienenbefestigung und ggf. der Schweißnähte. Die Abhängigkeit von Erfahrung und Ausbildungsstand des Sachverständigen sowie des zu prüfenden Umfangs bedeuten eine gewisse Subjektivität der Prüfergebnisse.

Um langgestreckte Profile unterschiedlicher Geometrie und deren direktes Umfeld hochgenau kinematisch erfassen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit ein modulares Messsystem entwickelt, das mit Linienlaserscannern und Kameras ausgestattet ist. Die Modularität ergibt sich daraus, dass die Pose des Fahrzeugs durch einen externen Sensor referenziert, dass das Fahrzeug mit unterschiedlicher Sensorik ausgestattet und dass es auch ohne extern referenzierenden Sensor eingesetzt werden kann. Das System kann einen entscheidenden Beitrag für Transparenz, Echtzeitfähigkeit, Reproduzierbarkeit und Dokumentierbarkeit bei der Zustandsbeurteilung von Führungs-, Leit-, und Fahrschienen leisten. Bisherige subjektive Beurteilungen werden ersetzt oder bestätigt.

Es wird ein Bewegungs- und Auswertemodell für ein mit hoher Abtastrate messendes kinematisches System erarbeitet, so dass die tatsächliche Lage von Führungs-, Fahr-, und Leitschienen mit einer Unsicherheit im Submillimeterbereich bestimmt werden kann. Damit die Messung für die Praxis relevant wird, können die Ergebnisse unmittelbar ausgewertet werden. Aus den Messdaten lassen sich für eine objektive Beurteilung des Zustands von Profilen und Befestigungen folgende Zustandsparameter ableiten: Lage, Z-Werte, Neigung und Zustand der Schiene und deren Befestigung. Die Qualität der Messungen und Zustandsparameter lässt sich qualitätsgesichert durch Auflösung und Standardabweichung nachweisen.

Sensoren auf der Multisensorplattform liefern eine Vielzahl an Messwerten, die in Echtzeit zusammengeführt werden. An das System werden hohe Anforderungen an die Messqualität gestellt, die im unteren Submillimeterbereich liegen. Gleichzeitig erfolgt die Erfassung der Daten bei einer Geschwindigkeit von ca. 1 m/s. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Notwendigkeit eines mathematisch stochastisch begründeten, nichtlinearen Filtermodells, das die Kinematik ausreichend genau beschreibt.

Zur Gewährleistung der richtigen Zuordnung aller Messergebnisse ist ein geeignetes Kalibriermodell entwickelt worden, das alle Sensoren einschließt.

Anhand zweier Testmessungen wurden die Hardware und die Auswertelgorithmen validiert. Für die Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden bei der zweiten Messung die Messergebnisse des Multisensorsystems den Ergebnissen einer hochgenauen Referenzmessung gegenübergestellt.

Das aus der Hardware und den Auswertelgorithmen bestehende Multisensorsystem zur geometrischen Erfassung von Profilen konnte seine Mehrwerte gegenüber bekannten Systemen zeigen. Ein bedeutsamer Mehrwert ist die Unterscheidung zwischen der theoretischen und praktischen Schienenachse. Die durch diese Arbeit identifizierten und bestimmbareren Zustandsgrößen sollen in der neuen Fassung der VDI 3576 berücksichtigt werden.

Stichworte Kranbahnvermessung, Multisensorsystem, Sensordatenfusion, Synchronisierung, Kalibrierung, Laserscanning.

Abstract

The high-precision, geometric capture of objects and their surroundings with geodetic measurement systems such as laser trackers and 3D laser scanners has already been carried out for several years. In the case of elongated profiles, e.g. guide rails, carriage rails and guard rails, with lengths of up to several hundred meters, such as those found in crane runways or high-bay warehouses, a point-by-point, line-by-line recording has been common practice up to now. Condition variables are derived from the measurement data, which are described in guidelines such as VDI 3576. To reduce the risk of falling when signaling high-lying profiles and to speed up the measurement process, motorized platforms can be used to transport reflectors.

The condition of the remaining areas of a crane system is evaluated annually by an expert. This includes the wear of the profile as well as the condition of the rail fastening and, if necessary, the welds. The dependence on experience and level of training of the expert, as well as the scope to be inspected, suggest a certain subjectivity of the inspection results.

In order to be able to kinematically record elongated profiles of different geometries and their immediate surroundings with high precision, a modular measuring system equipped with line laser scanners and cameras is being developed within the scope of this work. The modularity results from the fact that the pose of the vehicle is referenced by an external sensor, that the vehicle can be equipped with different sensors and that it can also be used without an external referencing sensor.

The system can make a decisive contribution to transparency, real-time capability, reproducibility and documentation. As a result, previous subjective assessments are replaced or confirmed.

A motion and evaluation model for a kinematic system measuring at a high sampling rate will be developed, so that the actual position of guide rails can be determined with an uncertainty in the submillimeter range. To make the measurement relevant for practical applications, the results can be evaluated immediately.

The following condition parameters can be derived from the measurement data for an objective assessment of the condition of profiles and fastenings: Position, Z-value and condition of the rail and its fastening. The quality of the measurements and condition parameters can be verified in a quality-assured manner by means of resolution and standard deviation.

Sensors on the multisensor platform provide a large number of measured values that are combined in real time. High demands are placed on the system in terms of measurement quality, which are in the lower submillimeter range. At the same time, the data is acquired at a speed of approx. 1 m/s. From these requirements arises the necessity of a mathematically stochastically based nonlinear filter model that describes the kinematics sufficiently accurately.

To ensure the correct assignment of all measurement results, a suitable calibration model has been developed that includes all sensors.

Two test measurements were performed to validate the hardware and the evaluation algorithms. In the second measurement, the measurement results of the multi-sensor system were compared with the results of a high-precision reference measurement to verify the reproducibility.

The multisensor system consisting of the hardware and the evaluation algorithms for the geometric acquisition of elongated profiles was able to demonstrate its added value compared to known systems. A significant added value is the possibility to distinguish between the theoretical and practical rail axis. The state variables identified and determinable by this work shall be considered in the new version of VDI 3576.

Keywords crane rail survey, multi-sensor system, sensor data fusion, synchronizing, calibration, laserscanning.

Abkürzungsverzeichnis

6DoF	six degrees of freedom
BF	Bayes Filter
BG	Berufsgenossenschaften
BRF	backward running filter
CA	Constant Acceleration
CCA	Constant Curvature and Acceleration
CCR	Corner Cube Reflektor
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CSAA	Constant Steering Angle and Acceleration
CSAV	Constant Steering Angle Velocity
CTRA	Constant Turn Rate and Acceleration
CTRV	Constant Turn Rate and Velocity
CV	Constant Velocity
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DLT	Direct Linear Transform
DTP	Datumspunkt
EKF	Extended Kalman Filter
EVAC	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
fps	frames per second
FRF	forward running filter
GHM	Gauß-Helmert-Modell
GMM	Gauß-Markov-Modell
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
GVS	Koordinatensystem der Gleisvermarkungspunkte
IMU	Inertial Measurement Unit
KBMW	Kranbahnmesswagen
KF	Kalman Filter
KVS	Kalibriervorrichtungs-Koordinatensystem
LMS	Lasermesssystem
LKS	Lasertracker-Koordinatensystem
MEMS	Mikroelektromechanisches System
MWKS	Messwagen-Koordinatensystem
PB	Passbohrung
PDF	probability density function
PnP	Perspective-n-Point
PWM	Pulsweitenmodulation
PLS	Profillaserscanner
PVS	Profilvermessungssystem
RANSAC	random sample consensus
RTSS	Rauch-Tung-Striebel Smoother
ROS	Robot Operating System
SLT	statistical learning theory
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UKF	Unscented Kalman Filter
URTSS	Unscented Rauch Tung Striebel Smoother

UT	Unscented Transform
WP	Wagenparameter
XML	Extensible Markup Language
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung
ZP	Zustandsparameter

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik im Bereich der Vermessung von Schienenanlagen der Intralogistik	5
2.1 Elemente von Schienenanlagen der Intralogistik	6
2.1.1 Schienen und Profilstähle	6
2.1.2 Schienenlagerungssysteme	8
2.1.3 Schienenstöße, Festpunkte, Endbegrenzer, An- und Einbauten	11
2.1.4 Schienengebundene Krane	15
2.2 Rechtlicher Rahmen, Richtlinien und klassische Zustandsgrößen	16
2.2.1 Rechtlicher Rahmen	16
2.2.2 Richtlinien	17
2.2.3 Klassische Zustandsgrößen	18
2.2.4 Kritische Betrachtung	19
2.3 Vermessung von Schienenanlagen der Intralogistik	19
2.3.1 Koordinatensystem	19
2.3.2 Vermessung mit Theodolit, Bandmaß und Nivellier	21
2.3.3 Alignierverfahren mit Laser	23
2.3.4 Vermessung mit Tachymeter oder Lasertracker	25
2.3.5 Automatisierte Systeme mit georeferenzierendem Sensor	25
3 Grundlagen zur Bestimmung der geometrischen Zustandsgrößen von Profilen	31
3.1 Rekursive Filterung im Zustandsraum	31
3.1.1 Wahrscheinlichkeiten, Satz von Bayes, Verteilungen	31
3.1.2 Bayes Filter	32
3.1.3 Kalman Filter	33
3.1.4 Extended Kalman Filter	35
3.1.5 Unscented Kalman Filter	35
3.1.6 Unscented Rauch Tung Striebel Smoother	39
3.1.7 Fazit	40
3.2 Geometrische Modellierung von Kurven	41
3.2.1 Polynome	42
3.2.2 Splines	44
3.2.3 B-Splines	45
4 Profilvermessungssystem	49
4.1 Neue Zustandsgrößen	49
4.2 Sensorik	53
4.2.1 Georeferenzierender Sensor	53
4.2.2 Profillaserscanner	54
4.2.3 Kameras	54

4.2.4	Inklinometer	54
4.2.5	Inertiale Messeinheit	55
4.2.6	Encoder	55
4.2.7	Ultraschallsensoren	55
4.2.8	Sensorintegration	55
4.3	Profilvermessungssystem	56
4.3.1	Plattform	57
4.3.2	Antriebseinheit	58
4.3.3	Seitenführung	59
4.3.4	Schwingen	60
4.3.5	Halterung Sensorik	61
4.3.6	Drehvorrichtung für Reflektor	61
4.4	Erreichbare Messunsicherheiten	63
4.5	Datensynchronisierung und Datenhaltungskonzept	65
4.5.1	Anforderung an die Synchronisierung	66
4.5.2	Synchronisierung über die Zeit	68
4.5.3	Synchronisierung im Objektraum	70
4.5.4	Datenhaltungskonzept	71
4.6	Kalibrierung	72
4.6.1	Komponentenkalibrierung	72
4.6.2	Systemkalibrierung	76
5	Zustandsgrößen einer überarbeiteten VDI 3576	83
5.1	Messdatenerfassung und -aufbereitung	83
5.1.1	Messdatenerfassung	83
5.1.2	Orientierungsparameter aus Positionsdaten	83
5.1.3	Aufbereitung der Lasertracker- oder Tachymeterdaten	86
5.1.4	Korrektur der Beschleunigungswerte von der Erdschwere	88
5.1.5	Korrektur der Inklinometermesswerte von Beschleunigungseinflüssen	89
5.1.6	Korrektur der Längs- und Querablage	89
5.2	Sensorfusion für die Georeferenzierung des Profilmesswagens	89
5.2.1	Quaternionen	91
5.2.2	Adaptive Filterung der Inertial Measurement Unit (IMU)-Messwerte	92
5.2.3	Funktionales Modell	94
5.2.4	Stochastisches Modell	97
5.2.5	Steigerung der Zuverlässigkeit der Filterung	99
6	Testmessung und Validierung des kinematischen Multisensorsystems	101
6.1	Durchführung einer kinematischen Schienenmessung mit dem Profilvermessungssystem	101
6.2	Qualitätssicherung des Messprozesses	102
6.3	Messkampagne I: Messung unter Laborbedingungen	102
6.3.1	Auswertung	104
6.3.2	Einfacher Ansatz zum Finden weiterer Zustandsgrößen	111
6.3.3	Zusammenfassung	112
6.4	Messkampagne II: Messung unter realen Bedingungen	113
6.4.1	Messumgebung	113
6.4.2	Messkonzept und Netzplanung	113
6.4.3	Ergebnisse und Bewertung der Netzmessung	115
6.5	Qualitätsaussagen zu dem Profilvermessungssystem	116
6.5.1	Bewertung der Kalibrierparameter	116
6.5.2	Einordnung der Ergebnisse der referenzierten Scanprofile	118
6.5.3	Validierung der referenzierten Profile	119

6.5.4	Extraktion der praktischen Schienenachspunkte aus den 3D Punktwolken . . .	121
6.5.5	Zustandsgrößen nach der VDI 3576:2011-03	122
6.5.6	Kameraaufnahmen	124
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
7.1	Zusammenfassung	127
7.2	Beurteilung	128
7.3	Ausblick	128
A	Ergänzendes Material	131
A.1	Soll-Ist Vergleich von dem 3D CAD Modell des Kalibrierkörpers und dem mit der Leica T-Scan gescannten 3D Druck	131
A.2	Abtastrate der Sensoren	132
A.3	Ablaufschema für eine Messung mit dem kinematischen Profilvermessungssystem Messsystem	133
A.4	Ergebnisse der Filterung aller Sensordaten. Messkampagne I, 1. Messfahrt (Labor) .	134
A.5	Innovationen nach Sensor getrennt. Messkampagne I, 1. Messfahrt (Labor)	139
	Literaturverzeichnis	141
	Abbildungsverzeichnis	153
	Tabellenverzeichnis	157

1 Einleitung

1.1 Motivation

Von langgestreckten Profilen wie Führungs-, Leit-, und Fahrschienen, wie sie bei Kranbahnen, Hochregallagern und u.v.m. zu finden sind, werden u.a. die Abweichungen zu Sollachsen in Lage und Höhe vermehrt mit automatisierten Systemen nach geltenden Richtlinien vermessen. Sie bestehen aus einem akkubetriebenen, ferngesteuerten Fahrzeug, einer Einheit zur Positionsregistrierung, wie z. B. einem Tachymeter, sowie Bedien- und Auswertesoftware. Automatisiert und beschleunigt wird der Messablauf von schienengebundenen Anlagen, insbesondere dann, wenn diese aufwändig oder zeitlich beschränkt zugänglich sind. Demgegenüber stehen klassische Methoden (z. B. mit Stahlbandmaß, Laser-Distanzmesser, Theodolit oder Tachymeter), die während des Lebenszyklus einer Anlage eingesetzt werden. Nachteile wie z. B. Messunsicherheiten oder eine nur stichprobenartige Anzahl an Messpunkten, die nur einen Ausschnitt der Realität liefern, werden wissentlich oder unwissentlich in Kauf genommen. Entscheidend für die Wahl des Messverfahrens sind wirtschaftliche Gründe und/oder die Verfügbarkeit. So sind die einfachere Bedienbarkeit und in der Folge geringeren Kosten ausschlaggebend für die Wahl der klassischen Mittel und Verfahren. Die automatisierte Vermessung ist der manuellen zeitlich überlegen und in der Regel umfangreicher. In beiden Fällen folgt allgemein eine zeitlich versetzte Auswertung. Bekannte, automatisierte Systeme nutzen in der Regel motorisierte Tachymeter. Häufig sind 360° Prismen auf den mobilen Plattformen zu erkennen (Gantrex GmbH, 2016; HPM Vermessung, 2013; Service, 2017). Lösungen in Kombination mit Unmanned Aerial Vehicle (UAV) erfordern z. B. bei der Einmessung von Passpunkten, weiterhin tachymetrische Messungen (Ghassoun et al., 2021), sind in ihrem Aktionsraum, beispielsweise in Hallen, eingeschränkt und können noch nicht ausreichend genau alle Zustandsgrößen, wie der Schienenkopfneigung, wie sie Richtlinien wie z. B. der VDI 3576:2011-03 erwarten, liefern. Ein anderes System nutzt einen stabilisierten Laser und eine aktive Zieltafel (Apel, 1983). Da es sich bei allen Systemen um proprietäre Lösungen handelt, sind so gut wie keine Informationen über die verwendete Technik bekannt. Eine Bewertung der Messqualität ist dadurch nicht möglich. Dies betreffen Algorithmen, die zur Anwendung kommen, die Durchführung von Kalibrierungen, die Verwendung von Komponenten, z. B. eines Inklinometers zur Neigungskorrektur oder die Technik zur Funkübertragung.

Von Interesse ist die schnelle und durch hohe Abtastrate fast kontinuierliche Lage- und Höhenmittlung (Z-Werte) von Schienen und deren Auswertung vor Ort. Die hohe Geschwindigkeit einer automatisierten Vermessung ist nicht nur für Inspektionen und die Instandhaltung interessant, sondern auch während der Bauphase, da der Zustand aufgrund eines detaillierteren Abbildes besser bewertet werden kann. Die automatisierte Vermessung kann ebenfalls im Rahmen der Qualitätssicherung bei Abnahmen Anwendung finden. Unter Abnahmen sind nicht nur solche von verlegten Schienen zu verstehen, sondern auch z. B. Werksabnahmen von Langprodukten aus Stahl (Muders, 2004), Kunststoff oder anderen Werkstoffen.

Im Rahmen der jährlichen Prüfungen von Krananlagen gemäß der Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV Vorschrift 52, 2001), die die Prüfung von Kranbahnen nicht genau beschreibt und hierdurch von der subjektiven Erfahrung der Prüfenden abhängig ist, ist eine kontinuierliche und automatisierte Erfassung des Ist-Schienenprofils und ggf. der Ist-Schienenbefestigung eine Möglichkeit, eine objektive und schnelle Zustandserfassung und -bewertung herbeizuführen. Durch diese Neuerung (in diesem Markt) und in Verbindung mit hochgenauer, kontinuierlicher Schienenvermessung und Monitoring lassen sich Verschleißgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der tatsächlichen Anlagennutzung prognostizieren.

Gelingt es, Messungen bei aufgeständerten Kranbahnen im be- und entlasteten Zustand der Schienen durchzuführen und die Ergebnisse einander gegenüber zu stellen, dann kann dies u.a. zur Verifizierung von Statiken dienen (Neumann und Dennig, 2011). Durch die Erweiterung und Kombination eines automatisierten Systems durch Linienlaserscanner und Kameras können die ermittelten Lage- und Z-Werte um Informationen wie z. B. die Abnutzung der Schiene und der Befestigung erweitert werden. Ein um zusätzliche Sensoren erweitertes, automatisiertes System kann einen entscheidenden Beitrag für Transparenz, Echtzeitfähigkeit, Reproduzierbarkeit und Dokumentierbarkeit bei der Zustandsbeurteilung von Führungs-, Leit-, und Fahrschienen leisten. Bisherige subjektive Beurteilungen werden ersetzt oder bestätigt.

In dieser Arbeit soll ein System, bestehend aus Hard- und Software, entwickelt werden, bei dem ein mit ca. 1 m/s messendes kinematisches Fahrzeug die tatsächliche Lage und Z-Werte von Führungs-, Fahr-, und Leitschienen mit einer Unsicherheit von 0,5 mm erfassen kann. Die Anforderung an die Unsicherheit ergibt sich aus den Toleranzklassen und Zustandsgrößen z. B. der Richtlinie VDI 3576 und der DIN 18710-1, nach der die Standardabweichung σ zwischen 10 % und 20 % der zu bestimmenden Messgröße betragen soll. Damit die Messung für die Praxis relevant wird, müssen die Ergebnisse in Echtzeit ausgewertet werden können, wobei bei „Echtzeit“ in diesem Zusammenhang die Zeitspanne „vor Ort“ als ausreichend anzusehen ist.

Die Idee für das Messsystem stammt aus dem Jahr 2010. Teile dieser Arbeit entstanden durch ein von der AiF Projekt GmbH, als Projektträger des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), gefördertes Kooperationsprojekt (01/2014 bis 06/2016, Fördernummer KF3220501PR3).

1.2 Zielsetzung

Mit den vier Stichwörtern Transparenz, Echtzeitfähigkeit, Reproduzierbarkeit und Dokumentierbarkeit lassen sich die Ziele, die an das zu entwickelnde System dieser Arbeit gesetzt wurden, zusammenfassen und kategorisieren.

Transparenz Für den Bereich der Führungs-, Leit- und Fahrschienen gibt es keine Richtlinien, die Vorgaben zu der Art und Weise der Inspektion machen. Es gibt im Rahmen der Unfallverhütungsvorschriften die Vorgabe, dass Krane jährlich zu prüfen sind. Der Zustand der Kranbahn selber ist nur optisch zu kontrollieren. Das zu entwickelnde System wird aufgrund seiner mathematischen Auswerteansätze ein Novum sein und Transparenz schaffen. Es werden Prüfungen auf einem hohen Qualitätsniveau mit quantifizierbaren Prüfergebnissen ermöglicht.

Echtzeitfähigkeit Ziel ist es, die Ergebnisse in Echtzeit verfügbar zu machen, um ggf. noch vor Ort die Möglichkeit zu haben, diese ggf. gemeinsam mit dem Betreiber am Objekt zu verifizieren oder um auszuführenden Firmen unmittelbar Richtarbeiten zu ermöglichen. Eine Folgemessung im Anschluss könnte erforderlich sein, um die Abstellung der Mängel zu dokumentieren.

Reproduzierbarkeit Die Objektivität und Genauigkeit des Verfahrens zur Vermessung von Führungs-, Leit-, und Fahrschienen wird durch das zu entwickelnde Messsystem, die Integration der Sensoren, die klar definierten Abläufe sowie das Kalibriermodell, die zusammen wiederholbare Ergebnisse liefern, ermöglicht. Aufgrund der geforderten Verlegegenauigkeiten für Kranschienen und dem angestrebten außerhalb der Schienenflucht befindlichen Standortes des Beobachtungsgerätes, ist eine Lösung zu erarbeiten, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auf dem Markt bisher nicht verfügbar ist. Reproduzierbarkeit ist auch für Monitoringzwecke relevant.

Dokumentierbarkeit Die Ergänzung der Vermessung durch Kameras und Laserscanner kommt der Dokumentierbarkeit zugute. Die Kameras sollen automatisch die Form (rechtwinkliger, schräger Stoß, etc.) und die Position der Schienenstöße erkennen. Die Bestimmung der Position ist relevant, um die anzuwendenden Auswertealgorithmen entsprechend segmentieren zu können. Die Vermessung

von Kranbahnen sind häufig zeitlich beschränkt. Eine visuelle Kontrolle ist in der Realität aufwändig, birgt ein hohes Unfallrisiko und eine nachträgliche Inspektion ist mit großem Zeitaufwand verbunden. Die mit Kameras erstellten Aufnahmen dienen daher der visuellen Dokumentation, um z. B. geometrisch auffällige Ergebnisse kontrollieren zu können (sowohl aus der Vermessung als auch aus der Laserscannerpunktvolke).

Neu im Sinne der Anwendung ist, ein modulares Vermessungssystem zu entwickeln, das nicht „nur“ die Lage und Z-Werte der Schiene geodätisch bestimmen kann, sondern auch den Zustand der Schiene sowie die unmittelbare Umgebung mittels Kameras und Laserscannern erfasst. In diesem Zusammenhang ist unter modular eine konstruktive Plattform zu verstehen, die entweder für die Z-Werte und Lagevermessung der Schiene und/oder ausgerüstet mit Laserscannern zur Zustandserfassung von Schiene, Schienenbefestigung, etc. verwendet wird. An die Plattform werden bestimmte Anforderungen gestellt: Sie muss auf verschiedenen Profilen einsetzbar sein, kompakt, leicht, verwindungssteif, ggf. zerlegbar. Die Forschungshypothesen lauten zusammenfassend:

1. Lässt sich ein Bewegungs- und Auswertemodell für den Schienenmesswagen finden, um die erforderlichen Parameter zur objektiven Zustandsbestimmung von Schiene und Befestigung reproduzierbar ermitteln zu können? Und lässt sich innerhalb weniger Stunden eine komplette Kranbahn messen und auswerten (Echtzeitfähigkeit)?
2. Es soll die Geometrie von Fahrschienen mit einer Unsicherheit von wenigen Zehntelmillimeter (Standardabweichung) bestimmt werden.
3. Die zur Beurteilung des Zustands von Schiene und Befestigung aufgestellten Zustandsparameter lassen sich in mehrere Teilzeile unterteilen, wobei diese die bisherige Subjektivität in einer Kranschienendokumentation möglichst objektivieren sollen:
 - 3D Position der Schiene
 - Zustand der Schiene (z. B. Schienenhöhe, Schienenkopfbreite, Risslänge, Rissbreite)
 - Schienenbefestigung (z. B. Anzahl der Befestigungen, Verdrehung, Vollständigkeit [Mutter, Schraube, Elastomer unter der Schiene])
 - Die gemessenen Zustandsparameter lassen sich qualitätsgesichert durch Auflösung und Standardabweichung nachweisen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Notwendigkeit aus technischer Sicht, Profile verschiedenster Form und Material geometrisch zu vermessen, wird in Kapitel 2 erläutert. Es wird in die relevanten Komponenten des Oberbaus sowie Regularien eingeführt. Die Entwicklung der Kranbahnvermessung während der letzten 65 Jahre wird dargestellt.

Grundlagen zu den in dieser Arbeit verwendeten Algorithmen, die für die Berechnungen erforderlich sind, werden in Kapitel 3 vorgestellt. Zwei verschiedene Ansätze werden erläutert. Zum einen ist ein mathematisch stochastisch begründetes nichtlineares Filtermodell erforderlich, das die Kinematik der Plattform hinreichend genau beschreibt, so dass bei der Geschwindigkeit der Plattform von etwa 1 m/s die geometrischen und zeitlich resultierenden Abweichungen von 0,5 mm nicht überschritten werden. Zum anderen soll für ausgewählte Zustandsparameter der Schiene darüber hinaus eine Parameterschätzung entwickelt werden, die auch die Ableitung von Qualitätsaussagen ermöglicht. Hierfür kommt zum Beispiel ein Freiformkurven basierter Glättungsalgorithmus für die Beschreibung des Verlaufs der Schienen und Objektgeometrie in Frage.

Im Kapitel 4 wird die Entwicklung eines Profilvermessungssystems (PVS) beschrieben. Auf diesem Multisensorsystem kommen eine Vielzahl Sensoren zum Einsatz, deren Messwerte in Echtzeit zusammengeführt werden. Sie erfassen mit hoher Abtastrate und dadurch fast kontinuierlich sowie hochgenau die Geometrie von Profilen. Konkret sind es in dieser Arbeit Schienenprofile. Neben der Auswahl der verschiedenen Sensoren, gehört die Zeitsynchronisierung, der Umgang mit den Daten sowie die Sensor- und Systemkalibrierung ebenso dazu.

Das konkrete Filter wird in Kapitel 5 beschrieben. Ergebnisse von Testläufen werden einander gegenübergestellt und kritisch diskutiert. Schließlich werden abgeleitete Zustandsgrößen vorgestellt.

Im vorletzten Kapitel erfolgt die Validierung des Gesamtsystems. Im Rahmen einer Labormessung auf einem 6 m langen Schienenstrang sowie einer realen Vermessung einer knapp 40 m langen Anlage wird die Leistung des PVS untersucht und einer Referenzmessung gegenübergestellt. Die Ergebnisse können auf beliebige andere, gerade oder radial verlaufende, geometrische Objekte übertragen werden.

In Kapitel 7 werden die erreichten Ergebnisse zusammengefasst. Es folgt der Ausblick, wie das System eingesetzt werden kann und in welchen Bereichen es noch Forschungsbedarf gibt.

2 Stand der Technik im Bereich der Vermessung von Schienenanlagen der Intralogistik

Schienenanlagen sind im Bereich von schienengebundenen Transportsystemen, wie z. B. Eisenbahnen, Straßenbahnen, Kranen, Hochregallagern, aber auch bei verschiebbaren Tribünen oder Hallendächern bekannt. Ein oder mehrere, in der Regel parallel verlegte, Profile sind auf stabilen Auflagen befestigt. Auf ihnen können die auf Rollen gelagerten Objekte verfahren werden.

In der Regel sind die Anlagen Bestandteil eng getakteter Fahrpläne oder Bestandteil von komplexen Logistikketten. Außerplanmäßige Ausfälle, die erhebliche ökonomische Folgen haben können und Unfälle, im Extremfall mit Personenschäden, sind zu verhindern. Diese Forderung spiegelt sich in den verschiedensten nationalen und internationalen Richtlinien sowie regelmäßigen Prüfungen wider. Der Prozess der geometrischen Aufnahme dieser Schienenanlagen wird aufgrund der Wettbewerbssituation, moderner Vermessungsinstrumente, zusätzlicher Sensoren, Zubehör und Auswerteverfahren kontinuierlich weiterentwickelt.

Grob lassen sich bekannte technische Lösungen für die geometrische Erfassung des Ist-Zustands nach ihrem Anwendungsfeld unterscheiden. So wurden zum einen Lösungen für die Befahrung von Gleisen der Eisen- und Straßenbahn entwickelt, also zwei parallel verlegte Profile, die in weiten Teilen Europas einen Abstand von 1435 mm zueinander haben.

Zum anderen für die Befahrung und Vermessung einzelner Schienenstränge im Bereich der Intralogistik¹, deren ggf. benachbarte Profile sich einige Meter entfernt befinden. Diese Art von Anlagen sind auch bei schienengebundenen Krananlagen zu finden. Am Beispiel der objektiven geometrischen Erfassung von Kranbahnen baut diese Arbeit auf.

Abbildung 2.1 bringt die geometrische Erfassung in den Kontext mit rechtlichen Vorgaben, Interessen des Betreibers, Kranbahnerstellers und dem Kranlieferanten.

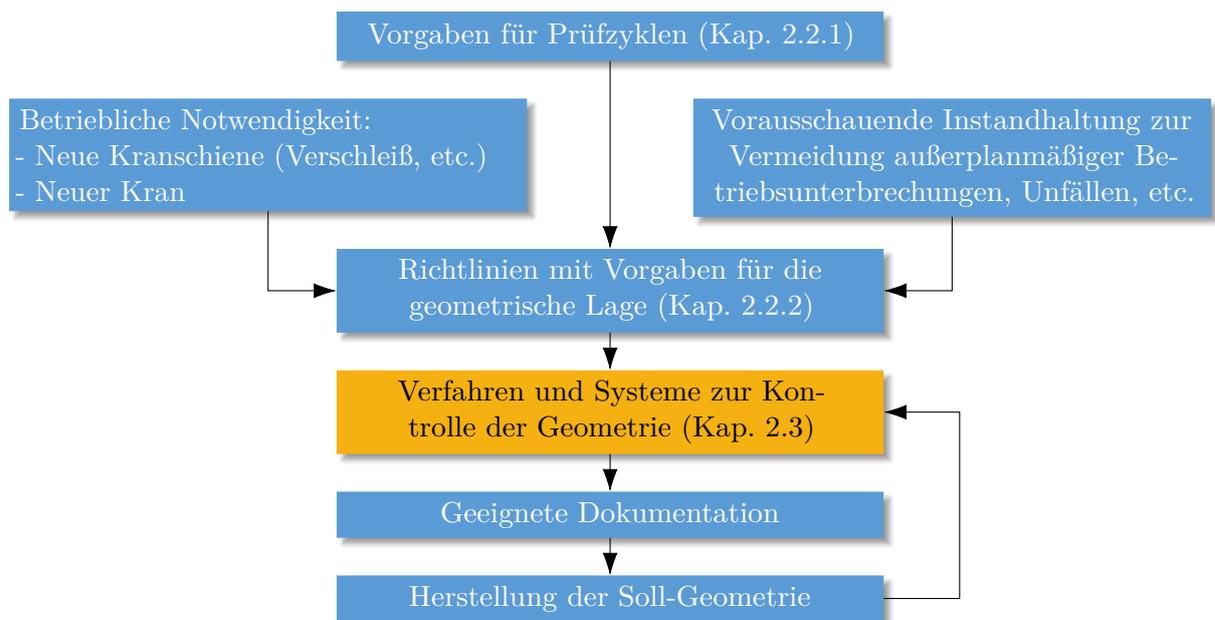


Abbildung 2.1: Einordnung der Vermessung im Rahmen von Arbeiten an Kranen und Kranbahnen.

¹„Moderne Intralogistiksysteme ermöglichen eine zuverlässige und flexible Produktionsversorgung sowie effiziente Prozesse“ innerhalb eines Betriebsgeländes (VDMA, 2023).

Die Notwendigkeit für die Vermessung einer Kranbahn kann verschiedene Gründe haben:

- gesetzlicher Rahmen (siehe Unterabschnitt 2.2.1)
- bauliche Bedingungen (Verschleiß an Rad oder Schiene, Neubau etc.)
- als Grundlage zur Planung von Maßnahmen für die vorausschauende Instandhaltung (präventive Maßnahmen) und zur Vermeidung außerplanmäßiger Betriebsunterbrechungen. Interessante Überlegungen mit Bezug auf den Nahverkehr liefern Zaayman (2013) und Cabrera (2009).

In diesem Sinne ist eine Norm oder Richtlinie, die Toleranzen für die geometrische Lage einer Kranbahn definiert, der kleinste gemeinsame Nenner aller Beteiligten. Die Verfahren sowie die Systeme zur Kontrolle der Geometrie dienen der objektiven Kontrolle und Dokumentation.

Aber warum spielt die Einhaltung der Richtlinien, bzw. die Lage und der Zustand der Profile im Raum überhaupt so eine entscheidende Rolle? Abbildung 2.2 hilft bei der Veranschaulichung. Sie zeigt vier verschiedene resultierende Kräfte in Abhängigkeit von Zuständen der Kranbahn und des Krans. Diese sind: eine neue, ausgerichtete Kranbahn; eine schlecht ausgerichtete Kranbahn; eine verschlissene Kranbahn und ein dejustierter Kran. Hannover (1980) schreibt zu den wirkenden Kräften: „Ein Achsparallelitätsfehler von z. B. 5' erzeugt für die Rad/ Schiene-Paarung Stahl auf Stahl bereits eine Seitenkraft in der Radaufstandsfläche von ca. 10 % der Radlast“. Da dies nur ein möglicher Fehler bei der Justierung eines Krans sein kann, können die übrigen z. B. gemäß ISO 12488-1 definierten Toleranzen der Zustandsgrößen, bei schlechter Justierung eine noch größere resultierende Kraft bewirken.

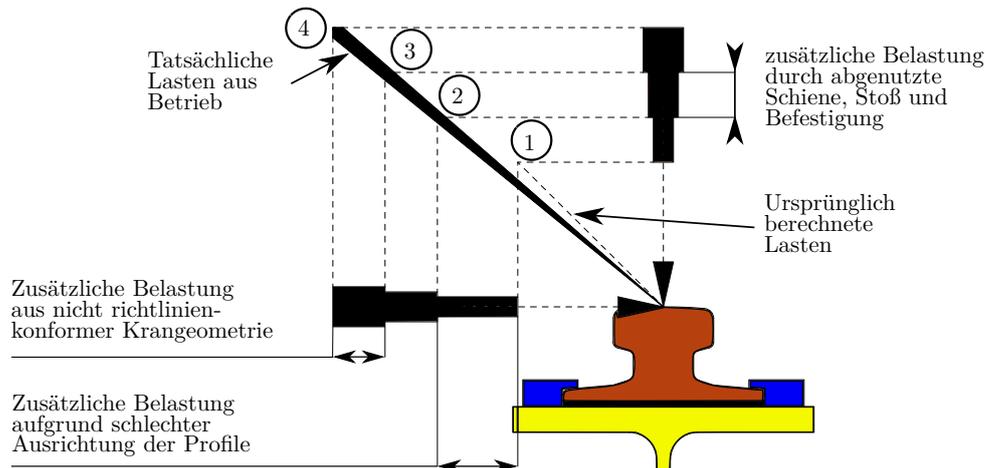


Abbildung 2.2: Resultierende Kräfte bei vier Zuständen der Kranbahn und des Krans: Neue Schienen (1); schlecht ausgerichtete Schienen (2); verschlissene Schienen (3); schlecht justierter Kran (4).

Für die Reduzierung und Beurteilung der in Abbildung 2.2 dargestellten resultierenden Kräfte, ist es erforderlich, die Elemente einer Schienenanlage zu erfassen, zu klassifizieren und zu bewerten. Um welche Elemente es sich hierbei handelt, wird in dem folgenden Abschnitt 2.1 beschrieben.

In Abschnitt 2.2 werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die Richtlinien und die klassischen Zustandsgrößen dargelegt. In Abschnitt 2.3 werden verschiedene Vorgehensweisen zur Vermessung von Schienenanlagen dargestellt.

2.1 Elemente von Schienenanlagen der Intralogistik

2.1.1 Schienen und Profilstähle

Es gibt unzählige Profile. Es soll hier jedoch nur auf die in der VDI 3576:2011-03 und I- und H-Profile nach DIN EN 10034:1994-03 weiter eingegangen werden. Wie schon geschrieben, stehen

insbesondere für die für die Bahn geeigneten Profile umfangreiche Qualitätskriterien zur Verfügung. Die in Abbildung 2.3 gezeigten Profile haben folgende Bezeichnung und Verwendung:

- Flach-, bzw. Vierkantschienen nach DIN EN 10058 werden auf Stahlträger geschweißt (siehe VDI 3576:2011-03, Abschnitt 3.2.1).
- Kranschienen nach DIN 536-1 mit der Form A zur Verwendung bei kontinuierlicher Schienelagerung (siehe VDI 3576:2011-03, Abschnitt 3.2.2.1).
- Kranschienen nach DIN 536-2 mit der Form F zur Verwendung ähnlich wie bei der Form A (siehe VDI 3576:2011-03, Abschnitt 3.2.2.2).
- Vignolschienen nach DIN EN 13674-1 und DIN EN 13674-4 zur Verwendung bei diskontinuierlicher Lagerung (siehe VDI 3576:2011-03, Abschnitte 3.2.3 bis 3.2.4).
- Dickstegige Schienen; besonders für diskontinuierliche Lagerung geeignet (siehe VDI 3576:2011-03, Abschnitt 3.3.1).
- Sonderformen „Q“ und „R“ sind besonders für hohe Radlasten geeignet (siehe VDI 3576:2011-03, Abschnitt 3.3.2 sowie VDI 3576:2011-03, Abschnitt 3.3.3).

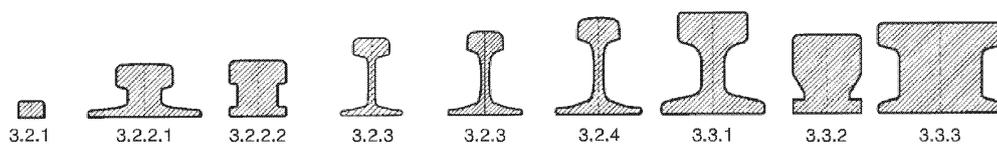


Abbildung 2.3: Übliche Schienenprofile gemäß der VDI 3576:2011-03.

Profilstähle sind auch als Führungs-, Fahr- und Leitschienen geeignet. Für die Fahrschienen von Regalbediengeräten werden neben Vignolschienen auch I-Profile (Doppel-T-Träger) nach DIN 1025 verwendet. Tabelle 2.1 zeigt eine Auswahl unterschiedlicher Toleranzen von (Stahl-)Profilen. Obwohl die Profile ähnliche Abmaße haben, sind die Toleranzen sehr unterschiedlich. So fällt auf, dass die Toleranz der Kranschienenprofile (Gruppe A100 bis A150) deutlich größer als die der Vignolschienen ist. Die Ursachen können unterschiedlich sein. So ist der Walzprozess für ein A-Profil mit seinem sehr breiten Fuß im Gegensatz zu einem Vignolprofil sehr viel aufwändiger. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Toleranz bei einer Hochgeschwindigkeitsschiene sehr viel höher als bei einem Kranschienenprofil, das mit langsamerer Geschwindigkeit befahren wird.

In den Richtlinien sind teilweise weiterführende Angaben zu finden. So sind für die Vignolschienen auch die Ebenheit/Geradheit in Längsrichtung definiert. Für die I-Profile sind dazu auch Angaben enthalten und darüber hinaus Toleranzen für die Flanschparallelität und Stegaußermittigkeit. Das diese Angaben z. B. bei den A-Profilen fehlen, führt in der Praxis tatsächlich häufig zu Problemen. Starke Verdrehungen an den Schienenenden erschweren das Verbinden derselben oder führen zu erhöhtem Verschleiß an dem System Rad-Schiene.

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Toleranzen ausgewählter Profile.

Profilbezeichnung	A-Profil	Vignolschiene	I-Profil
Norm	DIN 536-1	DIN EN 13674-1	DIN EN 10034
Profil	A100 - A150	> 46 kg/m	IPE180 - IPE400
Einheit	[mm]	[mm]	[mm]
Kopfbreite	+/-1	+/-0,5	+4/-2
Asymmetrie	-	+/-1,2	-
Fußbreite	+2/-5	+/-1	+4/-2
Höhe	+/-1,5	+/-0,5	+4/-2

2.1.2 Schienenlagerungssysteme

Schienenlagerungen ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH (2010) schreibt, dass Schienenlagerungen für Förderfahrzeuge, wie z. B. Krane, nicht bahnüblich sind. Wesentliche Unterschiede sind die hohen Lasten, denen bei geringen Geschwindigkeiten standgehalten, sowie die wirkenden Horizontalkräfte, die über den Reibungswiderstand abgetragen werden sollen.

Es gibt durchgehende (kontinuierliche, Abbildung 2.4b) und nicht durchgehende (diskontinuierliche, Abbildung 2.4a) Schienenlagerungen. Bei Portalkranen können diskontinuierliche Schienenlagerungen vorkommen (z. B. Abbildung 2.17c). Bei Brückenkränen sind kontinuierliche Schienenlagerungen üblich. Die Schienen liegen in den Fällen auf Stahl (siehe Abbildung 2.17a) oder Betonlängsträgern auf.

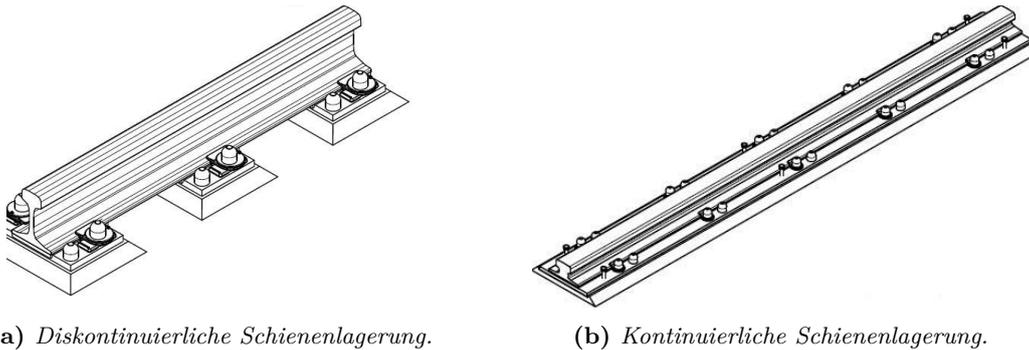
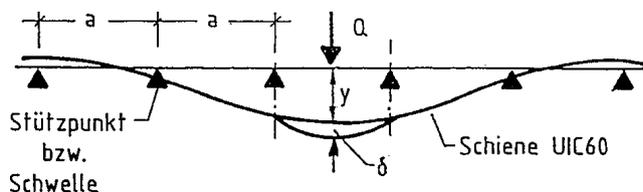


Abbildung 2.4: Schienenlagerungssysteme auf Beton (ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2010, S. 86, 87).

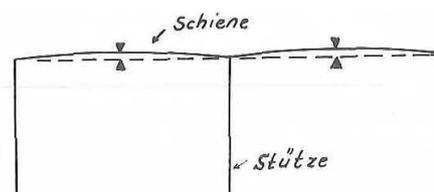
Die Wahl der Schienenlagerung erfolgt nach Art der Beanspruchung und wirtschaftlichen Aspekten. Aus statischer Sicht wird eine kontinuierliche Schienenlagerung geringer beansprucht als eine diskontinuierliche und ist damit langlebiger.

Schienenbefestigungen Die Hauptaufgabe der Befestigung von Kranschienen ist es hohe Querkräfte aufzunehmen, die durch den Kran und seine Lasten eingeleitet werden (EN 1993-6:2007, Kap. 8.5). Natürlich soll sie auch die Schiene gegen Kippen sichern. Für die Bemessung der Befestigung hat sich die Annahme des Verhältnisses 10:1 von Vertikal- zu Horizontalkräften etabliert. Das Gesamtgewicht verteilt sich anteilig auf ein einzelnes Rad. Berücksichtigt man schließlich noch einen Sicherheitsbeiwert, kann abgeschätzt werden, ob eine Schienenbefestigung die auftretenden Querlasten aufnehmen kann. In Abhängigkeit von dem Kranfahrwerk, dem Einsatz von Spurkränzen oder Spurführungsrollen und einigen weiteren Faktoren berechnet sich der Befestigungsabstand der Schienenbefestigung. In der Regel erfolgt die Dimensionierung durch einen Tragwerksplaner.

Wegen der sehr hohen vertikalen Lasten und im Vergleich zur Eisenbahn eher niedrigen Geschwindigkeiten, sind Kranschienen idealerweise durchgehend gelagert (siehe Abbildung 2.4b).



(a) Schienendurchbiegung nach Eisenmann (2004).



(b) Überhöhung der Schiene nach Schuster (1976, S. 380).

Abbildung 2.5: Schienendurchbiegung und Überhöhung.

Bei einer diskontinuierlichen Lagerung (Abbildung 2.4a) kommt es zu einer vertikal abhebenden Kraft, sobald das Rad zwischen zwei Stützpunkten steht. Der symbolisierte Kräfteverlauf ist in

Abbildung 2.5a dargestellt. Die abhebenden Kräfte sind im Bereich der jeweils äußeren Stützpunkte zu sehen. Diese Kraft muss durch die Schienenbefestigung aufgenommen werden können. Je kleiner der Stützpunkt Abstand a wird, umso geringer wird die abhebende Kraft. Aus diesem Grund beansprucht eine kontinuierliche Lagerung die Befestigung (und die Lagerung der Schiene) am geringsten.

Insbesondere bei Kranschienen, die zwar kontinuierlich aber auf Kranbahnbalken aus Stahl, z. B. bei einer Stahlbauhalle, gelagert sind, verformt sich der Kranbahnbalken elastisch, sobald sich das Kranrad in der Mitte des Balkens befindet. Zur Gewährleistung einer horizontalen Fahrbahn während einer Kranfahrt, werden die Kranbahnbalken idealerweise mit einer planmäßigen Überhöhung in der Balkenmitte geplant (siehe Abbildung 2.5b). Entsprechend wird auch in aktuellen Normen auf die Berücksichtigung der vertikalen und horizontalen Verformung unter Belastung hingewiesen (Abbildung 2.6).

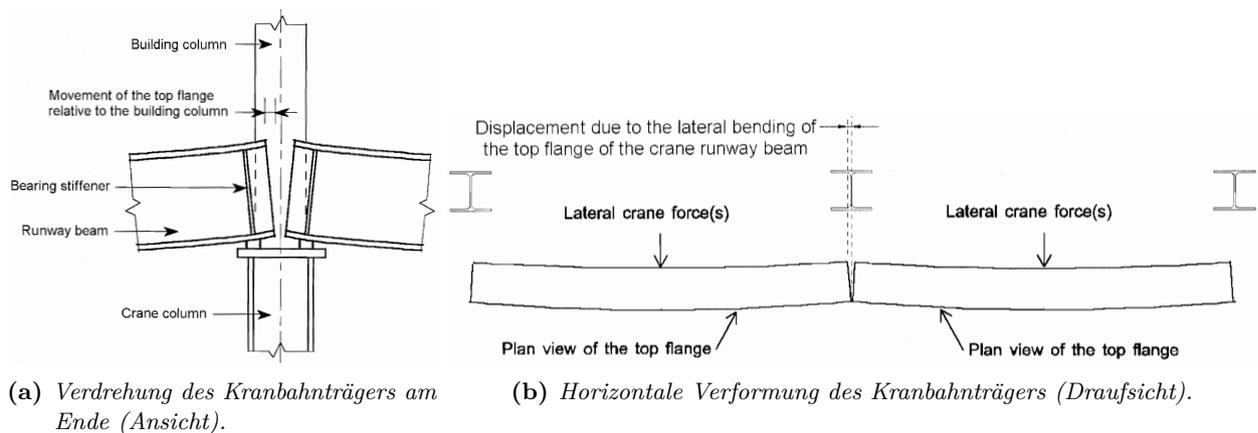


Abbildung 2.6: Verformungen der Fahrbahn (EN 1993-6:2007, Kap. 8.3)

Die beschriebenen Anforderungen und Bedingungen haben eine Vielzahl von Befestigungslösungen zur Folge, die in Abbildung 2.7 dargestellt und durch die Aufzählung ergänzt werden.

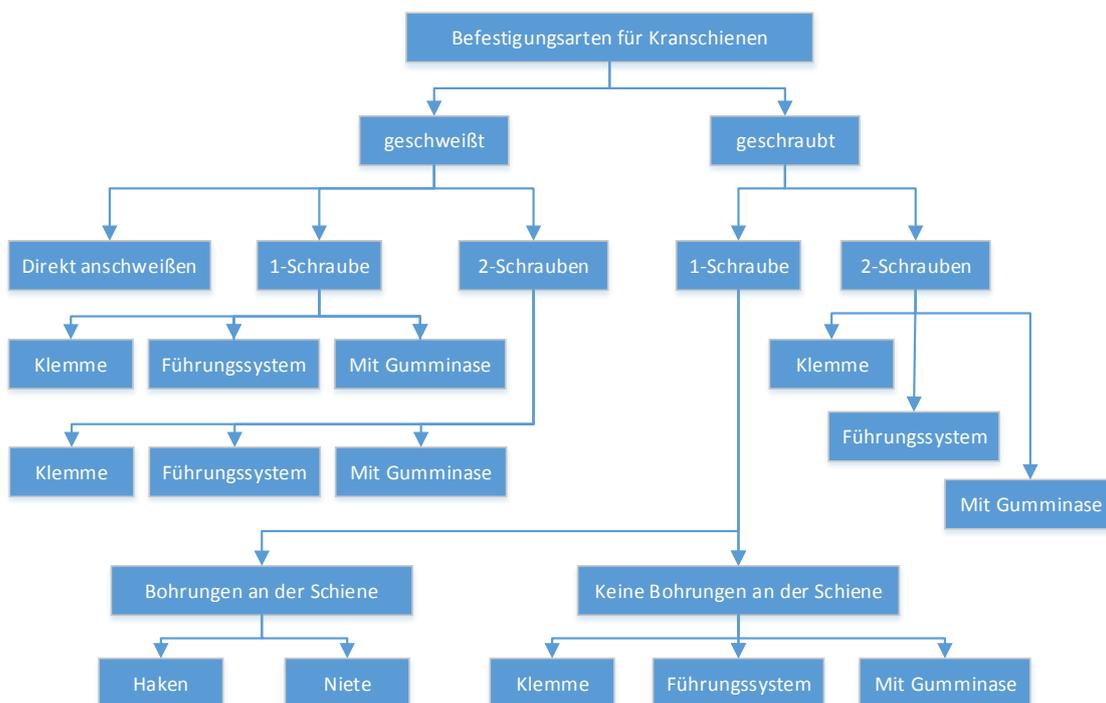
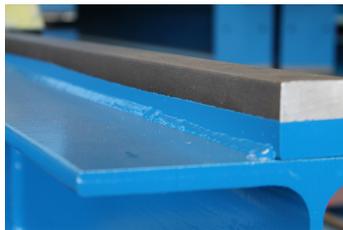


Abbildung 2.7: Befestigungsarten für Kranschienen.

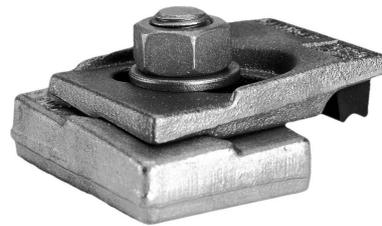
- Befestigungssysteme, die mit einem Exzenter oder Langloch ausgerüstet sind und eine seitliche Justierung der Befestigung ermöglichen (Abbildungen 2.8b und 2.8c).
- Einfache Befestigungssysteme, die mit einer Befestigungsschraube auf Stahl oder manchmal direkt auf Beton befestigt werden (Abbildung 2.8b).
- Doppelte Befestigungssysteme, die mit zwei Befestigungsschrauben montiert werden und die die doppelte Querkraft aufnehmen können.
- Einfache oder doppelte Befestigungssysteme zum Aufschweißen (Abbildung 2.8c).
- Einfache oder doppelte Systeme mit Elastomer, der auf dem Fuß anliegt (Abbildung 2.8c).
- Eine wechselseitige Anordnung eines gebogenen Drahtes (Englisch: Hook bolts oder J-Bolts), der mit dem Schienensteg verschraubt und am Obergurt der Kranbahnträgers eingehakt ist (Abbildung 2.8d).
- Eine kombinierte Lösung, bei der alternierend eine Knagge auf dem Kranbahnlängsträger neben dem Schienenfuß aufgeschweißt wurde, um die Querkräfte aufzunehmen und eine Befestigung zur Kippsicherung der Schiene.
- Die Schienen sind partiell oder durchgehend auf dem Kranbahnlängsträger aufgeschweißt (Abbildung 2.8a).
- Die Schienen sind auf den Kranbahnlängsträger mit Nieten befestigt (Abbildung 2.15c).

Im Gegensatz zu Schienenbefestigungen des Eisenbahnoberbaus sind klassische Kranschienenbefestigungen (z. B. Abbildung 2.8b-2.8d) nicht für die Aufnahme von Längskräften ausgelegt. Hierfür sind andere konstruktive Elemente, wie z. B. Festpunkte (siehe Abschnitt 2.1.3), erforderlich.

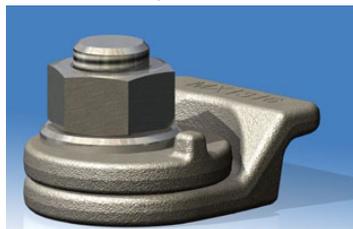
Aufgrund von Anbauten an Kranen, Spurkränzen und/oder seitlichen Führungsrollen, ist eine flache Konstruktion der Schienenbefestigungen notwendig.



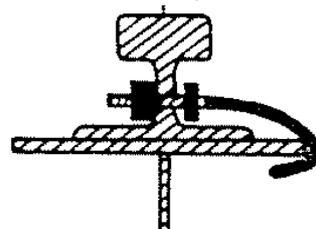
(a) aufgeschweißte Schiene (Lietmann GmbH & CO. KG, 2013).



(c) aufschweißbares Befestigungssystem mit Elastomer (MHE Demag S Pte Ltd., 2017).



(b) schraubbares Führungssystem (ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2010).



(d) J-Haken (Ódor, 1984).

Abbildung 2.8: Befestigungen für Kranschienen.

Zwischenlagen Zum Ausgleich von Unebenheiten, Reduzierung von Spannungsspitzen, Minimierung von Verschleiß und Korrosion, sowie zur Geräuschminimierung werden elastische Zwischenlagen zwischen Schienenfuß und Auflager eingesetzt.

Bei einer Lagerung auf Einzelstützpunkten (siehe Abschnitt 2.1.2) werden Zwischenlagen häufig aus einem Ethylen-Vinylacetat-Copolymer (EVAC) Material eingesetzt. Die Form soll verhindern, dass die Zwischenlage in Längsrichtung verrutscht. Dazu befinden sich zwei Wulste an der Zwischenlage (siehe Abbildung 2.9a). Bei einer kontinuierlichen, also durchgehenden Schienenlagerung, bei der ein

Befestigungssystem eingesetzt wird, wird in der Regel eine ebenfalls durchgehende Zwischenlage eingebaut. Meistens kommt dafür Material aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (auch Nitrilkautschuk genannt) oder das bereits erwähnte EVAC zum Einsatz. Die Zwischenlagen aus Nitrilkautschuk werden in der Regel mit einem eingearbeiteten Gewebe angeboten. Ein profilierter Querschnitt soll die Funktion optimieren (siehe Abbildung 2.9b).

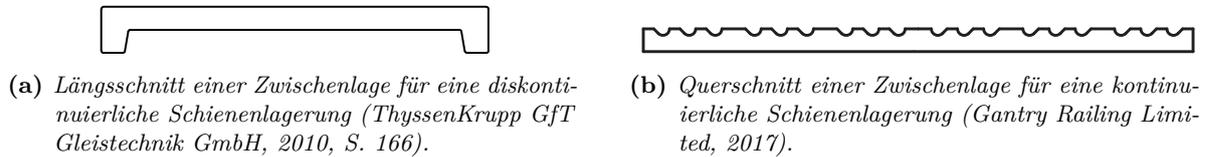


Abbildung 2.9: Zwischenlagen für diskontinuierliche und kontinuierliche Schienenlagerung.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, auf eine Zwischenlage zu verzichten oder eine Zwischenlage aus Stahl einzusetzen (Schleißlamelle). Aus Geräusch- und Verschleißgründen ist dies nicht empfehlenswert. Es kann jedoch andere Gründe geben, z. B. wenn Kranbahnen hohen Temperaturen ausgesetzt sind und Zwischenlagen schmelzen können.

2.1.3 Schienenstöße, Festpunkte, Endbegrenzer, An- und Einbauten

Schienenstöße Schienenstöße von Kranbahnen sind entweder nicht verschweißt, verschweißt oder durch Laschen miteinander verschraubt. Eine mögliche Ausführung des Schienenendes ist der sogenannte Stumpf- bzw. 90° Stoß (Abbildung 2.10a). Nicht verschweißte Stumpfstoße haben das Risiko von Ausbrüchen und Auswetzungen. Sie werden daher nur bei gering und wenig belasteten Anlagen eingesetzt (VDI 3576:2011-03, S. 12; Seeßelberg, 2005).

Sind Stöße nicht miteinander verschweißt, haben die Schienen häufig einen Schräg- (kleiner 45°, Abbildung 2.10c) oder Stufenstoß. Der Vorteil dabei ist, dass das Rad von der einen zur nächsten Schiene geführt wird und der Einfluss von Seitenstößen verringert wird. Der Nachteil ist, dass an diesen Stellen trotzdem Verschleiß auftritt (Thiele und Lohse, 1997, S. 130). Die EN 1993-6:2007-04, Kap. 8.6 empfiehlt als Mindestanforderung für Kranbahnträger diese Ausführung.

Der Stufenstoß (Abbildung 2.10b) ist in der Fertigung aufwändiger; er wird bei größeren zu erwartenden Längsausdehnungen, z. B. im Bereich von Dehnfugen, eingesetzt. Zur Verbesserung der Fahreigenschaften können die Enden, ähnlich dem Schrägstoß, schräg zur Schienenachse ausgebildet werden. Das Risiko von Ausbrüchen ist bei schweren Kranen im Endbereich groß (Seeßelberg, 2005).

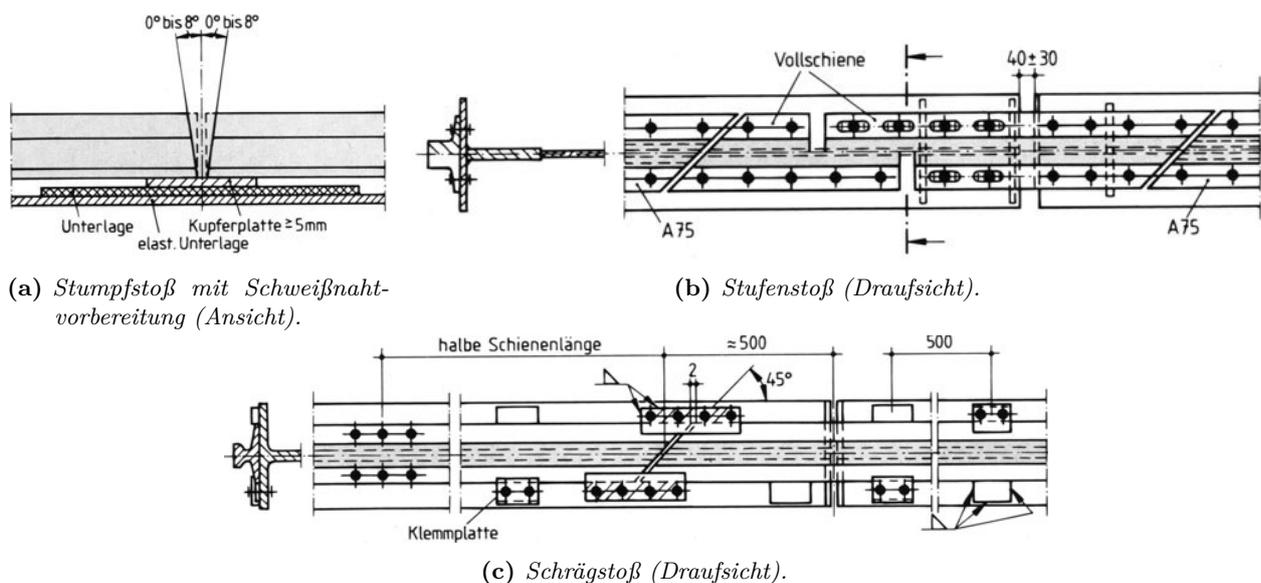


Abbildung 2.10: Schienenstöße (Thiele und Lohse, 1997, S. 129).

Bei Kranbahnen mit geringer Beanspruchung können nicht verschweißte Schienenstöße dennoch wirtschaftlich sein. Für gute Fahreigenschaften ist eine gute Seitenführung der Schiene im Stoßbereich erforderlich. Erreicht wird dies durch aufgeschweißte Knaggen oder Schienenbefestigungen (Seeßelberg, 2005; Thiele und Lohse, 1997, S. 130).

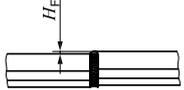
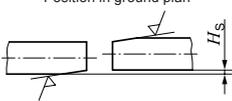
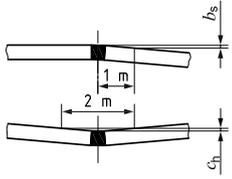
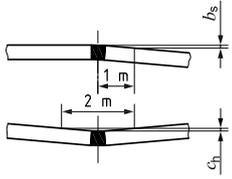
Optimale Fahreigenschaften werden mit durchgehend verschweißten Schienen erreicht, die Stand der Technik sind. Abbildung 2.10a zeigt die Schweißstoßvorbereitung eines Stumpfstoßes. Nach der Schweißung ist eine Bearbeitung des Stoßes, jedoch mindestens des Schienenkopfes, erforderlich. Die Verbindung von Schienen mit Laschen stellt einen Kompromiss zu einer teureren Schweißung dar. Ein weiterer Vorzug ist die einfache Lösung der Schraubverbindung, z. B. zum Austausch der Schiene (Abbildung 2.11). Bei klassischen Kranschienenprofilen, wie den A-Profilen (DIN 536-1), kann aufgrund der geringen Steghöhe keine Verbindung mittels Laschen hergestellt werden. Bei Kranbahngleisen, bei denen hochstegige Schienen eingebaut werden, ist der Einbau von Laschen möglich. Die DIN 5902:1995-11 legt Laschen für hochstegige Schienen fest.



Abbildung 2.11: Durch Laschen verbundene Schienen (Reinmuth, 2013).

Nachfolgend werden Kriterien für die geometrische Abnahme von Schienenschweißungen bei der Deutschen Bahn AG, für Regalbediengeräte und für Krananlagen aufgeführt.

In der ISO 12488-1, S. 16:2012-07 stellt Tabelle 6 die geometrischen Abnahmekriterien für Kranschienenstößen dar.

Symbol	Description	Tolerance parameter		Tolerance All classes	Unit
			Graphical representation		
H_F	Vertical offset of the welded joint at the rail flange	H_F to be removed by finish grinding		0 (for welding in production) 1 max. (for welding on site)	mm
H_S	Horizontal offset of the rail head	Position in ground plan		1 max., with a taper of 1:50 to blend the offset	mm
b_s	Inclination of rail in ground plan b_s and height c_h (lateral slope) with angularity symbol \sphericalangle	Unevenness near joint welding shall be trued up at the rail head by grinding without notches		2	mm
c_h	Tolerances b_s and c_h related to a test length of 1 m			2	mm
H_X	Flatness after grinding the trued-up area of H_S No finishing required at the rail end joint near the rail fastening for a staggered rail end joint		—	0,5 max.	mm

Detachable rail joints shall be in accordance with this table.

Abbildung 2.12: Abnahmekriterien für Kranschienenstöße (ISO 12488-1:2012-07, S. 16, Tabelle 6).

In der zurückgezogenen DIN 4132:1981-02 lauteten die Vorgaben wie folgt: Sowohl für die Lage als auch die Höhe, sollen merkbare Versätze an Schienenstößen z. B. durch Schleifen unter Einhaltung der Grenzwerte angeglichen werden. Ein Stichmaß von in der Lage 1 mm, bzw. 0,5 mm bei Verwendung von beidseitigen Führungsrollen und in der Höhe 2 mm darf auf einer Messlänge von 2 m an keiner Stelle überschritten werden.

Für die geometrische Prüfung von Verbindungsschweißungen schreiben die DIN EN 14730-2:2006-10 und die RIL 824.8210 der Deutschen Bahn AG Messmittel vor (Wegner und Damm, 2015). Verwendet werden kann ein 1000 mm langes Stahllineal nach DIN 874-1:2003-11 mit dem Genauigkeitsgrad 2. Abweichungen werden durch Fühllehren oder Messkeile (Neigung 1:20 oder flacher) festgestellt. Das Lineal wird bei dem Messvorgang mittig der Schweißung aufgelegt (Köstermann et al., 2008).

Alternativ können elektronische Lineale für die Messung verwendet werden. Diese Lineale haben im Bereich der Enden Abstandshalter, so dass der Messhorizont ungefähr parallel zu der Messfläche liegt. Der Messhorizont ist dadurch anders definiert als beim Stahllineal. Bei einer „spitz“ liegenden Schweißung (siehe Abbildung 2.13b) liegt das Stahllineal tangential auf einer Schiene (Köstermann et al., 2008).

In Köstermann et al. (2008) findet sich eine für die Durchführung der Abnahmemessung interessante Erläuterung für drei Zustände der Schienenlängsgeometrie bei Schweißverbindungen:

- Die Schweißverbindung ist geometrisch ohne Abweichungen. Das Lineal liegt durchgehend auf.
- Das Lineal „reitet“ auf der Schweißung. Diese Art der Schweißverbindung wird als „spitz“ bezeichnet (Abbildung 2.13b).
- Das Lineal liegt auf den Schienenenden auf. In der Mitte lässt sich eine „Senke“ feststellen (Abbildung 2.13c).

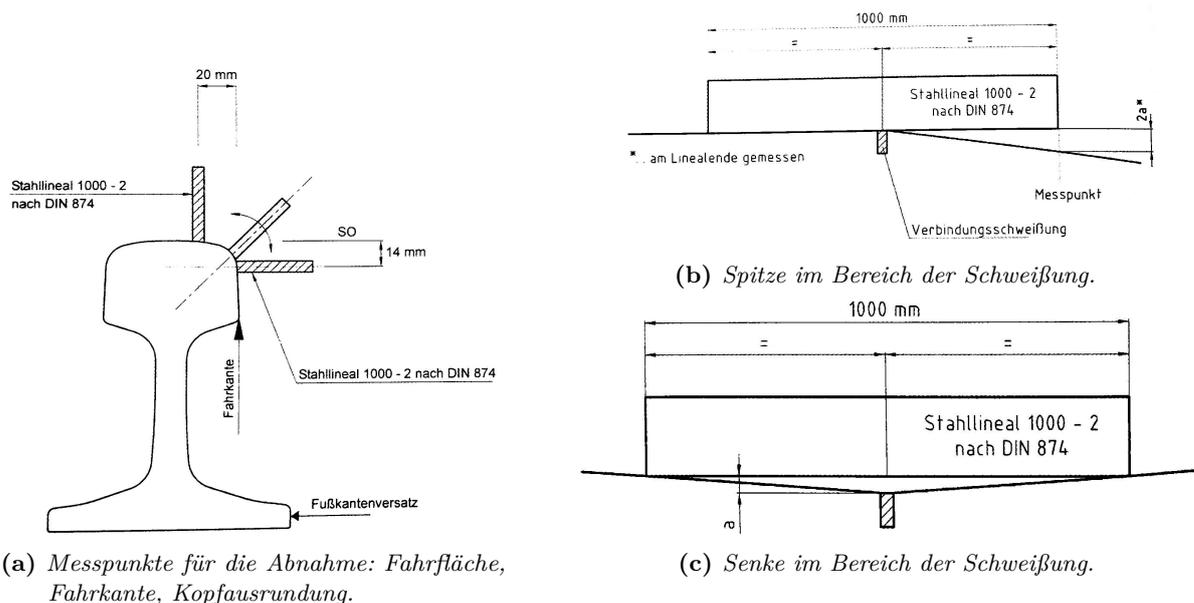


Abbildung 2.13: Durchführung einer geometrischen Abnahmemessung (Köstermann et al., 2008, S. 106).

DIN EN 14730-2:2006-10 und DB RIL 824.8210 legen unabhängig vom Schweißverfahren die geometrischen Abnahmekriterien für die Verbindungsschweißungen an Schienen fest (Tabelle 2.2).

Die für Regalbediengeräte relevante Richtlinie FEM 9.831:1995-02 legt die Toleranzen für die Stöße in Lage und Höhe fest. Für die Schienenkopfsseitenflächen ist eine Ebenheit von $\leq 0,5$ mm auf eine Länge von 200 mm gefordert. Für die Fahrfläche $\leq 0,1$ mm auf eine Länge von 100 mm.

Für die Prüfung nicht sichtbarer Fehler, also im Inneren der Schweißung, kommt üblicherweise die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) mittels Ultraschall zur Anwendung. Köstermann et al. (2008) schreiben, dass Infrastrukturunternehmen einen Grenzwert selber festlegen, jedoch üblicherweise bei

einem Fehler größer 5 mm die Schweißung ausgebaut und erneuert wird.

Tabelle 2.2: Geometrische Abnahmekriterien für Schienenverbindungsschweißungen (Wegner und Damm, 2015).

1	2	3	4	
			Radiusbereich	
Geschwindigkeitskategorie (km/h)	$v \leq 230$	$v > 230$	$v \leq 230$	$v > 230$
Abnahmetoleranz „a“ [mm]				
\wedge Fahrfläche, Spitze	0,3	0,2	Radiusbereiche müssen eventuell geprüft werden. SRQ Lehre kann hierfür verwendet werden ...	
\vee Fahrfläche, Senke	0,2	0,1		
$>$ Fahrkante, Knick nach aussen	0,3	0,1		
$>$ Fahrkante, Knick nach innen	0,2	0,1		
$<>$ Fußkante, horizontal	2			
Max. Länge des Schleifspiegels	600 mm	600 mm		

Festpunkte Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, sind die Schienenbefestigungen bei Kranbahnen nicht für die Aufnahme von Längskräften ausgelegt. Das Wandern der Schienen muss dennoch verhindert werden (VDI 3576:2011-03, S.19; Thiele und Lohse, 1997, S. 128). Bei nicht verschweißten Schienen einer Kranbahn wird die einzelne Schiene in der Regel in der Mitte des Kranbahnträgers fixiert (siehe Abbildung 2.10c), so dass die Enden sich in beide Richtungen ausdehnen können.

Verschweißte Schienenstränge können durch auf dem Kranbahnträger aufgeschweißte Knaggen am Anfang und Ende des Schienenstrangs in ihrer Bewegung eingeschränkt werden (Thiele und Lohse, 1997, S. 128).

Für Kranbahnträger, auf denen Schienen als Rechteckprofile direkt aufgeschweißt sind, muss ein Festpunkt vorgesehen werden, der die Brems- und Anprallkräfte des Krans aufnehmen kann (VEB Metalleichtbaukombinat, 1973, Blatt 1, S. 27).

Endbegrenzer Kranbahnbegrenzer, auch Endanschläge genannt, stehen in der Regel an den Enden einer Kranbahn und begrenzen den Fahrweg des Krans. Im Fall von partiellen Instandhaltungsarbeiten, können Bereiche einer Kranbahn durch mobile Begrenzer abgesperrt werden. Die Anprallflächen von Kranbahnbegrenzern sollen, soweit aus technischen Gründen nicht anders erforderlich, in Längsrichtung parallel zueinander montiert sein. Es soll vermieden werden, dass es bei einem Anprall eines Krans mit den Kranbahnbegrenzern zu einer Verschränkung des Kranfahrwerks kommt. Bei der Anfahrt sollen hohe Schräglaufrkräfte aufgrund einer Verschränkung verhindert werden.

Die Richtlinien (z. B. VDI 3576 (2011)) sehen für die Parallelität eine eigene Zustandsgröße vor (Abbildung 2.14).

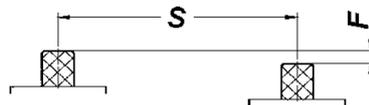


Abbildung 2.14: Toleranz „F“ für die Parallelität der Endanschläge (VDI 3576:2011-03). Die Abbildung zeigt eine Draufsicht.

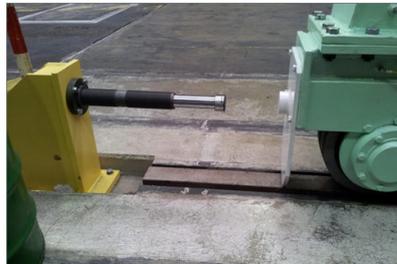
Es gibt viele Bauarten von Kranbahnbegrenzern (Abbildung 2.15). Die Wahl hängt von Faktoren wie z. B. dem Kran, der Beanspruchung und den Befestigungsmöglichkeiten ab. Nachfolgend werden Merkmale aufgeführt:

- Anprallkörper
 - Zellstoff- oder Gummipuffer (z. B. Abbildung 2.15a)

- Hydraulikzylinder (z. B. Abbildung 2.15b)
- Prallblech (z. B. Abbildung 2.15c)
- Befestigungsart
 - auf die Schiene geklemmt (z. B. Abbildung 2.15a)
 - mit der Schiene verschraubt
 - auf dem Kranbahnträger oder einem Fundament verankert (z. B. Abbildungen 2.15a und 2.15b)



(a) Begrenzer mit Gummipuffer; auf der Schiene geklemmt (SM-Schientechnik GmbH (2017)).



(b) Begrenzer mit Hydraulikzylinder; auf einem Fundament verankert (Sinner Stahl- und Industriebauten GmbH (2013)).



(c) Begrenzer mit Prallblech; auf dem Kranbahnträger verankert.

Abbildung 2.15: Verschiedene Kranbahnbegrenzer.

An- und Einbauten In unmittelbarer Nähe der Kranschiene können sich An- und Einbauten befinden. Dies können z. B. Laufstege (neben, ober- oder unterhalb der Kranbahn), Stromführungsschienen, Transponder oder Gitterroste sein. Zum Schutz von Menschenleben gelten Sicherheitsabstände, die in DIN EN ISO 13857:2008-06 festgelegt sind. Im unmittelbaren Bereich der Schiene muss immer Platz für die Kranlaufräder mit ggf. seinen Spurkränzen oder Spurführungsrollen sein.

2.1.4 Schienengebundene Krane

Bargstädt und Steinmetzger (2008) beschreiben die Hebezeuge als die wichtigste Gruppe der Arbeitsmittel für den Montageprozess. Scheffler et al. (1998) untergliedern schienengebundene Krane in vier Hauptbauarten: Brückenkran, Portalkran, Kabelkran, Ausleger-(Dreh-)kran (Abbildung 2.16):

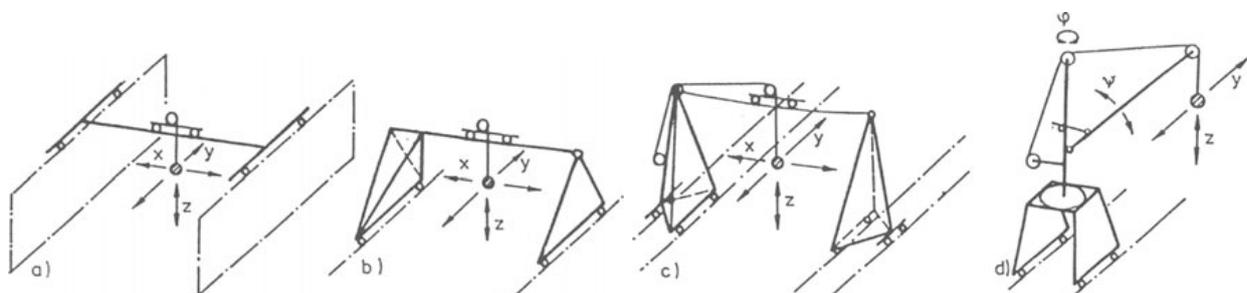


Abbildung 2.16: Brückenkran, Portalkran, Kabelkran und Drehkran (Scheffler et al., 1998).

Nach der DIN EN 15011:2014-09 ist der Brückenkran (Abbildung 2.17a) „ein Kran mit mindestens einem horizontalen Hauptträger, der sich auf den Schienen entlang bewegt und auf dem mindestens ein Hebezeug angebracht ist.“ Die DIN 15001-1:1973-11 beschreibt weiter, dass er „ein auf hochgelegenen Kranbahnen fahrbarer Kran in Brückenkonstruktion“ ist.

Als Sonderform des Brückenkranes beschreiben Koop und Hesse (2010, S. 9 f.) den Deckenlaufkran (Abbildung 2.17d) als einen „Brückenkran, dessen Laufschienen am Dach oder an der Deckenkon-

struktion hängend angeordnet sind.“ Hingegen beschreiben sie Hängekrane als „Brückenkran, deren Fahrbahnen fest oder pendelnd aufgehängt sind.“

Gemäß der DIN EN 15011:2014-09 ist ein Portalkran (Abbildung 2.17c) „ein Kran mit mindestens einem horizontalen Hauptträger, der von mindestens einer Stütze getragen wird, der sich auf Rädern bewegt und auf dem mindestens ein Hebezeug angebracht ist.“

„Der Konsolkran oder Wandlaufkran [Abbildung 2.17b] ist ein auf übereinander angeordneten Kranbahnen fahrbarer Kran.“ (Koop und Hesse, 2010, S. 10). Er wurde eingeführt, um die teureren Brückenkranen im betrieblichen Ablauf zu entlasten. Die Besonderheit dieser Krane ist, dass die untere Laufrolle auf einer gewöhnlichen Kranbahn fährt. Am oberen Ende stützen sich Rollen gegen eine andere Fahrbahn so ab, dass der Kran nicht umkippt (Osann, 2013, S. 498).

Die „Katz“ ist die auf oder an den Schienen der Kranträger verfahrbare Konstruktion, die das Hubwerk aufnimmt.“ (Koop und Hesse, 2010, S. 10).



(a) Zweiträgerlaufkran (ABUS Kransysteme GmbH, 2017c).



(b) Wandlaufkran (ABUS Kransysteme GmbH, 2017b).



(c) Portalkran (Deutsche Bahn AG, 2017).



(d) Deckenlaufkran (ABUS Kransysteme GmbH, 2017a).

Abbildung 2.17: Zweiträgerlaufkran, Portalkran, Wandlaufkran und Deckenlaufkran.

Die bereits zitierte DIN 15001-1 befasst sich mit den verschiedenen Kranen, Begriffen und teilt die Krane nach ihrer Verwendung ein.

2.2 Rechtlicher Rahmen, Richtlinien und klassische Zustandsgrößen

2.2.1 Rechtlicher Rahmen

Das Produktsicherheitsgesetz verpflichtet Hersteller und Importeure, nur solche Arbeitsmittel, Maschinen und Werkzeuge in den Verkehr zu bringen, die europäischen oder deutschen Schutzvorschriften entsprechen. Der wirksame Schutz vor Unfallgefahren ist das Ziel. Waren, die diese Eigenschaften erfüllen erhalten das GS-Zeichen. Das Produktsicherheitsgesetz ist die nationale Umsetzung der EU-Marktüberwachungsverordnung 2019/1020 (Verordnung (EU) 2019/1020, 2019).

Die Sicherheitsziele und grundlegenden Anforderungen der Maschinenverordnung (EU) 2023/1230 (Verordnung (EU) 2023/1230, 2023) müssen immer erfüllt werden. Sie sind als Bestandteil der Maschinenverordnung gesetzlich festgelegt und stellen rechtsverbindliche Mindestanforderungen dar.

Die Betriebssicherheitsverordnung ist eine Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Benutzung von Arbeitsmitteln bei der Arbeit, die in Verbindung mit dem Arbeitsschutzgesetz die Richtlinie 89/391/EWG und Richtlinie 91/383/EWG in nationales Recht umsetzt.

Die Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM, 2022) stellt die Gesetze, Verordnungen, technischen Regeln, BG-Vorschriften und Regeln in Zusammenhang mit Kranen und Hebezeugen bereit. Die Regelungen zur Prüfung von Krananlagen fallen auf europäischer Ebene unter die „Maschinenverordnung“ (EU) 2023/1230. Auf nationaler Ebene erfolgen die Prüfungen in Deutschland nach der Betriebssicherheitsverordnung (Bundesregierung, 2015) und der Vorschrift 52 (DGUV Vorschrift 52, 2001) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV). Die DGUV V 52 gilt für Krane einschließlich ihrer Tragkonstruktion (z. B. Kranbahnen und Kranbahnfundamente (DGUV Vorschrift 53, 2001)) und Ausrüstung. §25 dieser Vorschrift legt die Prüfung vor der ersten Inbetriebnahme und nach wesentlichen Änderungen fest. §26 verlangt wiederkehrende Prüfungen, die jährlich durch einen Sachkundigen durchzuführen sind. Neben der DGUV V 52 gelten außerdem die weiteren Vorschriften, Regeln oder Grundsätze, Informationen und Rundschreiben der DGUV. Sie werden durch die Berufsgenossenschaften (BG), die Mitglieder der DGUV sind, übernommen. Der für die BG als Regel geltende DGUV Grundsatz 309-001 (DGUV Grundsatz 309-001, 2012) legt den Prüfumfang von Krananlagen fest. Bei einer nicht ausreichenden Beurteilungsmöglichkeit durch eine Sicht- und Funktionsprüfung wird gefordert, weitere Prüfungen vorzunehmen.

2.2.2 Richtlinien

Die Anwendung einer Richtlinie, z. B. die VDI 3576 mit den Verlegetoleranzen für (Kran-)schielen, ist im Idealfall das Ergebnis einer Einigung zwischen Auftraggeber, Kranlieferanten und Kranbahnbauer. Sie kann auch im Rahmen einer Ausschreibung erfolgen, in der die ausschreibende Stelle eine Richtlinie und die anzuwendende Toleranzklasse vorgibt. Für den Betreiber ist es relevant, dass eine Richtlinie und eine Toleranzklasse festgelegt wurden, auf die er sich später beziehen kann. Der Kran- und der Kranbahnbauer müssen die Forderungen technisch umsetzen können. Die Richtlinie kann als kleinster gemeinsamer Nenner betrachtet werden.

Richtlinie und Toleranzklasse sind sinnvoll zu wählen und haben wirtschaftliche Konsequenzen. Enge Toleranzen und in Abhängigkeit davon, präzise gebaute Krane und Kranbahnen gehen einher mit höheren Kosten. Die Anforderung an die Instandhaltung, den gewählten Standard zu gewährleisten, steigen ebenfalls. Eine Auswahl verschiedener nationaler und internationaler Richtlinien zeigt Abbildung 2.18.

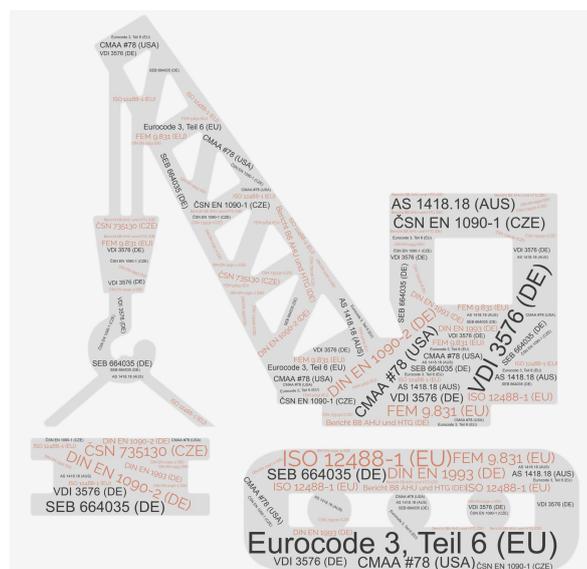


Abbildung 2.18: Wortwolke diverser nationaler und internationaler Richtlinien mit Toleranzvorgaben für die Geometrie von schienengebundenen Anlagen.

2.2.3 Klassische Zustandsgrößen

Die klassischen Zustandsgrößen im Bezug auf Kranbahnen ermöglichen im Wesentlichen die Beschreibung der geometrischen Lage von Schienen im Raum. Die Richtlinien oder Normen gehen von dem Standardfall aus, nämlich dass Schienen gerade und in einer Ebene verlegt sind. Die nachfolgenden aufgeführten und dargestellten Zustandsgrößen sind in der VDI 3576:2011-03, der ISO 12488-1:2012-07 und in gleicher oder ähnlicher Form in vielen weiteren aufgeführt (Abbildung 2.19). Bei anderen als den beiden hier genannten, kann es Unterschiede bei der Anzahl der Toleranzklassen und den Werten der Toleranzen geben.

Spurmittenmaß (S) Das Spurmittenmaß S mit der Toleranz A ist der Abstand von Mitte Schienenkopf bis Mitte Schienenkopf. Über- oder Unterschreitungen führen zu Zwängungen, erhöhtem Verschleiß oder Entgleisungen.

Lage einer Schiene Die Lage einer Schiene im Grundriss wird mit den Toleranzmaßen B und b bewertet. B berücksichtigt die Abweichungen auf der Gesamtlänge des Profilstrangs. b ist auf eine 2 m Basis beschränkt.

Höhenlage einer Schiene Für die Bewertung der Höhenlage (Z-Wert) einer Schiene gibt es ebenfalls zwei Toleranzmaße. C wird auf die gesamte Länge des Profilstrangs angewendet und c wieder auf eine 2 m Basis.

Parallelität der Endschläge Die Toleranz F ermöglicht eine Bewertung des Versatzes der Endanschläge in Längsrichtung der Fahrbahn. Je größer der Versatz ist, umso größer ist die Verwindung des Fahrwerks beim Auffahren.

Schiefstellung der Schiene Fahrfläche und Laufradfläche sollen parallel zueinander ausgerichtet sein, um eine Kantenpressung und folglich Verschleiß zu verhindern. Gemessen werden muss demnach die Schienenkopfeigung. Die Toleranz G legt die Grenze für Abweichungen fest.

Parallelität der Schienen-Y-Achse zu dem Steg des Trägers Ist eine Schiene auf einem Doppel-T-Träger montiert, sollen beide Achsen übereinander liegen, sodass die Last mittig eingeleitet wird. Abweichungen werden durch die Toleranz K eingeschränkt.

Neigungsdifferenz gegenüberliegender Schienen (Schränkung) Zur Vermeidung von Spannungen bei statisch unbestimmten Konstruktionen durch wechselnd undefiniert erhöhte Radlasten, limitiert die Toleranz Δhr die Schränkung der Schienen.

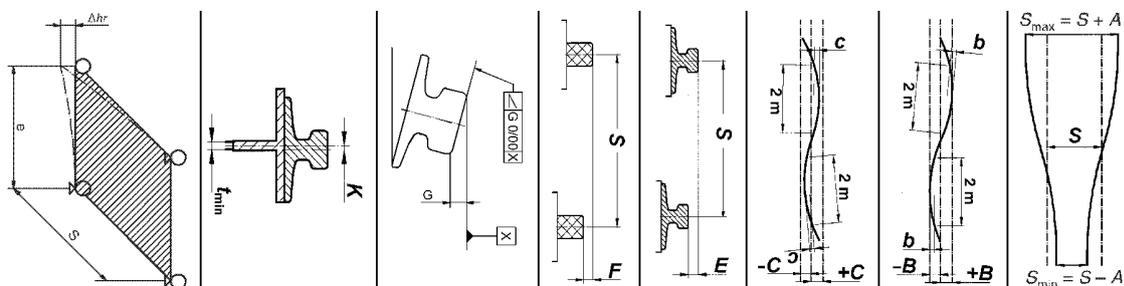


Abbildung 2.19: Darstellung von Zustandsgrößen (VDI 3576, 2011).

2.2.4 Kritische Betrachtung

Aufgrund von Harmonisierungen von Gesetzen auf europäischer Ebene besteht das Risiko, dass vorherige nationale Gesetze und Regelungen aufgeweicht werden können. Eine Prüfung von Anlagen, bzw. ein Nachweis von „Fahrlässigkeit“ kann dann schwieriger werden. Andererseits eröffnet die Technologisierung und Automatisierung neue Lösungen. Schließlich besteht das Risiko, dass Unternehmen aufgrund von Fachkräftemangel Erfahrung bzw. Wissen fehlt. Bewertungen von Zuständen der Anlagen auf Grundlage von Normen und Richtlinien erfolgen aufgrund von Erfahrungen. Diese wiederum kann an verschiedenen Standorten unterschiedlich sein. Letztlich werden Entscheidungen auf Basis von subjektiven Informationen getroffen.

Mit umfangreichere Sensorik ist es deutlich einfacher Ist-Zustände zu erfassen. Durch überarbeitete und um zusätzliche Zustandsgrößen, wie z. B. der Zustand von Schiene oder Befestigung, ergänzte Richtlinien ist anschließend eine wesentlich objektivere Bewertung des Zustands von Anlagen wie z. B. Kranbahnen möglich.

Die Überprüfung des gesamten Gleiskörpers ist im Bereich der Eisenbahnen schon länger Stand der Technik. Zum Einsatz kommen Gleismesszüge, Trolleys und UAVs (Auer, 2014; Cabrera, 2009; Lichtberger, 2009). Die Anforderungen an ein Messsystem und die Zustandsgrößen sind bei der Befahrung eines einzelnen Schienenstrangs andere. So muss das Messfahrzeug kleiner sein und sich an verschiedene Profiltiefen anpassen können.

Mit den Möglichkeiten von reproduzierbaren und umfassenden Messsystemen ergibt sich auch die Option Anlagen in regelmäßigen Abständen zu inspizieren und die Zustände zu erfassen. Mit zunehmender Erfahrung ist eine Prognose über die Abnutzung möglich und in dem Sinne eine vorausschauende Instandhaltung planbar (Veit, 2006; Zaayman, 2013).

2.3 Vermessung von Schienenanlagen der Intralogistik

Das klassische Verfahren zur Vermessung einer Kranbahn besteht aus dem Abstecken einer Fluchtlinie mittels Theodolit, dem sogenannten Alignment, und einem geometrischen Nivellement. Bisherige Vermessungen von Kranbahnen haben daher in der Regel die Bestimmung der Lage und Z-Werte der Schiene zum Ziel. Daraus können Zustandsgrößen ermittelt werden, die in Richtlinien definiert sind (siehe 2.2.2).

2.3.1 Koordinatensystem

Das Koordinatensystem für Kranbahnen ist für ein Gleis so definiert, dass die Messwerte die entgegengesetzt der Gleismitte gerichtet sind, ein positives Vorzeichen haben und die, die in Gleismitte zeigen, ein negatives. Abbildung 2.20 veranschaulicht das Prinzip.

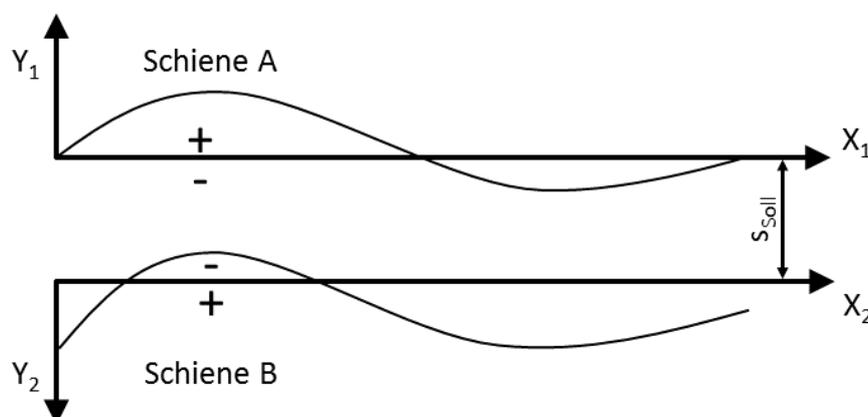


Abbildung 2.20: Koordinatensystem eines Zweischienensystems.

Der Ursprung des Koordinatensystems der gemessenen Punkte befindet sich im ersten gemessenen Referenzpunkt. Die erste X-Achse (X_1) zeigt in die Richtung des letzten Messpunktes. Die Y- und Z-Achse sind linksläufig (Mathematisches System). Die Y-Achse verläuft horizontal und die Z-Achse lotrecht. In einem mathematischen System ist dies bei ermittelten Koordinaten eines Messpunktes direkt gegeben. Die Z-Werte werden so umgerechnet, dass die größte Abweichung den Wert Null annimmt. Dies erfolgt, da allgemein die Kranbahnen für Justierungen nur gehoben werden können. Das Koordinatensystem gilt für Einschienensysteme und die Schiene X_1 eines Zweischienensystems. Die Schiene X_2 hat eine gleich verlaufende, um das Spurmittenmaß parallel versetzte, X-Achse. Die Y- und Z-Achse sind hier jedoch rechtsläufig. Messpunkte mit einer Lage zur Mitte der Schienen haben negative Y-Koordinaten. Die Vermessung muss vor der ersten Inbetriebnahme der Krananlage stattfinden. Sie stellt den Ursprungszustand einer Kranbahn dar und wird als Nullmessung bezeichnet. Spätere Messungen dienen dem Vergleich bei auftretenden Deformationen.

Die Oberfläche der Erde lässt sich aufgrund ihrer Krümmung nicht verzerrungsfrei auf einer Ebene darstellen. Der Einfluss vergrößert sich nichtlinear mit dem Umfang des dargestellten Gebietes. Δz kann als Einfluss der Erdkrümmung gemäß Formel 2.1 für jeden Z-Wert eines Messwertes berücksichtigt werden:

$$\Delta z = (1 - k) \cdot \frac{D^2}{2 \cdot R}. \quad (2.1)$$

In der Formel ist k der Refraktionskoeffizient, der im Mittel mit $k = 0,13$ anzusetzen ist sowie D die Strecke zum beobachteten Punkt. R ist der mittlere Erdradius, für den ein Wert von 6378 km angenommen wird. Beispielsweise beträgt δz bei 100 m 0,8 mm. Bei 1000 m sind es bereits 8 cm.

Die trigonometrische Punktbestimmung, z. B. mit einem Tachymeter oder Lasertracker, liefert Messwerte in einem kartesischen Koordinatensystem. Vorausgesetzt, der Ursprung des kartesischen Systems ist am Anfang z. B. einer ein Kilometer langen Kranbahn, könnte der Kran am Ende der Kranbahn aufgrund des Gefälles und unter Vernachlässigung von Reibbeiwerten, ins Rollen kommen. Vereinfacht gesagt, würde Wasser bei gleichen Höhen fließen. Eine Korrektur der Höhen ist anzubringen, wobei der Einfluss bei kurzen Kranbahnen gering ist.

Höhenübertragungen, die mit einem geometrischen Nivellement durchgeführt werden, sind Geoid basierend. Unter Berücksichtigung des Einflusses der Erdschwere liefert dieses Verfahren Ergebnisse, in denen es keine Abweichungen von der Erdkrümmung gibt. Bei vereinfachter Betrachtungsweise, kann angenommen werden, das Wasser bei gleichen Höhen nicht fließt.

Streng genommen ist für die Schienenanlage eine physikalische Höhe anzunehmen. Dies bedeutet eine Korrektur der Lasertrackerdaten im wesentlichen um die Erdkrümmung. Da jedoch der Unterschied zwischen einer physikalischen Höhe und einem lokalen kartesischen Koordinatensystem aufgrund der geringen Entfernungen bei den Untersuchungen in dieser Arbeit nicht signifikant sind, wird im Folgenden der Übersicht halber, ein kartesisches Koordinatensystem verwendet. Auf den hier maximalen Entfernungen von 50 m beträgt der Einfluss bis zu 0,2 mm.

Die Messung hat das Ziel, die Lage und Z-Werte der Schienenanlage zu kontrollieren und falls erforderlich als Grundlage für eine Justage der Anlage zu dienen. Nach Klewin gibt es drei Möglichkeiten, die Abweichungen zu einer Referenz zu berechnen (Klewin, 1965):

1. Abweichungen zu den Soll-Achsen in einem übergeordneten Koordinatensystem. Die Abweichungen können sehr groß ausfallen, wobei sie den Betrieb und die Standzeit der Anlage nicht beeinflussen. Die Richtarbeiten sind aufwändig und mit entsprechenden Kosten verbunden.
2. Nach der Messung wird das Bezugssystem der Lagewerte geändert. Eine Achse, auf die sich alle seitlichen Abweichungen der Messpunkte beziehen, wird so gedreht, dass sie durch den ersten und letzten Messpunkt der Schiene verläuft. Dies erfolgt aufgrund der in der Regel geringeren Beanspruchung an den Enden der Kranbahn. Somit wird der Y-Wert von Anfangs- und Endpunkt Null gesetzt. Wenn die Annahme falsch ist, können die Abweichungen hoch ausfallen, was wiederum mit aufwändigen Richtarbeiten verbunden ist.
3. Bei der dritten Variante werden die Abweichungen beider Achsen in einer Ausgleichung mini-

miert. Toleranzüberschreitungen fallen bei dieser Variante minimal aus. Die Richtarbeiten sind folglich ebenfalls mit dem geringsten Aufwand verbunden. Klewin schlägt einen Lösungsweg vor, der heute sehr einfach zu programmieren ist.

2.3.2 Vermessung mit Theodolit, Bandmaß und Nivellier

Mönch (1954) macht Vorschläge zur Optimierung der Abnahmevermessung eines 10 m hohen Brückenkranbahngleises. Durch die Vermessung vom Hallenboden aus reduzieren sich das Unfallrisiko für den Vermesser und Schaden an der Ausrüstung. Durch Befestigung einer Klemmvorrichtung an der Kranbahnschiene kann ein Bandmaß an der Oberkante des Schienenkopfes ausgerichtet, und mit einem Gewicht beschwert, herunterhängen. Mönch merkt an, dass „ruhiges Wetter“ Voraussetzung für dieses Verfahren ist. Mit direktem Anschluss an ein übergeordnetes Höhennetz können die Z-Werte kontrolliert werden. Die Kontrolle erfolgt im Bereich der Stützen. Kommt es zu Abweichungen, kann die Stütze unmittelbar in der Z-Werte korrigiert werden.

Die Kontrolle der Lage erfolgt ebenfalls jeweils im Bereich der Stützen. Der Theodolit steht dafür am Ende einer Längsachse. An einer horizontal aufgehaltene Latte wird der Sollwert kontrolliert und ggf. die Stütze nachjustiert. Durch vertikales Kippen des Fernrohrs muss die Lotrichtung der Stützen kontrolliert werden. Mönch schreibt, dass durch dieses Vorgehen eine Genauigkeit von ± 3 mm erreicht werden kann und damit besser als die geforderte Genauigkeit von ± 5 mm ist.

Drake (1957) benennt die Anforderung an die Vermessung für die Absteckung einer neuen Kranbahn mit ± 2 mm in Lage und Z-Wert. Parallele Achsen werden angelegt, von denen mindestens die Enden mit einem Theodolit rechtwinklig abgesetzt werden. Die Stützen müssen ebenfalls mit einem Theodolit eingelotet und im Z-Wert mit einem Nivellier überprüft werden.

Er beschreibt weiterhin die Situation bei einer vorhandenen, mehrere Jahrzehnte im Betrieb befindlichen Kranbahn. Häufig treten ungleichmäßige und große Setzungen aufgrund zunehmender Belastungen auf. Die Kranbahnen verändern ihre Lage und Z-Werte. Die Folge sind starker Verschleiß an den Spurkränzen der Kranräder und hohe Reparaturkosten. Höhenbolzen an den Stützen, ermöglichen eine Kontrolle der Setzungen ohne größeren Aufwand.

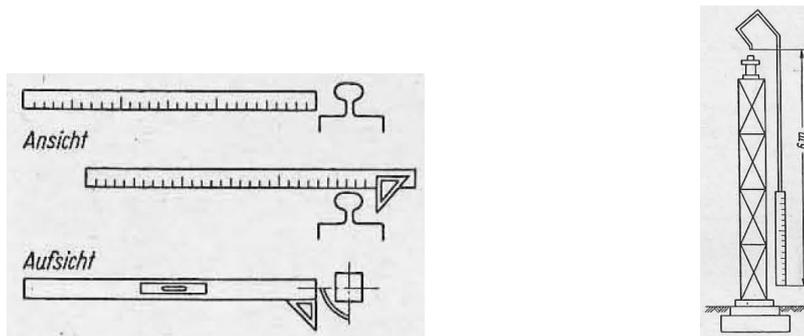
Drake empfiehlt die Herstellung von parallelen Achsen auf dem Hallenboden und neben den Schienen. Von dort können die Maße einfach festgelegt werden. Aufgrund des Sicherheitsrisikos beim Bewegen entlang der Schienen, erfolgen die Aufmaße im Bereich der Stützen von Leitern aus. Ist die Halle zugestellt, erfolgt die Messung von der Mitte aus über Feinpolygonzüge oder Dreiecksketten.

Während der Messung muss absolute Schwingungsfreiheit herrschen. Vermessungen werden daher häufig am Wochenende durchgeführt oder parallel zu Kranreparaturen. Messungen während Pausen sind möglich, jedoch brauchen die Schwingungen der Gebäude und selbst der Hallenboden Zeit zum Abklingen. Muss eine Vermessung bei laufendem Betrieb erfolgen, kann sich die erreichbare Genauigkeit auf ± 10 mm verschlechtern. Für die Sichten und Refraktionsbedingungen sind heiße Dämpfe, bzw. Heißluftbildung hinderlich.

Was heute mit Betriebstoleranzen bezeichnet wird (VDI 3576), beschreibt Drake als einen für den Kranbetrieb tolerierbaren Bereich zwischen $\pm 1,5$ ‰ und ± 5 ‰ der Spurweite. Bei 20 m sind das zwischen ± 30 mm und ± 100 mm. Als zulässigen Bereich für eine Neuanlage nennt er einen Wert von ± 1 ‰. Es werden nicht genügend Angaben gemacht, um auf eine Toleranzklasse schließen zu können, so wie sie z. B. in der VDI 3576 definiert werden.

Die von Mönch benannte Klemmvorrichtung zur Vereinfachung der Übertragung der Achsen wird von Drake als Maßstab mit Winkeln und Libelle durch eine Abbildung beschrieben (Abbildung 2.21a). Diese kann je nach Abnutzungszustand auf der Innen- oder Außenseite des Schienenkopfes angelegt werden.

Die Abnutzung der Schiene muss dokumentiert werden. Die Angaben werden im Rahmen von größeren Reparaturmaßnahmen für die neue Berechnung der Spurweiten verwendet. Auf diesen Punkt wird in Abschnitt 4.1 weiter eingegangen. Die Spurweiten werden mit Bandmaß direkt ermittelt, wobei auf eine Korrektur der Schrägdistanz aufgrund des geringen Einflusses verzichtet wird.



(a) Maßstab mit Winkeln und Libelle (Mönch, 1954). (b) Stange mit Maßstab (Drake, 1957).

Abbildung 2.21: Maßstab und Hirtenstab.

Bei der Höhenübertragung greift Drake das Verfahren von Mönch auf, empfiehlt jedoch ein starres Hilfsmittel in der Form eines Hirtenstabs (Abbildung 2.21b). Bei Abständen in Z-Richtung über 10 m sollte ein Draht mit einem Maßstab und einem Gewicht verwendet werden. Drake (1965) gibt einen Überblick über die Ergebnisse mehrerer Kranbahnvermessungen. Tabellarisch werden die Ergebnisse für Lage, Spurweite und Z-Wert mit maximalen und mittleren Abweichungen dargestellt. Er dokumentiert die Leistungsfähigkeit der Bau- und Vermessungstechnik. Die Messergebnisse dienen der Erarbeitung eines Standards durch das Institut für Stahlbau und Leichtmetallbau in Leipzig. Insgesamt werden Ergebnisse von 13 Objekten mit einer Spurweite zwischen 10 und 18 m betrachtet. Aus der Beschreibung lässt sich ableiten: Zunächst wurden die Achsen abgesteckt. Nach dem Verlegen der Schienen wurden die Objekte nochmals vermessen und den Baufirmen die Ergebnisse zur eventuellen Korrektur vorgelegt. Nach Fertigstellung der Richtarbeiten wurden die Objekte zur Qualitätssicherung ein drittes Mal vermessen.

Drake schlussfolgert, dass ein mittlerer Lagefehler von ± 5 mm für Spurweiten von ± 10 m und ein relativer Höhenfehler von 1:1000 für einzelne Punkte einer Schiene, sowie für gegenüberliegende Schienenpunkte eines Kranbahngleises erreicht werden können.

Reiterverfahren Eidam (1977) stellt in seinem Beitrag ein Messverfahren zur Optimierung der Kranbahnvermessung vor. Das Verfahren wurde durch ein einfaches Hilfsmittel, den sogenannten Messbandreiter (Abbildung 2.22a), auch als Reiterverfahren bekannt. Ziele sind die Vereinheitlichung der Messung und der Hilfsmittel, Gewährleistung der Arbeitssicherheit, Kontrolle der Messungen, Minimierung der Stillstandszeiten der Krane und Steigerung der Qualität durch einheitliche und übersichtliche Formulare. Bei dem Messbandreiter handelt es sich um einen ca. 20 cm langen, 80 Gramm schweren Maßstab mit Zentimeterteilung, der an einem Messband befestigt wird. Aufgrund des Einflusses auf den Durchhang ist das Verfahren bis Spurweiten von 40 m anwendbar.

Der Vorteil des Verfahrens ist, dass der Theodolit annähernd parallel zu den Laufschiene, in der Mitte der Halle auf dem Boden aufgebaut wird. Er wird anschließend auf ein weiteres Stativ ausgerichtet und bildet somit eine Messlinie. An jeder Messstelle wird die Projektion der Messungslinie abgelesen. Aufgrund steiler Visuren müssen Kipp- und Zielachsfehler des Instruments berücksichtigt oder in zwei Lagen gemessen werden. Ansonsten wird der Rückweg als Kontrolle in der zweiten Lage gemessen.

Eidam (1977) weist auf die erforderliche Rechtwinkligkeit gegenüberliegender Messstellen hin. Die zulässige Querabweichung A_{zul} kann gemäß Formel 2.2 berechnet werden:

$$A_{zul} = \sqrt{2 \cdot \delta s_{zul} \cdot S} \quad (2.2)$$

mit :

S = Spurweite

δs_{zul} = Fehlereinfluss auf S aufgrund der Querabweichung A

Er weist darauf hin, dass die Rechtwinkligkeit besonders bei Kranbahnen mit geringer Spurweite sorgfältig bestimmt werden muss.

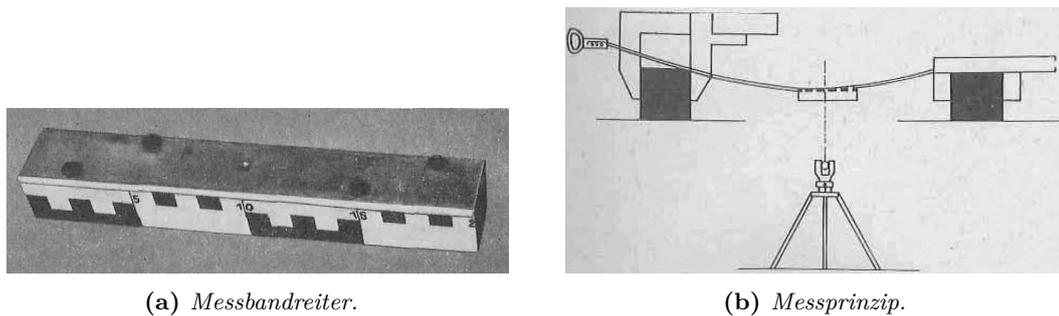


Abbildung 2.22: Das Reiterverfahren nach Eidam (1977).

Die beiden Vorrichtungen die auf den jeweiligen Schienenköpfen befestigt werden und die Enden des Messbandes aufnehmen, ermöglichen die Messung der Schienenkopfbreiten. Diese müssen dokumentiert und in der Auswertung berücksichtigt werden. Das Messprinzip zeigt Abbildung 2.22b.

Die Übertragung der Z-Werte erfolgt nivellitisch wie zuvor bereits beschrieben. Für die Auswertung wird ein ausführliches Formular vorgestellt, das durch alle Schritte der Auswertung führt. Die berechneten Abweichungen für beide Schienen pendeln ausgleichend um die Soll-Lage. Der detaillierte und weitere Ablauf des Verfahrens kann dem Beitrag von Eidam entnommen werden.

Simultane Bestimmung der Schienenlage und des Drehwinkels vom Kran Hennecke und Werner (1982) berichten von den Versuchen von Janusz (1966) und Repalov (1970), die das Ziel hatten, Messzeit zu sparen. Bewegungen quer zur Fahrtrichtung konnten aufgezeichnet werden, indem Vorrichtungen auf beiden Seiten eines Krans angebracht wurden. Dadurch kann die Lage beider Schienen und die Spurweite ermittelt werden (Hennecke und Werner, 1982).

Eine Einschränkung dieser Lösung ist, dass sie nur unter statischer Belastung anwendbar ist. Weiterhin handelt es sich um ein Verfahren, das nur punktuell einsetzbar ist (vgl. Hannover (1980)).

2.3.3 Alignierverfahren mit Laser

Am 16.05.1960 gelang dem amerikanischen Physiker Theodore Maiman mit seinem Assistenten Charles Asawa der Versuch mit dem ersten funktionierenden Laser (Hecht, 2010). Für den Vermessungs- und Baubereich wurde die Technologie durch Weiterentwicklungen dadurch nutzbar, dass eine Referenzgerade und ein sichtbarer Punkt projiziert und Abweichungen von Objekten dazu bestimmt werden konnten.

Hennecke und Werner beschreiben mit Bezug auf Pavlov und Cernikov (1971) ein Verfahren zur Automatisierung der Vermessung von Kranbahnen und Bestimmung des Drehwinkels von Kranen. Hierbei wird ein Laser zur Projektion einer Achse und eine Registriereinheit für die Aufzeichnung der Abweichungen genutzt. Sie stellen fest, dass sowohl dieses, als auch das in Abschnitt 2.3.2 beschriebene Verfahren den Vorteil haben, den Prozess zu automatisieren sowie ihn sicherer und schneller zu machen (Hennecke und Werner, 1982).

N.N. (1972) beschreibt die Ermittlung von Kranbewegungen mittels eines Laserfluchtungsgeräts, eines Spiegels und einer Kamera. Der Vorteil liegt in dem übergeordneten Bezug der Werte. Die Messergebnisse taktil messender Vorrichtungen beziehen sich bisher immer nur auf die jeweilige Kranmessstelle (vgl. Hannover, 1980). Die Anforderung an die Genauigkeit beträgt zwischen 1 und 30 Winkelminuten (0,18 mgon bis 55 mgon). Unter Laborbedingungen konnte eine Winkelauflösung von etwa einer Winkelminute erreicht werden. Mit Verweis auf N.N. (1972) beschreibt Schulz (1974) die Umsetzung detaillierter. Auf dem Kran befindet sich ein Spiegel, auf den die Laserachse projiziert wird. Winkelabweichungen zwischen ein- und ausfallendem Strahl werden registriert und durch einen fortlaufenden Messschrieb protokolliert. Laut Schulz sollen die Messungen Aussagen über den

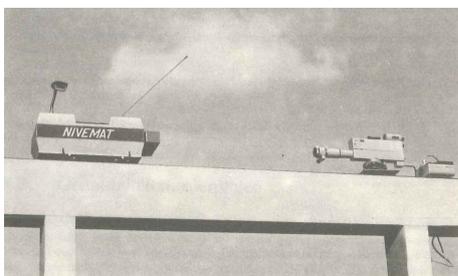
geometrischen Zustand von Kranbahn und Fahrverhalten des Krans ermöglichen. Das System wurde auf einem Kran im störungsfreien Dauerbetrieb erprobt und erreichte eine Winkelauflösung von 0,1 Winkelminuten bei einer Linearität von 0,1 %. Hannover (1980) stellt fest, dass bisher Messungen mit Lasern diskontinuierlich erfolgten und dass mit dem von Schulz beschriebenen Verfahren erstmals eine kontinuierliche Vermessung des Schrägstellungswinkels eines Krans zur Kranbahn möglich ist.

1979 stellt die Jenoptik Jena GmbH die Laserfluchtungsgeräte LF 1 und LFG 1 vor, die auf He-Ne-Lasern basieren (Cyrklaff, 1981; Dichelle, 2010; Jenoptik Jena GmbH, 1979). Mit den Instrumenten kann eine aktive Referenzlinie oder -ebene aufgespannt werden und Bauteile oder Punkte auf Ihre geradlinige Ausrichtung hin überprüft werden. Der LFG 1 ist zusätzlich mit einem Neigungsmesser und einem Horizontalkreis ausgestattet.

Thustý von der Technischen Universität Prag beschreibt den Einsatz eines Lasergeräts vom Typ Tesla TKG 205 für die Vermessung von Kranbahnen (Thustý, 1979). Mittels einer auf der Schiene positionierbaren Tafel können die Abweichungen von der Achse ermittelt werden. Die Strahlenbündelachse soll auf eine Länge von 120 auf 0,2 mm bestimmt worden sein. Die gleiche Genauigkeit soll für die dazwischenliegenden Punkte erzielt worden sein. Etwa zeitgleich führte Otto Hannover Versuche mit einem Laser der Firma Siemens vom Typ LG 68 durch (Hannover, 1980). Seine Forschungen hatten das Ziel, Krananlagen, also Krane und Kranbahnen, mit einer Lasermesseinrichtung zu vermessen. Er betrachtet auch das Thema Messunsicherheiten. Bei der Überprüfung einer Messgröße durch eine Einzelmessung darf die Messunsicherheit 1/10, bzw. im Einzelfall 1/4 des Toleranzfeldes betragen. Die Berechnung der Messunsicherheit eines Messverfahrens erfolgt über das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz.

Wiederum ein Jahr später berichtet Cyrklaff über die Vermessung von Kranbahnen mit dem Laserfluchtungsgerät LFG 1 (Cyrklaff, 1981). Vorteile sind die kombinierte Erfassung von Abweichungen in Lage und Z-Wert sowie den Ersatz der direkten durch die indirekte Spurmessung. In der Veröffentlichung werden Abbildungen der Zieltafeln und der Adaption zur Befestigung auf verschiedenen Schienen gezeigt.

1983 stellt Apel ein laserbasiertes System vor, das ein ferngesteuertes Fahrzeug beinhaltet (Apel, 1983). Dieses System wird später als Nivemat 2003 K bekannt. In dem Beitrag wird eine schematische Skizze des Systems dargestellt. Es besteht aus dem Laser, dem Fahrzeug, einer Bedien- und einer Auswerteeinheit. Die letzten drei Komponenten sind durch eine drahtlose Datenübertragung (Telemetrie) miteinander verbunden. 1989 beschreiben Hennecke et al. in ihrem Buch das Lasermesssystem Nivemat 2003 K und zeigen eine Abbildung (Abbildung 2.23a). Nach der Deutschen Einheit entwickelt die Gesellschaft für angewandte Informatik e. V. (GfAI) den Nivemat 2003 K weiter. Die DEMAG meldet am 20.10.1997 ein Patent an, das den Titel trägt: „System für die Vermessung von Schienen, insbesondere Laufschiene für Krane, Regalbediengeräte, Laufradblöcke“. Damit wird das in der DDR entwickelte System von der Firma DEMAG weiter eingesetzt. Es wird unter dem Namen Lasermesssystem (LMS) bekannt. Der Kranbahnmesswagen (KBMW) existiert zurzeit in der dritten Version (Abbildung 2.23b).



(a) Nivemat 2003 K (Hennecke et al., 1989).



(b) Kranbahnmesswagen-III (KBMW-III) (Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V., 2015).

Abbildung 2.23: Laserbasierte Kranbahnvermessungssysteme.

Als Besonderheit ist hervorzuheben, dass das Fahrzeug auch an H-Trägern von Deckenlaufkränen (vgl. Abbildung 2.17d) fahren kann.

2.3.4 Vermessung mit Tachymeter oder Lasertracker

Mit Verfügbarkeit von hochgenauen Industrietachymetern oder Lasertrackern kann die 3D Lage der Schiene im statischen Fall außerhalb der Flucht der Schiene bestimmt werden (Hánek und Buršíková, 1993). Im Idealfall steht bei der Vermessung einer Hallenkranbahn das Instrument auf dem Hallenboden und befindet sich somit außerhalb des Gefahrenbereichs. Mit Hilfe einer Vorrichtung, die mit einem oder zwei Reflektoren und einer Dosenlibelle ausgestattet ist, können Punkte entlang der Schiene signalisiert werden (Abbildung 2.24). Im Falle einer Hallenkranbahn ist diese Arbeit in der Höhe gefährlich und zeitaufwendig. Aufgrund der Anzahl an zu messenden Punkten erfolgt ein Aufmaß bei dieser Vorgehensweise häufig nur im Bereich der Stützen. Dementsprechend eingeschränkt ist die repräsentierte Situation der Ist-Lage.

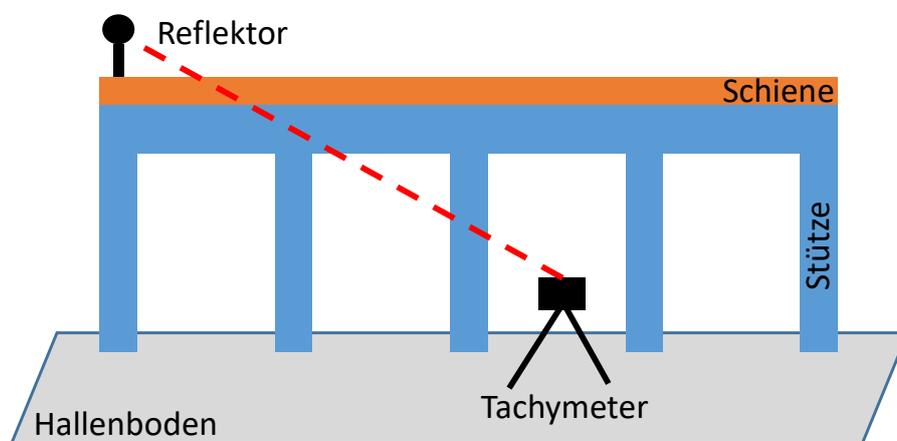


Abbildung 2.24: Kranbahnvermessung mit Tachymeter und Reflektor.

Nachteile in der Genauigkeit der Höhenbestimmung konnten durch ein einfaches Hilfsmittel verringert werden (Marjetič et al., 2012). Hierbei kommt ein Gleismesswinkel (ähnlich Abbildung 4.1b) mit zwei Reflektoren zum Einsatz, deren Abstand zueinander bekannt ist.

2.3.5 Automatisierte Systeme mit georeferenzierendem Sensor

Nachteil der in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Vorgehensweise ist, dass jede Position manuell aufgehalten werden muss. Automatisiert wird der Prozess, indem sich ein selbstständig fahrender Wagen auf der Schiene bewegt. Neumann und Dennig (2011) vergleichen verschiedene solcher Systeme.

Neben dem bereits in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Lasermesssystem, gibt es andere Systeme, die den Prozess automatisieren. Diese machen sich die Verfügbarkeit von Tachymetern zu Nutze. Der positionsgebende Sensor muss somit nicht zwangsweise in der Flucht der Schiene stehen. Es ist möglich die Vermessung von Brückenlaufkränen (Abschnitt 2.1.4) vom Hallenboden aus durchzuführen. Weiterhin wird die Messung von Lage und Z-Wert radial verlegter Profile vereinfacht. In den nachfolgenden Abschnitten werden verschiedene Systeme vorgestellt. Auf Seite 29 werden in Tabelle 2.3 die wesentlichen Parameter der Systeme gegenübergestellt.

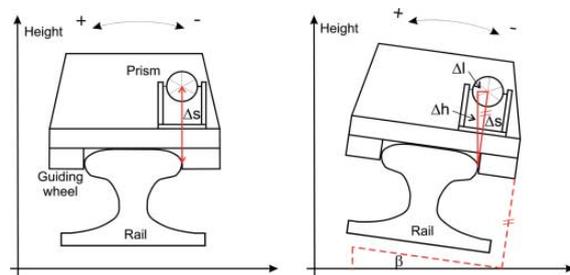
RailControl Das Kranbahnvermessungssystem RailControl (siehe Abbildung 2.25a) wurde 2006 von der ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH initiiert und gemeinsam mit dem Vermessungsbüro Hanack und Partner entwickelt. Das System zeichnet sich durch die konsequente Auslegung auf die Genauigkeit der Messergebnisse und sein Umfeld aus. Um die hohen Qualitätsanforderungen zu

erfüllen, wurde die Entwicklung durch das Geodätische Institut der Leibniz Universität Hannover wissenschaftlich begleitet (Brieden, 2007; Neumann und Dennig, 2011; Schulze, 2009). Daher stehen auch Ergebnisse aus kinematischen Testmessungen zur Verfügung, die eine Genauigkeit von $\sigma = 1$ mm bis zu einer Entfernung von 50 m dokumentieren.

Der Forderung einer möglichst kurzen Betriebsbeeinträchtigung wird erfüllt, indem das System die Schienen kinematisch vermisst. Das Tachymeter, auch Totalstation genannt, steht in der Flucht der Schiene, sodass der Einfluss der Streckenmessung bei der Positionsbestimmung überwiegt. Als Reflektor wird ein Rundprisma verwendet. Mit Hilfe eines Inklinometers wird kontinuierlich die Neigung des Messwagens erfasst. Idealerweise wird angenommen, dass die Messgröße der Neigung des Schienenkopfes entspricht. Die ermittelte Messgröße dient einerseits zur Überprüfung, ob die Toleranz gemäß der Richtlinie eingehalten wird. Andererseits wird damit die Schiefstellung der Reflektors korrigiert (Abbildung 2.25b). Im Postprocessing werden Ausreißer eliminiert, eine ausgleichende Achse berechnet, für die Neigung eine Korrektur angebracht und die Koordinaten für die gewünschten Stationen berechnet.



(a) Kranbahnmesswagen RailControl (Thyssen-Krupp GfT Gleistechnik GmbH, 2012).



(b) Einfluss der Neigung auf den Messpunkt (Neumann und Dennig, 2011).

Abbildung 2.25: Kranbahnmesswagen RailControl und Einfluss der Neigung auf die Messwerte.

Das Fahrzeug wurde so konstruiert, dass es auf der Schiene ein ausgewogenes Gewichtsverhältnis hat, insgesamt nicht zu schwer und damit transportabel ist. Die Führungsrollen sind zur Adaption auf gängige Schienenprofile verstellbar (Dennig und Neumann, 2008; Neumann und Dennig, 2009).

RailQ™ Im Jahr 2010 wurde das System RailQ™ der Firma Konecranes auf dem Markt bekannt (Abbildung 2.26). Das Prinzip ähnelt dem von RailControl. Auch die Position des RailQ™ Fahrzeugs wird durch einen Tachymeter bestimmt. Entscheidender Unterschied ist hierbei, dass ein 360° Prisma (Trimble MT1000) eingesetzt wird. Der Vorteil, dass das System außerhalb der Schienenflucht (exzentrisch) verfolgbar ist, geht mit einer ungünstigen Zentrierunsicherheit des Reflektors von 3-5 mm einher (mehr dazu im Abschnitt 4.3.6). Es ist nicht bekannt, ob ein Inklinometer verbaut ist.



Abbildung 2.26: Kranbahnmesswagen RailQ™ und Tachymeter (Service, 2017).

RailRob® (HPM Vermessung), RSR (Gantrex GmbH) und BHB Vermessungs- u. Ingenieurgesellschaft mbH Die Systeme RailRob® der Firma HPM Vermessung (Abbildung 2.27a), RSR der

Firma Gantrex (Abbildung 2.27b) und das der Firma BHB Vermessungs- u. Ingenieurgesellschaft mbH (Abbildung 2.27c) ähneln dem System RailControl. Sie verwenden jedoch wie das System RailQ 360° Prismen.



(a) Kranbahnmesswagen RailRob® der Firma HPM Vermessung (HPM Vermessung, 2013).



(b) Kranbahnmesswagen der Firma Gantrex GmbH (Gantrex GmbH, 2016).

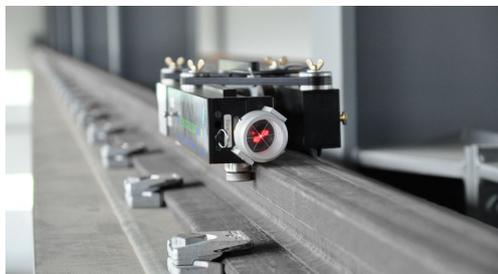


(c) Kranbahnmesswagen der Firma BHB Vermessungs- u. Ingenieurgesellschaft mbH (BHB Vermessung Dresden, 2017).

Abbildung 2.27: Verschiedene Kranbahnmesswagen mit 360° Prismen.

Die Firma HPM gibt in Ihrer Produktbroschüre an, den Wagen auch mit einem Lasertracker verfolgen zu können. Das Fahrzeug ist mit einer Videoaufzeichnung ausgestattet (HPM Vermessung, 2013).

Systeme von Marx Ingenieurgesellschaft mbH und Trigis Geoservices GmbH Die Systeme der Firmen Marx Ingenieurgesellschaft mbH (Abbildung 2.28a) und Trigis Geoservices GmbH (Abbildung 2.28b) ähneln vom Prinzip her dem System RailControl. Zumindest das im Jahr 2013 entwickelte System der Firma Marx ist laut Anbieter mit einem Inklinometer ausgestattet (Marx Ingenieurgesellschaft mbH, 2014, 2017). Beide Systeme sind variabel an die Profillbreite anpassbar und sind ebenso wie RailControl mit einem Rundprisma ausgestattet.



(a) Kranbahnmesswagen der Firma Marx Ingenieurgesellschaft mbH (Marx Ingenieurgesellschaft mbH, 2017).



(b) Kranbahnmesswagen der Firma Trigis Geoservices GmbH (TRIGIS, 2017).

Abbildung 2.28: Verschiedene Kranbahnmesswagen mit Rundprismen.

UAVs Forschungsgruppen (Costantino et al., 2019; Ghassoun et al., 2021) untersuchten den Einsatz von UAVs zur Vermessung von Schienenanlagen. Hierfür sind eingemessene Referenzpunkte (z. B. mit einem Tachymeter) erforderlich, die für die Bildauswertung benötigt werden. Costantino et al. (2019) ermitteln die praktische Schienenkopfachse (siehe Abschnitt 4.1) sowie die Schienenkopfneigung aus Bilddaten. Das Ergebnis der Messungen ist abhängig von den eingesetzten Sensoren.

Monorail Mobile Platform und CBOT1 In (Czajka et al., 2018) wird eine Plattform vorgestellt, die mit Profillaserscannern (PLS) ausgestattet werden kann, um Schienenprofile zu scannen. In der Arbeit werden erste Untersuchungsergebnisse vorgestellt, bei der ein PLS von einem Roboterarm geführt wird. Das System CBOT1 (siehe Abbildung 2.29) ist seit dem Ende 1. Quartal 2022 bekannt.

Es basiert auf einer ferngesteuerten Plattform, die sich entlang und auf einer Schiene bewegen kann. Das Fahrzeug ist mit zwei fest montierten Profillaserscannern, einer Kamera und einem 360 Grad Reflektor ausgerüstet. Zu dem System gehören ein Tachymeter und eine Auswerteeinheit. Das gesamte System ist offensichtlich von dem Messsystem inspiriert, das in (Dennig et al., 2017) vorgestellt wurde. Bekannt ist die erreichbare Genauigkeit nicht, dennoch ist das System in die Gruppe mit den Unsicherheiten $\sigma = 2 \text{ mm}/50 \text{ m}$ einzuordnen. Von dem Autor dieser Arbeit wird angenommen, dass die erzeugten Scans und Bilder anhand der Stationierung referenziert und ausschließlich zur Dokumentation des Schienenzustandes verwendet werden, jedoch nicht in die Bestimmung der relevanten Schienenachspunkte (Abschnitt 4.1) einfließen.



Abbildung 2.29: Kranbahnmesswagen CBOT1 (Strukton Rail Benelux, 2022).

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung wesentlicher Parameter aktueller Kranbahnvermessungssysteme

Spezifikation	System	DEMAG (LMS)	RailControl	Marx	Trigis	Konecranes (RailQ™)	HPM (RailRob®)	BHB, Gantrex (RSR)	CBOT1	Laser-scanner	UAV
Autom. Messung		Ja	Ja	unbek.	unbek.	Ja	Ja	unbek.	unbek.	Ja	Ja
Autom. Auswertung		Ja	Ja	unbek.	unbek.	unbek.	unbek.	unbek.	manuell	manuell	teilw.
Art der Vermessung		St. & Go	kinematisch	unbek.	unbek.	kinematisch	kinematisch	unbek.	unbek.	statisch	St. & Go
Positionsgebender Sensor		Odometer, aktive Zieltafel	Tachymeter optional Lasertracker	Tachymeter	Tachymeter	Tachymeter	Tachymeter optional Lasertracker	Tachymeter	Tachymeter	Laser-scanner	Tachymeter
Inklinometer		Ja	Ja	Ja	unbek.	unbek.	unbek.	unbek.	unbek.	Nein	Nein
Unabhängig von Schwingungen des Profils		Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	-	-
Genauigkeit von Lage und Höhe (bis max. 50 m, 1 σ)		1 mm	1 mm (CCR)	1 mm ²	1 mm ²	3-5 mm ²	3-5 mm ²	3-5 mm ²	3-5 mm ²	3-5 mm ²	3-5 mm ²
Punktdichte für die Schienenlage (bei 1 m/s)		-	3-5 mm ²	-	-	3-5 mm ²	3-5 mm ²	3-5 mm ²	3-5 mm ²	unbek.	1-2 mm
Exzentrische Messungen		Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Messung im unbelasteten/ belasteten Zustand		Nein	Ja	unbek.	Ja	unbek.	Ja	unbek.	unbek.	Nein	Nein
Befahrung verschiedener Profiltypen		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	-
Ferngesteuert adaptierbar auf Profiltiefe		Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	unbek.	-	-
v des Messwagens		Stop and Go	1 m/s	unbek.	unbek.	0,25 m/s	unbek.	unbek.	unbek.	-	-
Absturz-sicherung		Software mechanisch	Nein	unbek.	unbek.	unbek.	unbek.	unbek.	unbek.	-	-
		Nein	Nein	unbek.	unbek.	Nein	Nein	unbek.	unbek.	-	-

²Keine Angabe des Anbieters, daher Annahme des Autors nach überschlägiger Berechnung.

3 Grundlagen zur Bestimmung der geometrischen Zustandsgrößen von Profilen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen erläutert, mit deren Hilfe im weiteren Verlauf der Arbeit die geometrischen Zustandsgrößen von Profilen bestimmt werden können. Siehe hierzu auch die in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Zustandsgrößen für Kranbahnen.

In Abschnitt 3.1 wird die rekursive Filterung im Zustandsraum beschrieben. Abschnitt 3.1.1 geht auf Wahrscheinlichkeiten, den Satz von Bayes und Verteilungen ein. In den folgenden Abschnitten werden die rekursiven Filter Bayes Filter (BF) (3.1.2), Kalman Filter (KF) (3.1.3) und Unscented Kalman Filter (UKF) (3.1.5) erläutert. Zum Schluss wird in Abschnitt 3.1.6 der Unscented Rauch Tung Striebel Smoother (URTSS) beschrieben.

Auf die geometrische Modellierung von Kurven wird in Abschnitt 3.2 eingegangen. Hierfür werden zunächst in Abschnitt 3.2.1 die Polynome beschrieben. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.2.2 die Erläuterung von Splines und in dem letzten Abschnitt 3.2.3 B-Splines.

3.1 Rekursive Filterung im Zustandsraum

Nach Julier und Uhlmann (1997) sind Filterung und Schätzung die zwei am meist verbreitetsten Werkzeuge der Ingenieurwissenschaften. Immer dann, wenn der wahre Systemzustand eines Systems auf Grundlage verrauschter, fehlerbehafteter und teilweise redundanter Sensordaten bestimmt werden muss, wird ein Zustandsschätzer verwendet (Marchthaler und Dingler, 2017, S. 3).

3.1.1 Wahrscheinlichkeiten, Satz von Bayes, Verteilungen

Wahrscheinlichkeiten und Verteilungen haben im Zusammenhang mit der Verwendung von Filtern eine grundlegende Bedeutung. In den nachfolgenden Abschnitten werden Grundbegriffe und Formeln der Wahrscheinlichkeitstheorie eingeführt.

Für die Einschätzung des Eintritts eines Ereignisses kann diesem eine Wahrscheinlichkeit p zugeordnet werden. Mathematisch dargestellt werden kann die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses A unter der Voraussetzung des Ereignisses B (Simon (2006, S. 52) und Thrun et al. (2005, S. 16)):

$$p(A | B) = \frac{p(A \cap B)}{p(B)}. \quad (3.1)$$

Mit der Formel 3.1 kann der Satz von Bayes hergeleitet werden, der einer der wichtigsten Sätze der Wahrscheinlichkeitsrechnung ist. Demnach besteht ein Verhältnis zwischen der bedingten Wahrscheinlichkeiten $p(A | B)$ und $p(B | A)$ (Thrun et al., 2005, S. 16):

$$p(A | B) = \frac{p(B | A)p(A)}{p(B)} \quad (3.2)$$

Der Erwartungswert μ einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion f beschreibt, welchen Wert eine Zufallsvariable x im Mittel annimmt. Die Berechnung erfolgt gemäß DIN 18709-4:2010:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (3.3)$$

Zur Angabe der Unsicherheit des Erwartungswertes, wird die Varianz σ^2 gemäß DIN 18709-4:2010 berechnet:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx. \quad (3.4)$$

Die Standardabweichung σ wird als positive Quadratwurzel aus der Varianz σ^2 angegeben. Bei einer mehrdimensionalen Zufallsvariablen wird der Erwartungswert zu einem Vektor $\boldsymbol{\mu}$ und die Varianz zu einer Varianz-Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}$.

Für alle stetigen Verteilungsmodelle können Wahrscheinlichkeiten als Flächen unter der Dichtefunktion interpretiert werden (Eckey et al., 2002, S. 296). Zur Berechnung einer Wahrscheinlichkeit kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion verwendet werden, die wie folgt definiert ist:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt. \quad (3.5)$$

Die am meisten verwendete Verteilung in der Geodäsie ist die Normalverteilung, bzw. Gauß-Verteilung. Die Verteilung ist vollständig über den Erwartungswert μ (Formel 3.3) und die Varianz σ^2 (Formel 3.4) definiert. Die Wahrscheinlichkeitsdichte simultan ist gegeben durch (DIN ISO 3534-1:2009 und Thrun et al. (2005, S. 14)):

$$f(x) = -\frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (3.6)$$

Die erläuterten Formeln dienen dem Verständnis für die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Filter, die alle auf die rekursive Bayessche Schätztheorie aufbauen.

3.1.2 Bayes Filter

BF bestimmen auf Grundlage von bedingten Wahrscheinlichkeiten die Richtigkeit eines Ereignisses anhand von Informationen aus der Vergangenheit. Gemäß Thrun et al. (2005, S. 26) haben sie den allgemeinsten Algorithmus, um aus Zuständen \boldsymbol{x} und Beobachtungen \boldsymbol{y} die Wahrscheinlichkeit p zu berechnen. In einem rekursiven Prozess berechnet der Algorithmus aus den Daten des Systemzustands im ersten Schritt die Wahrscheinlichkeit einer gerechneten Epoche, die Prädiktion ($p(\boldsymbol{x}_k | \boldsymbol{y}_{1:k-1})$) und im zweiten Schritt, mit tatsächlichen Beobachtungen, eine Korrektur ($p(\boldsymbol{x}_k | \boldsymbol{y}_{1:k})$). Wie an den Indizes zu erkennen ist, werden die Schritte über die Epochen k differenziert. Grundlage für diese Vorgehensweise ist der Satz von Bayes (Formel 3.2), der dem Filter auch seinen Namen gegeben hat. Abbildung 3.1 veranschaulicht die Schritte Prädiktion und Korrektur des rekursiven Schätzverfahrens.

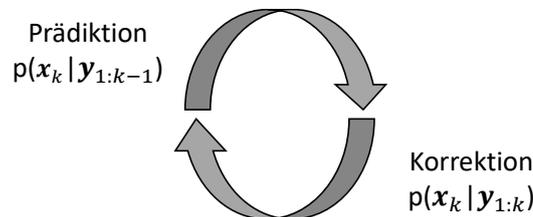


Abbildung 3.1: Rekursion von Prädiktion und Korrektur am Beispiel eines BFs.

Ein Nachteil für die Praxis ist die von Thrun et al. (2005, S. 28) beschriebene eingeschränkte Anwendung. So lassen sich zum einen nicht beliebige kontinuierliche Dichtefunktionen exakt darstellen und zum anderen sind die Integrale nicht für beliebige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen lösbar. Aus diesem Grund wird auf numerisch besser handhabbare Filter wie den Kalman Filter zurückgegriffen.

3.1.3 Kalman Filter

Rudolf Emil Kálmán hat in dem Jahr 1960 seinen bekannten Beitrag (Kálmán, 1960) über die rekursive Lösung des linearen Filterproblems diskreter Daten veröffentlicht (Welch und Bishop, 1995). Das Kalman-Filter ist ein stochastischer Zustandsschätzer dynamischer Systeme und geeignet für Echtzeitanwendungen. Verwendung findet es in der Zeitreihenanalyse bei der Glättung, Filterung und Prognose von Daten. Dabei entspricht das Kalman-Filter in vielen Punkten einem Tiefpassfilter, z. B. Phasenverschiebungen bei dynamischem Verhalten. Ziel der Forschung ist es durch Modellierungen das Filter optimal an spezifische Gegebenheiten anzupassen.

Das BF (Abschnitt 3.1.2) kann bei beliebigen Verteilungen angewendet werden. Dagegen setzt das KF für die Beschreibung eines Systemzustands eines linearen, dynamischen Systems eine Normalverteilung voraus, die durch Erwartungswert und Varianz definiert wird. Mit dem KF Algorithmus wird im Korrektionschritt ein neuer Zustand mit minimaler Varianz berechnet (Haykin, 2001, S. 20). Diese Vereinfachung hat dazu geführt, dass im Gegensatz zum BF das KF und darauf basierende Versionen in der Praxis sehr stark verbreitet sind.

Gemäß Heunecke et al. (2013, S. 305) ist der geschätzte Zustandsvektor $\hat{\mathbf{x}}_k$ der zu ermittelnde Unbekanntenvektor. Seine Schätzung erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate. Hierdurch gelangt man zu den bekannten Filtergleichungen mit ihren charakteristischen Größen Innovation (Gleichung 3.13), Kalman gain (Gleichung 3.14) und Kofaktormatrix der Innovation (Gleichung 3.16).

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes werden die wichtigsten Gleichungen des KFs in Anlehnung an Paffenzholz, 2012 dargestellt. Zur Vertiefung wird auf Gelb (1974, S. 103 ff.) verwiesen.

Einer Systembeschreibung im Zustandsraum liegt zunächst eine zeitkontinuierliche Annahme zugrunde, die aufgrund der Abtastrate der Sensoren in eine zeitdiskrete Systembeschreibung überführt werden muss. Die Darstellung erfolgt durch zwei Gleichungen, der Bewegungs- oder Zustandsgleichung (Gleichung 3.7) und der Messgleichung (Gleichung 3.11).

Für die Beschreibung eines zeitdiskreten, linearen Modells durch einen KF sind

- der Zustandsvektor $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{n_x}$, mit n_x der Zahl der Zustandsparameter,
- der Eingangsvektor $\mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^{n_u}$ (auch Stellgrößenvektor genannt), mit n_u der Anzahl der Eingangsparameter,
- der Prozessfehlervektor $\mathbf{w}_k \in \mathbb{R}^{n_x}$, der Modellierungsfehler der Systemgleichung und andere Einflüsse berücksichtigt sowie
- der zeitdiskrete Index k

gegeben. Mit diesen Größen kann die Zustandsgleichung aufgestellt werden:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{T}_{k+1,k} \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_{k+1,k} \mathbf{u}_k + \mathbf{S}_{k+1,k} \mathbf{w}_k. \quad (3.7)$$

Hierbei ist die Matrix $\mathbf{T}_{k+1,k}$ die Transitions- oder Systemmatrix, die den Übergang von den Zeitpunkten k nach $k + 1$ abbildet. Die Eingangs- oder Steuermatrix $\mathbf{B}_{k+1,k}$ beinhaltet den Zuwachs (gain) von k nach $k + 1$ und die Matrix $\mathbf{S}_{k+1,k}$ die Koeffizienten der Störparameter. Für den Prozessfehlervektor \mathbf{w}_k wird ein normalverteiltes, mittelwertfreies, weißes Rauschen angenommen. Der Zusammenhang zwischen Kovarianz- und Kofaktormatrix ergibt sich demnach gemäß (Bar-Shalom et al., 2001, S. 51):

$$E(\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T) = \boldsymbol{\Sigma}_{ww,k} = \sigma_{0w}^2 \mathbf{Q}_{ww,k}. \quad (3.8)$$

Für den priori Varianzfaktor σ_{0w}^2 wird typischerweise $\sigma_{0w}^2 = 1$ angenommen.

Prädiktion Der Initialzustand $\hat{\mathbf{x}}_0$ und seine Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_0}$ sind hinreichend gut abzuschätzen. Mit gutem vorhandenem Vorwissen konvergiert das Filter schneller. Mit fortschreitenden Epochen des KFs werden die Parameter rekursiv geschätzt.

In Verbindung mit Gleichung 3.7 lässt sich der Zustand $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ präzisieren:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \mathbf{T}_{k+1,k} \mathbf{x}_k^+ + \mathbf{B}_{k+1,k} \mathbf{u}_k \quad (3.9)$$

Die zu dem präzisierten Zustand $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ gehörende Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^-$ wird nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz berechnet:

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^- = \mathbf{T}_{k+1,k} \Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^+ \mathbf{T}_{k+1,k}^T + \mathbf{B}_{k+1,k} \Sigma_{uu,k} \mathbf{B}_{k+1,k}^T + \mathbf{S}_{k+1,k} \Sigma_{ww,k} \mathbf{S}_{k+1,k}^T. \quad (3.10)$$

$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^+$ ist hierin die Kovarianzmatrix der gefilterten Zustände zum Zeitpunkt k . Die Matrix Σ_{uu_k} ist die Kovarianzmatrix der Eingangsparameter.

Korrektion Die Messgleichung wird über den Beobachtungsvektor \mathbf{y}_{k+1} und die Beobachtungsmatrix \mathbf{H}_{k+1} definiert:

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{v}_{k+1}. \quad (3.11)$$

Der Vektor \mathbf{v}_{k+1} beinhaltet die Verbesserungen. Da auch für ihn ein normalverteiltes, mittelwertfreies, weißes Rauschen angenommen wird, besteht der Zusammenhang von Kovarianz- und Kofaktormatrix der Beobachtungen wie in Gleichung 3.8:

$$E(\mathbf{v}_{k+1} \mathbf{v}_{k+1}^T) = \Sigma_{yy,k+1} = \sigma_{0w}^2 \mathbf{Q}_{yy,k+1}. \quad (3.12)$$

Die Variablen w_k und v_{k+1} berücksichtigen das Prozessrauschen der unvollständigen Modellannahme und das Messrauschen (Heunecke et al., 2013, S. 317). Das normalverteilte, mittelwertfreie, weiße Rauschen macht sie unabhängig voneinander (Welch und Bishop, 1995).

Mit Verfügbarkeit der aktuellen Beobachtungen \mathbf{y}_{k+1} erfolgt in einem Filterschritt des KF die rekursive Schätzung des Zustandsvektors:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^+ = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-) = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{i}_{k+1}. \quad (3.13)$$

Bei dem Filterschritt wird die prädisierte Schätzung $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ mit dem zweiten Term aus Gleichung 3.13 addiert. Die Differenz aus der Beobachtung und dem prädisierten Zustandsvektor ist \mathbf{i}_{k+1} , die sogenannte Innovation. Sie ist ein Qualitätsmerkmal, das Null ist, wenn die Prädiktion zur Messung passt und auf das statistische Tests angewendet werden können. \mathbf{K}_{k+1} wird als der Kalman gain, bzw. da sie \mathbf{i}_{k+1} skaliert, auch als Verstärkungsmatrix bezeichnet. In sie gehen die Unsicherheiten der Beobachtungen und der Prädiktion ein. Diese Matrix kann im Zusammenhang mit der rekursiven Parameterschätzung erklärt werden. Zur Vertiefung wird auf die Literatur verwiesen (z. B. Heunecke et al. (2013, S. 189 ff.)).

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T (\mathbf{Q}_{yy,k+1} + \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T)^{-1}. \quad (3.14)$$

Nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz wird die Kofaktormatrix des gefilterten Zustands $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^+$ berechnet und ergibt:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^+ = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^- - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{Q}_{ii,k+1} \mathbf{K}_{k+1}^T, \quad (3.15)$$

daraus folgt die Kofaktormatrix der Innovation \mathbf{i}_{k+1} :

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{i}}\hat{\mathbf{i}}_{k+1}} = \mathbf{Q}_{yy,k+1} + \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T, \quad (3.16)$$

Für w_k und v_{k+1} werden weißes Rauschen vorausgesetzt. Das heißt, dass keine zeitliche Korrelation zwischen System- beziehungsweise Beobachtungsabweichungen besteht. Dies entspricht meistens

nicht der Realität. Insbesondere bei der Fusionierung mehrerer Sensoren kann sich dieser Umstand auf eine schlechte Performance und auf die Stabilität des Filters auswirken. Korrigiert werden kann das Problem durch die Modifikation des funktionalen Modells des KFs, indem die Systemgleichung erweitert wird. Diese Erweiterung des KFs entspricht einem Formfilter. Zur Vertiefung wird auf Heunecke et al. (2013, S. 320 f.) verwiesen.

3.1.4 Extended Kalman Filter

Das KF ist für Anwendungen geeignet, bei denen die Zustands- und Messgleichung linear sind. In der realen Welt ist das häufig nicht der Fall. Unter Beibehaltung der Notation der für das KF verwendeten Parameter (Abschnitt 3.1.3), lautet die Darstellung der Modellgleichungen in nichtlinearer Form:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, \mathbf{w}_{k-1}), \quad (3.17)$$

$$\mathbf{y}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k. \quad (3.18)$$

Für die optimale Lösung eines nichtlinearen Filterungsproblems müsste die bedingte Wahrscheinlichkeitsdichte vollständig beschrieben werden. Der Aufwand hierfür ist enorm und wird nur mit hohem Rechenaufwand, insbesondere bei mehrdimensionalen Systemen, durch unbefriedigende Näherungslösungen erreicht. Mit dem Wissen, dass die Lösung nur eine grobe Näherung darstellt, wird das Erweiterte Kalman Filter (engl. Extended Kalman Filter (EKF)) häufig für nichtlineare Modellgleichungen verwendet (Julier et al., 1995).

Das EKF ist dem KF sehr ähnlich, wobei jeder lineare Schritt, durch einen linearisierten ersetzt wird. Ähnlich einer Taylor-Reihenentwicklung werden hierfür die Funktionen der Modellgleichungen des KFs (Gleichungen 3.7 und 3.11) an der Stelle der letzten Zustandsschätzung $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ durch partielles Ableiten analytisch analysiert. Üblicherweise werden die Terme der ersten und zweiten Ordnung der Taylor Näherung der nichtlinearen Funktion berücksichtigt (EKF erster und zweiter Ordnung).

Bei einem mehrdimensionalen System werden im Rahmen der Linearisierung die Ableitungen der Modellfunktionen mit zwei Jacobi-Matrizen berechnet (Julier et al., 1995).

Die Verteilung ist nach der nichtlinearen Transformation nicht mehr normalverteilt. Es handelt sich um eine Approximation der Normalverteilung, die das Ergebnis einer effizienten Schätzung ist (Thrun et al. (2005, S. 56), Julier und Uhlmann (2004)).

Das EKF ist insbesondere für sich zwischen zwei Epochen \mathbf{x}_k nach \mathbf{x}_{k+1} linear verhaltende Systeme geeignet. Das liegt daran, dass nichtlineare Funktionen durch Linearisierung approximiert werden. Die Abhängigkeit von Jacobi-Matrizen macht das EKF anfälliger für Divergenzprobleme.

Julier und Uhlmann (1997) und Julier et al. (1995) nennen drei wesentliche Nachteile für das EKF:

- Sind die Zeitintervalle nicht klein genug, kann die Filter Performance instabil sein.
- Die erforderlichen kleinen Intervalle führen zu einem hohen Rechenaufwand.
- Die Ableitung der Jacobi-Matrizen ist in den meisten Fällen nicht trivial.

Vorteile des EKF sind seine konzeptionelle Einfachheit und die gute Performance bei der Berechnung.

3.1.5 Unscented Kalman Filter

Das UKF ist eine von Julier (1998, 2002), Julier und Uhlmann (1996, 1997, 2002, 2004) und Julier et al. (1995) entwickelte weitere Modifikation des Kalman Filter Algorithmus. Wie das EKF kann es für nichtlineare Systeme angewendet werden. Ebenso kann es die Gauß-Funktion approximieren, wobei dafür keine Jacobi-Matrizen erforderlich sind. Zentrale Idee ist durch die Propagation nicht zufällig, sondern für deterministisch gewählte Regressionspunkte die Unsicherheit der aktuellen Schätzung über das nichtlineare System hindurch zu transformieren. Nachteile des EKF werden

dadurch umgangen. Vorteile sind eine geringere Rechenleistung, da keine Jacobi-Matrizen ausgewertet werden müssen, die zum Teil eine große Dimension haben. Optimal für die Berechnungsergebnisse ist, dass keine Fehler auftreten können, die durch Linearisierung der nichtlinearen Funktionen entstehen und sich zu der Quadratsummenminimierung im Gauß-Markov-Modell addieren. Eine Erklärung von Jeffrey Uhlmann zu der Wahl des Namens des Filters kann bei Uhlmann (2012) nachgelesen werden.

Unscented Transform Der grundlegende Unterschied in der Vorgehensweise zwischen UKF und EKF besteht nun darin, dass das UKF sich folgendes zu Nutze macht: „It is easier to approximate a Gaussian distribution than it is to approximate an arbitrary nonlinear function or transformation“¹ (Uhlmann, 1994). Es sei ein zufälliger Vektor \mathbf{x} , für den die Funktionswerte mit der nichtlinearen Funktion $\mathbf{y} = g(\mathbf{x})$ berechnet werden. Für \mathbf{x} wird ein Mittelwert \mathbf{m} und eine Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{xx,i}$ angenommen. Auf Grundlage von statistischen Berechnungen werden nach der so genannten Unscented Transform (UT) Sigma-Punkte $\mathbf{X}_i = \{\mathbf{x}_i, \mathbf{W}^i\}$ eingeführt. Sie approximieren die nichtlineare Funktion über die gesamte Breite der Normalverteilung (Julier et al., 1995). Dies erfolgt für jede Beobachtung über eine definierte Anzahl $(2n + 1)$ von Sigma-Punkten \mathbf{X}_i . Die Variable n entspricht der Dimension des Zustandsvektors. Der erste Punkt ist der Erwartungswert der Gauß-Verteilung. Es folgen $2n$ Punkte, von denen jeweils zwei symmetrisch an den Hauptachsen der Kovarianz liegen (Thrun et al., 2005, S. 65):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0 &= \mathbf{m} \\ \mathbf{x}_i &= \mathbf{m} + \left(\sqrt{(n + \lambda) \mathbf{Q}_{xx,i}} \right) & i = 1, \dots, n \\ \mathbf{x}_i &= \mathbf{m} - \left(\sqrt{(n + \lambda) \mathbf{Q}_{xx,i}} \right) & i = n + 1, \dots, 2n. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Hierin ist $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$ ein Skalierungsfaktor. Die positiven Konstanten α , β und κ beeinflussen die Entfernung der Sigma-Punkte um den Erwartungswert. Die Konstante α bestimmt die Verteilung der Sigma-Punkte um \mathbf{m} und hat üblicherweise einen kleinen positiven Wert (z. B. $1e - 3$). Der Parameter κ ist ein zweiter Skalierungsparameter der üblicherweise 0 gesetzt wird. Mit β soll Vorwissen über die Verteilung von \mathbf{x} berücksichtigt werden. Bei einer Gauß-Verteilung ist $\beta = 2$ optimal. Näheres kann in Wan und van der Merwe (2000) nachgelesen werden.

Es wird eine Gewichtung der prozessierten Punkte durchgeführt. Mit den Gewichten $W_m^{(i)}$ wird der Erwartungswert und mit $W_c^{(i)}$ die Kovarianz berechnet (Wan und van der Merwe, 2000):

$$\begin{aligned} W_m^{(0)} &= \lambda / (n + \lambda) \\ W_c^{(0)} &= \lambda / (n + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_m^{(i)} &= W_c^{(i)} = 1/2(n + \lambda) & i = 0, \dots, 2n. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Die Gleichung 3.19 hat als Matrix die folgende Darstellung, wobei durch Einsetzen von λ die Variable $c = \alpha^2(n + \kappa)$ ausgeklammert werden kann:

$$\mathbf{X}_i = (\mathbf{m} \quad \mathbf{m} \quad \mathbf{m}) + \sqrt{c} \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\mathbf{Q}_{xx,i}} & -\sqrt{\mathbf{Q}_{xx,i}} \end{pmatrix}. \quad (3.21)$$

Die berechneten Sigma-Punkte können nun in die nichtlineare Funktion eingesetzt werden:

$$\mathbf{Y}_i = g(\mathbf{X}_i). \quad (3.22)$$

Es folgt die erneute Bildung eines normalverteilten Erwartungswertes $\boldsymbol{\mu}_U$, seiner Kofaktormatrix

¹Übersetzung durch den Verfasser: Es ist einfacher, eine Gauß-Verteilung zu approximieren, als eine beliebige nichtlineare Funktion oder Transformation zu approximieren.

\mathbf{Q}_U und der Kreuzkovarianz \mathbf{C}_U (Gleichungen 3.23, 3.24 und 3.25):

$$\boldsymbol{\mu}_U = \mathbf{Y} \mathbf{w}_m \quad (3.23)$$

$$\mathbf{Q}_U = \mathbf{Y} \mathbf{W} \mathbf{Y}^T \quad (3.24)$$

$$\mathbf{C}_U = \mathbf{X} \mathbf{W} \mathbf{Y}^T. \quad (3.25)$$

Für den Beweis der Gleichungen 3.23, 3.24 und 3.25 wird auf Särkkä (2006, S. 67) verwiesen. Dort kann ebenfalls die Definition des Vektors \mathbf{w}_m und der Matrix \mathbf{W} nachgeschlagen werden:

$$\mathbf{w}_m = \left[W_m^{(0)} \dots W_m^{(2n)} \right]^T \quad (3.26)$$

$$\mathbf{W} = (\mathbf{I} - [\mathbf{w}_m \dots \mathbf{w}_m]) \times \text{diag} \left(W_c^{(0)} \dots W_c^{(2n)} \right) \times (\mathbf{I} - [\mathbf{w}_m \dots \mathbf{w}_m])^T. \quad (3.27)$$

Die Variable \mathbf{I} ist der Einheitsvektor.

Unscented Kalman Filter Das UKF ist ein zeitdiskreter Filteralgorithmus. Er verwendet die UT für die Berechnung von Gaußschen Näherungen für die Filterlösungen von nichtlinearen optimalen Filterproblemen. Es seien eine Zustands- und eine Messgleichung der folgenden Form gegeben (Särkkä, 2006, S. 68):

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{y}_k = h(\mathbf{x}_k) - \mathbf{v}_k. \quad (3.29)$$

In der Gleichung 3.28 ist $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{n_x}$ der Zustand. In Gleichung 3.29 sind $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{n_y}$ die Beobachtungen.

Prädiktion Es folgen die Prädiktionsschritte des UKF. Vorausgesetzt werden der Initialzustand $\hat{\mathbf{x}}_0$ und seine Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},0}$. Ansonsten gelten die in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Möglichkeiten. Berechnet werden nun die Sigma-Punkte \mathbf{X}_{k-1} analog zu Gleichung 3.21:

$$\mathbf{X}_{k-1} = (\mathbf{m}_{k-1} \quad \mathbf{m}_{k-1} \quad \mathbf{m}_{k-1}) + \sqrt{c} \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k-1}} & -\sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k-1}} \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

Die Ergebnisse werden in die Zustandsgleichung eingesetzt:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \quad (3.31)$$

Es folgt die Berechnung des prädizierten Mittelwerts des Zustands \mathbf{m}_k^- :

$$\mathbf{m}_k^- = \hat{\mathbf{X}}_k \mathbf{w}_m, \quad (3.32)$$

wobei die Berechnung von \mathbf{w}_m gemäß Gleichung 3.26 erfolgt. Anschließend wird die Kofaktormatrix des prädizierten Zustands $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^-$ unter Berücksichtigung des Varianzfortpflanzungsgesetzes ermittelt:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^- = \hat{\mathbf{X}}_k \mathbf{W} \left(\hat{\mathbf{X}}_k \right)^T + \mathbf{Q}_{wv,k-1}. \quad (3.33)$$

Korrektur Aus den prädizierten Mittelwerten und Kofaktormatrizen werden die prädizierten Sigma-Punkte berechnet:

$$\mathbf{X}_k^- = (\mathbf{m}_k^- \quad \mathbf{m}_k^- \quad \mathbf{m}_k^-) + \sqrt{c} \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k-1}} & -\sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k-1}} \end{pmatrix}. \quad (3.34)$$

Diese werden in die Messgleichung eingesetzt und ergeben den prädizierten Beobachtungsvektor \mathbf{Y}_k^- :

$$\mathbf{Y}_k^- = h(\mathbf{X}_k^-). \quad (3.35)$$

Damit kann das prädizierte Mittel $\boldsymbol{\mu}_k$ berechnet werden:

$$\boldsymbol{\mu}_k = \mathbf{Y}_k^- \mathbf{w}_m. \quad (3.36)$$

Aus der Differenz der Beobachtungen \mathbf{y}_k und dem prädizierten Mittel $\boldsymbol{\mu}_k$ wird die Innovation berechnet:

$$\mathbf{i}_k = \mathbf{y}_k - \boldsymbol{\mu}_k. \quad (3.37)$$

Die zu dem prädizierten Mittel gehörende Kofaktormatrix \mathbf{S}_k folgt nach:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{Y}_k^- \mathbf{W} (\mathbf{Y}_k^-)^T + \mathbf{Q}_{ll,k}. \quad (3.38)$$

Es schließt sich die Berechnung der Kreuzkovarianzmatrix \mathbf{C}_k an. Sie verbindet die Zustands- und Messgleichung:

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{X}_k^- \mathbf{W} (\mathbf{Y}_k^-)^T. \quad (3.39)$$

Die Darstellung von $\boldsymbol{\mu}_k$, \mathbf{S}_k und \mathbf{C}_k erfolgte in Vektor-/Matrixform. In der Summenschreibweise steht vor den dann weniger kompakten Termen die mit den Gewichten, siehe Formel 3.20, also $\approx 1/(2n)$, multipliziert werden, jeweils ein Summenzeichen: $\sum_{i=0}^{2n}$. In dieser Darstellungsform wird besser erkennbar, dass arithmetische Mittel gebildet werden.

Alle erforderlichen Schritte für die Berechnung des Filter gains wurden ausgeführt. Es folgt die Berechnung des Kalman gains \mathbf{K}_k :

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{S}_k^{-1} \quad (3.40)$$

sowie des gefilterten Zustands $\hat{\mathbf{x}}_k^+$:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k^- - \boldsymbol{\mu}_k) = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \mathbf{i}_k, \quad (3.41)$$

in dem, wie in der Gleichung 3.13 des KF-Algorithmus, die Innovation \mathbf{i}_k enthalten ist. Und die zugehörige gefilterte Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^+$:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^+ = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^- - \mathbf{K}_k \mathbf{S}_k \mathbf{K}_k^T. \quad (3.42)$$

Der Übersicht halber wird das UKF in Algorithmus 3.1 dargestellt (Thrun et al. (2005, S. 70), Wan und van der Merwe (2000)), wobei dieser über $k = 1$ bis N Epochen läuft.

Zusammenfassend lassen sich folgende vorwiegend positiven Eigenschaften für das UKF nennen (Thrun et al., 2005, S. 69 ff.):

- Für die Berechnungen werden keine Ableitungen der Modellfunktionen benötigt.
- Der Approximationsfehler nichtlinearer Funktionen des UKF ist gegenüber dem EKF geringer. Grund ist die genauere Berechnung des UKF bis zum zweiten Taylorglied.
- Der Vorteil der UT gegenüber der auf der Taylorentwicklung basierenden Approximation beruht auf der besseren Erfassung der Momente höherer Ordnung aufgrund der nicht linearen Transformation (Hartikainen et al., 2011, S. 26)
- Im Gegensatz zu dem Partikelfilter, bei dem die Punkte zufällig gewählt werden, erfolgt die

Bestimmung der Sigma-Punkte deterministisch. Dies führt dazu, dass bei einer annähernden Gauß-Verteilung das UKF gut approximiert.

- Das UKF liefert im Fall von linearen Funktionen genauso gute Ergebnisse wie das KF.
- Das UKF kann gegenüber dem EKF etwas rechenintensiver sein.

Algorithmus 3.1 : UKF Algorithmus mit seinen grundlegenden Berechnungsschritten (Särkkä, 2008).

1 Initialisierung

2 Initialisierung für $k = 1$: $\hat{\mathbf{x}}_0$ und $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},0}$

3 for $k=1, \dots, N$ **do**

4 **Prädiktion**

5 **Eingang:** \mathbf{w}_m, \mathbf{W}

6 $\mathbf{X}_{k-1} = (\mathbf{m}_{k-1} \quad \mathbf{m}_{k-1} \quad \mathbf{m}_{k-1}) + \sqrt{c} (0 \quad \sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k-1}} \quad -\sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k-1}})$ // Gl. 3.30

7 $\hat{\mathbf{X}}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{u}_k)$ // Gl. 3.31

8 $\mathbf{m}_k^- = \hat{\mathbf{X}}_k \mathbf{w}_m$ // Gl. 3.32

9 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^- = \hat{\mathbf{X}}_k \mathbf{W} (\hat{\mathbf{X}}_k)^T + \mathbf{Q}_{\mathbf{w}\mathbf{w},k-1}$ // Gl. 3.33

10 **Ergebnis:** $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^-, \hat{\mathbf{x}}_k^-$

11 **Filterung**

12 **Eingang:** $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^-, \hat{\mathbf{x}}_k^-, \mathbf{y}_k^-, \mathbf{w}_m^-, \mathbf{W}^-$

13 $\mathbf{X}_k^- = (\mathbf{m}_k^- \quad \mathbf{m}_k^- \quad \mathbf{m}_k^-) + \sqrt{c} (0 \quad \sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^-} \quad -\sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^-})$ // Gl. 3.34

14 $\boldsymbol{\mu}_k = \mathbf{Y}_k^- \mathbf{w}_m$ // Gl. 3.36

15 $\mathbf{i}_k = \mathbf{y}_k - \boldsymbol{\mu}_k$ // Gl. 3.37

16 $\mathbf{S}_k = \mathbf{Y}_k^- \mathbf{W} (\mathbf{Y}_k^-)^T + \mathbf{Q}_{ll,k}$ // Gl. 3.38

17 $\mathbf{C}_k = \mathbf{X}_k^- \mathbf{W} (\mathbf{Y}_k^-)^T$ // Gl. 3.39

18 $\mathbf{K}_k = \mathbf{C}_k (\mathbf{S}_k)^{-1}$ // Gl. 3.40

19 $\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \mathbf{i}_k$ // Gl. 3.41

20 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^+ = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^- - \mathbf{K}_k \mathbf{S}_k \mathbf{K}_k^T$ // Gl. 3.42

21 **Ergebnis:** Der Zustandsvektor und seine Kofaktormatrix: $\hat{\mathbf{x}}_k^+, \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^+$

Bedingt durch die Echtzeitfähigkeit werden von den Filtern bei der Prädiktion immer nur die zurückliegenden Beobachtungen berücksichtigt. Die Filter wissen nicht, welchen Einfluss die zukünftigen Beobachtungen haben. Zu diesem Zweck wurden Theorien entwickelt, die dann zwar nicht mehr in Echtzeit, aber dafür sich die Informationen der vorausliegenden Beobachtungen zu Nutze machen. Eine mögliche Lösung wird in dem folgenden Abschnitt 3.1.6 beschrieben.

3.1.6 Unscented Rauch Tung Striebel Smoother

In Abbildung 3.2 werden drei Arten von Schätzproblemen gegenüber gestellt.

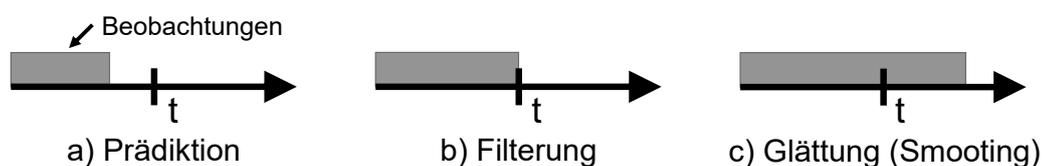


Abbildung 3.2: Drei Arten von Schätzproblemen, nach Gelb (1974, S. 3) modifiziert.

Stimmt der Zeitpunkt t , zu dem eine Schätzung bestimmt werden soll, mit der letzten Beobachtung überein, handelt es sich um eine Filterung. Stehen für den zu schätzenden Zustand noch keine Beobachtungen zur Verfügung, dann heißt die Schätzung Prädiktion. Liegt die zu bestimmende Schätzung innerhalb der verfügbaren Beobachtungen, spricht man von einer Glättung (engl.: smoothing). Hier gehen die meisten Informationen in die Berechnung ein. Es ist nachvollziehbar, dass diese Art der Schätzung die genaueste ist (Gelb, 1974, S. 3).

Das Smoothing ist kein Verfahren für eine Echtzeitauswertung. Es werden alle Beobachtungen $0 \leq k \leq N$, mit $N = \text{Anzahl der Epochen}$, verwendet, um zu einem bestimmten Zeitpunkt k den Zustand eines Systems zu schätzen. Die geglätteten Zustände $\mathbf{x}(k)$ basieren auf den Epochen von 0 bis N . Werden die Beobachtungen rekursiv von der ersten bis zur letzten Epoche gefiltert, wird das als Vorwärtsdurchlauf (engl.: forward running filter (FRF)) und das Ergebnis $\hat{\mathbf{x}}_{FRF}(k)$ bezeichnet. Bei der Filterung werden immer nur die zurückliegenden Werte berücksichtigt, im Voraus liegende Messwerte bleiben unberücksichtigt. Ein optimaler Smoother kombiniert zwei optimale Filter. Für optimale Schätzwerte zu allen Zeitpunkten k müssen alle Werte nochmal prozessiert werden, diesmal in umgekehrter Folge. Die Verarbeitung wird Rückwärtsdurchlauf (engl.: backward running filter (BRF)) genannt, das Ergebnis des BRFs erzeugt die Schätzung $\hat{\mathbf{x}}_{BRF}(k)$. Alle Informationen können nun durch eine geeignete Mittelung von FRF und BRF für die Schätzwerte und deren Kovarianzen verwendet werden (Gelb, 1974, S. 156). Optimalerweise erfolgt die Verarbeitung von BRF und Smoothing in einem Schritt. Eine geeignete Lösung stellt der Rauch-Tung-Striebel Smoother (RTSS) dar. Nachdem zunächst der FRF durchgelaufen ist, erfolgt die Verarbeitung mit dem RTSS von der letzten bis zur ersten Epoche. Rekursiv werden nach dem prädizierten Zustand $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ (Formel 3.9), der zugehörigen Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^-$ (Formel 3.10), der Kofaktormatrix des gefilterten Zustands $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_k}^+$ (Formel 3.15) und dem dynamischen Bewegungsmodell \mathbf{T}_k der Smoother gain \mathbf{G}_k (Formel 3.43), der geglättete Zustand $\hat{\mathbf{x}}_k^{+s}$ (Formel 3.44) und die zugehörige Kovarianzmatrix $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^{+s}$ (Formel 3.45) berechnet:

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^+ \mathbf{T}_k \left(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^- \right)^{-1}, \quad (3.43)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{+s} = \hat{\mathbf{x}}_k^+ + \mathbf{G}_k \left(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^{+s} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- \right), \quad (3.44)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^{+s} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_k}^+ + \mathbf{G}_k \left(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^{+s} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^- \right). \quad (3.45)$$

Der URTSS ist ein auf gaußscher Approximation basierender Smoother. Die übliche Linearisierung, z. B. bei einem EKF, wird durch eine UT ersetzt (Särkkä, 2006, S. 69) und wurde z. B. in Wan und van der Merwe (2001) vorgestellt. Die Formeln können direkt von dem EKF Smoother abgeleitet werden.

Der URTSS beginnt wie der KF mit der Prädiktion. Es werden die Sigma Punkte \mathbf{X}_k (Algorithmus 3.2, Z. 6) berechnet. Es folgt die Propagierung der Sigma Punkte durch das dynamische Modell ($\tilde{\mathbf{X}}_{k+1}$, Algorithmus 3.2, Z. 7). Danach werden der prädizierte Zustand $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ (Algorithmus 3.2, Z. 8), die prädizierte Kovarianz $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^-$ (Algorithmus 3.2, Z. 9) und die Kreuzkovarianz \mathbf{C}_{k+1} (Algorithmus 3.2, Z. 10) berechnet.

Im rekursiven Glättungsschritt folgt die Berechnung des Smoother gains \mathbf{D}_k (Algorithmus 3.2, Z. 14) sowie schließlich der Ergebnisse Smoother Zustand $\hat{\mathbf{x}}_k^{+s}$ (Algorithmus 3.2, Z. 15) und der zugehörigen Kovarianz $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^{+s}$ (Algorithmus 3.2, Z. 16). Der URTSS wird in dem Algorithmus 3.2 zusammenfassend dargestellt.

3.1.7 Fazit

Kalman-Filter sind dafür ausgelegt und gut geeignet Daten aus verschiedenen Quellen zu fusionieren (Meister, 2010, S. 41). Aufgrund ihres Designs können sie physikalische Modelle berücksichtigen und Zustände zu beliebigen Zeitpunkten bestimmen. Eine Besonderheit ist, dass die Filter echtzeitfähig sind und aus vorhandenen Informationen in einem zeitlichen Kontext Vorhersagen zu Zuständen

Algorithmus 3.2 : URTSS Algorithmus mit seinen grundlegenden Berechnungsschritten (Särkkä, 2008).

```

1 Initialisierung
2   └─ Initialisierung für  $k = N$ : ...
3 for  $k=N, \dots, 1$  do
4   Prädiktion
5     Eingang:  $w_m, \mathbf{W}$ 
6      $\mathbf{X}_k = (\tilde{x}_k \quad \tilde{y}_k \quad \tilde{z}_k) + \sqrt{c} (0 \quad \sqrt{Q_k} \quad -\sqrt{Q_k})$ 
7      $\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = f(\mathbf{X}_k, \mathbf{u}_k)$ 
8      $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^- \mathbf{w}_m$ 
9      $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^- = \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^- \mathbf{W} (\hat{\mathbf{X}}_{k+1}^-)^T$ 
10     $\mathbf{C}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^- \mathbf{W} (\hat{\mathbf{X}}_k)^T$ 
11    Ergebnis:
12  Rekursive Glättung
13    Eingang:  $\mathbf{C}_{k+1}, \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^-, \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ 
14     $\mathbf{D}_k = \mathbf{C}_{k+1} (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^-)^{-1}$ 
15     $\hat{\mathbf{x}}_k^{+s} = \hat{\mathbf{x}}_k^+ + \mathbf{D}_k (\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^{+s} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-)$ 
16     $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^{+s} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^+ + \mathbf{D}_k (\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^{+s} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1}^-)$ 
17    Ergebnis: Geglätteter Systemzustand und seine Kofaktormatrix:  $\hat{\mathbf{x}}_k^{+s}, \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}^{+s}$ 

```

treffen. Ist Echtzeit nicht unbedingt erforderlich, steht mit dem RTSS ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem durch das Wissen aus dem FRF präzisere Ergebnisse möglich sind.

3.2 Geometrische Modellierung von Kurven

Für die Bestimmung der in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Zustandsgrößen ist die Kenntnis der Lage des Profils im Raum notwendig. Von einem Lasertracker oder Tachymeter gemessene 3D Punkte entlang des Profils können die hierfür erforderlichen Informationen liefern. Bei der Überprüfung der Parallelität von nebeneinander liegenden Profilen, wie sie bei einer Kranbahn vorkommen, müssen die Lage beschreibende 3D Punkte zur möglichen Toleranzprüfung, z. B. gemäß VDI 3576, auf einer Bezugsachse orthogonal zueinander liegen. Bei einer manuellen Aufnahme von Referenzpunkten kann die Lage der Punkte beispielsweise durch eine Absteckung so gewählt werden, dass sie orthogonal zueinander liegen. Die Berechnung der in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Zustandsgrößen kann dann direkt erfolgen. Mindestens bei einer kinematischen Vermessung (vgl. Abschnitt 2.3.5) ist es jedoch erforderlich, die gemessenen Punkte der Wegstrecke in einem kontinuierlichen mathematischen Modell zu modellieren. Auf dieser Grundlage können im Verlauf der weiteren Auswertung an beliebigen Stationen die Zustandsgrößen ermittelt werden.

Immer wichtiger wurde in den letzten Jahrzehnten die Modellierung von Freiformkurven und -flächen in vielen Bereichen der Informatik und den Ingenieurwissenschaften, z. B. Automotive, Computer Vision und Medizinischen Bildverarbeitung. Insbesondere B-Splines und nicht-uniforme rationale B-Splines (non-uniform rational B-Splines - NURBS) sind für das Reverse Engineering von Bedeutung. Gemessene Punktwolken von Objektoberflächen werden durch B-Spline oder NURBS-Flächen approximiert und können in CAD Systemen weiter verarbeitet werden. Vorteilhaft ist die genaue und bekannte Definition von NURBS-Geometrien, die einen einfachen Austausch und

Verwendbarkeit auch nach vielen Jahren ermöglicht.

Aus den Messwerten entlang des Profils soll mit Hilfe von Kurven der Profilverlauf beschrieben werden. Bei den Profilen handelt es sich in der Regel um gerade Bauteile, deren Verlauf nach der Fertigung daher grundsätzlich stetig ist. Kleinere Abweichungen können durch raue Oberflächen, bei Schienen, z. B. durch Korrosion bedingt, oder größere Abweichungen von der Regelgeometrie durch betriebsbedingte Abnutzungen, Ausbrüche, Stöße oder ähnliches entstehen.

Es soll also ein geeignetes Kurvenmodell gefunden werden, mit dem sich eine Kurve den Messwerten nachweislich bestmöglich approximieren lässt. Die Geodäsie beschäftigt sich hierfür intensiv mit dem Umgang von Ausreißern, Datenlücken und der Modellwahl, was für die Lösung dieser Aufgabe prädestiniert ist.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Ansätze zur Auswertung von Kurven erläutert. Die Beschreibung des funktionalen Modells erfolgt zunächst für den 2D Fall. Zum einen kann die mathematische Idee dadurch einfacher nachvollzogen werden, zum anderen basieren darauf die Arbeiten von Brieden (2007) und Schulze (2009), die Polynome (Abschnitt 3.2.1) bzw. Splines (Abschnitt 3.2.2) zur Beschreibung der Geometrie von Kranbahngleisen einsetzen. Abschnitt 3.2.3 schließlich beschreibt eine Auswertung mit B-Splines auf Grundlage von 3D Daten.

3.2.1 Polynome

Mit dem funktionalen Modell eines Polynoms kann der Zusammenhang von Komponenten verteilter Punkte von der Anzahl s einfach beschrieben werden. Die Definition erfolgt gemäß Bureick et al. (2016) und Piegler und Tiller (1997) in Formel 3.46 für den 2D Fall:

$$y_s = \sum_{i=0}^p a_i x_s^i \quad \text{mit dem Kurvenpunkt:} \quad \mathbf{C} = [x_s, y_s]^T. \quad (3.46)$$

In der Formel wird die y -Komponente eines auf einem Polynom liegenden Kurvenpunktes \mathbf{C} berechnet. Die y -Komponente ist die Summe aus dem Produkt des i -ten Koeffizientenparametervektors $\mathbf{a} = [a_0, \dots, a_p]$ und der x -Komponente mit i -ten Exponenten $i \in (0, \dots, p)$.

Polynome vom Grad $p = 1, 2, 3$ oder 4 werden als linear, quadratisch, kubisch bzw. quartisch bezeichnet. Je höher die Gradzahl eines Polynoms ist, desto besser passt sich die Kurve den Messwerten an. Ist die Gradzahl zu hoch gewählt, kann es zu numerischen Instabilitäten bei der Lösung der Ausgleichungsaufgabe und zum Ausschlagen, dem sogenannten Runge-Effekt, sowie einer ungewollten Approximation von Ausreißern kommen. Ein weiterer Nachteil ist, dass lokale Änderungen Einfluss auf den gesamten Kurvenverlauf haben. Folglich sind Polynome für stetig verlaufende Kurven ohne Lücken, Spitzen und abrupte Richtungsänderungen geeignet.

Abbildung 3.3 stellt das Verhalten von Polynomen verschiedenen Grades dar. Obwohl eine Ausgleichungsfunktion 5. Grades (linke Abbildung) keinen der Messwerte trifft, stellt sie eine gute Approximation mit glättendem Charakter dar. Dagegen ist eine Funktion 2. Grades (blaue Kurve, rechte Abbildung) bei der vorgegebenen Lage der Punkte als Ausgleichungsfunktion ungeeignet.

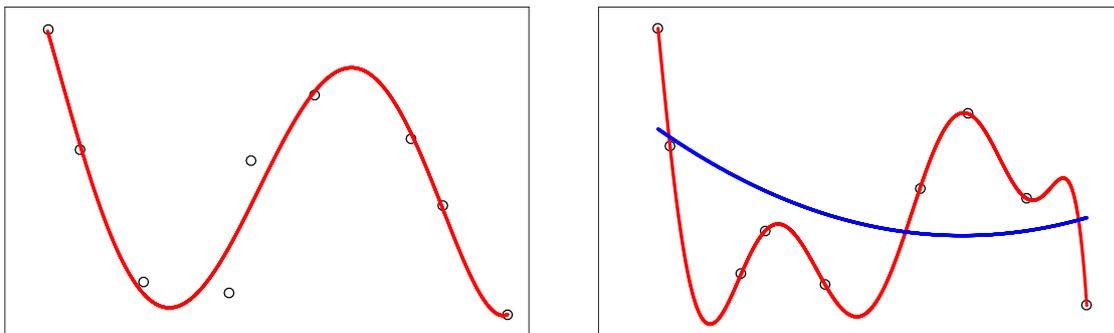


Abbildung 3.3: Verhalten von Polynomen verschiedenen Grades.

Eine Funktion 8. Grades (rote Kurve, rechte Abbildung) ist für 9 Punkte eine Interpolationsfunktion, sie verläuft exakt durch alle Messwerte. Zu erkennen sind allerdings auch die für Polynom-Interpolationen typischen weiten Ausschwingungen.

Bureick et al. (2016) und Schulze (2009) beschreiben das Vorgehen für die Regression von 2D Beobachtungswerten. Während Bureick den Allgemeinfall darstellt, beschreibt Schulze für seinen Anwendungsfall eine quadratische Regression (Polynom 2. Grades). Durch eine Ausgleichung werden die $p + 1$ Parameter $\mathbf{x} = [a_0, \dots, a_p]$ bestimmt.

Das funktionale Modell (Formel 3.46) wird um \mathbf{v} erweitert. Eine Minimierung der Verbesserungsquadratsumme ist nun möglich und die Anforderungen eines Gauß-Markov-Modells (GMM) sind erfüllt. Die Beobachtungen können als lineare Funktion der Parameter dargestellt werden:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x}. \quad (3.47)$$

Die aufzustellende Designmatrix \mathbf{A} ergibt sich aus den partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen (Formel 3.46) nach den Parametern \mathbf{x} :

$$\mathbf{A}_{[s,(p+1)]} = \begin{bmatrix} x_1^0 & \dots & x_1^p \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_s^0 & \dots & x_s^p \end{bmatrix}. \quad (3.48)$$

Die y -Koordinaten der Kurvenpunkte \mathbf{C} stehen in dem Beobachtungsvektor \mathbf{l} :

$$\mathbf{l}_{s,1} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_s \end{bmatrix}. \quad (3.49)$$

Eine Gewichtung der Beobachtungen erfolgt durch die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}_{[s,s]}$. Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}_{[s,s]}$ wird in der Regel durch Invertieren der Kofaktormatrix der Beobachtungen aufgestellt. Sind keine stochastischen Informationen verfügbar oder im Falle von unkorrelierten Punkten mit gleichen Standardabweichungen, wird die Gewichtsmatrix \mathbf{P} durch die Einheitsmatrix \mathbf{I} dargestellt. Wird die Methode der kleinsten Quadrate angewendet, ergeben sich die ausgeglichenen Parameter $\hat{\mathbf{x}}$ wie folgt:

$$\hat{\mathbf{x}}_{[(p+1),1]} = \begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \vdots \\ \hat{a}_p \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}. \quad (3.50)$$

Mit den Ergebnissen können die folgenden Qualitätsmaße berechnet werden. Für die weiteren Berechnungen wird auf Niemeier (2008) verwiesen:

- Standardabweichung der Gewichtseinheit ($\hat{\sigma}_0$), als Maß für die Streuung der Beobachtungen um das funktionale Modell

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}. \quad (3.51)$$

- Kofaktormatrix für die ausgeglichenen Parameter ($\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$):

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}. \quad (3.52)$$

- Kofaktormatrix für die ausgeglichenen Beobachtungen ($\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{y}}\hat{\mathbf{y}}}$)

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{y}}\hat{\mathbf{y}}} = \mathbf{A} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{A}^T. \quad (3.53)$$

- Kofaktormatrix der Verbesserungen ($Q_{\hat{v}\hat{v}}$)

$$Q_{\hat{v}\hat{v}} = Q_{ll} - Q_{\hat{l}\hat{l}}. \quad (3.54)$$

3.2.2 Splines

Die vorgestellten Polynome (Abschnitt 3.2.1) sind für die Beschreibung von stetig verlaufenden Kurven geeignet. Um auch unstetige Kurven durch Polynome darstellen zu können, ist eine Unterteilung erforderlich. Werden an den Stoßstellen (Knoten) bestimmte Bedingungen erfüllt, etwa $(n - 1)$ -fache stetige Differenzierbarkeit, sind die Kriterien eines Splines erfüllt. Entsprechend dieser mathematischen Betrachtung kann ein Spline auch als ein Polynomzug verstanden werden.

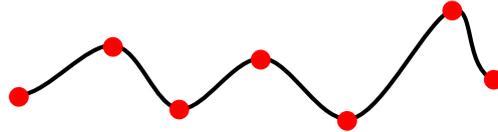


Abbildung 3.4: Darstellung der polynomialen Segmente eines Splines.

Diesen Ansatz haben Brieden (2007) und Schulze (2009) bei der Approximation der Schienenachse gewählt. Beide haben hierfür eine Kurve in gleichlange Segmente unterteilt, in jedem Segment Ausreißer eliminiert und jeweils ein Polynom geschätzt. Es werden zwei Stetigkeitsbedingungen eingeführt. Vermieden werden sollen:

- Sprünge. Erreicht wird dies durch die C_0 Stetigkeit, die an den Übergangsstellen identische Funktionswerte bedingt.
- Knicke. Hierfür muss die Steigung an den Übergangsstellen identisch sein. Sie wird über die erste Ableitung der Funktion bestimmt und als C_1 Stetigkeit bezeichnet.

Die definierten Stetigkeitsbedingungen werden als Restriktionen in das funktionale Modell eingeführt. Aufgrund der voneinander abhängigen Übergangsstellen, erfolgt die Berechnung aller Parameter in einem Ausgleichsmodell. Zur Vertiefung der Vorgehensweise wird auf Schulze (2009, S. 55 ff.) verwiesen.

Datasnooping nach Baarda

Die Rohdaten der Messung des Profilverlaufs müssen während des Auswerteprozesses auf Ausreißer untersucht werden. In diesem Abschnitt werden die Erfahrungen von Brieden und Schulze im Hinblick auf die notwendige Bereinigung von Ausreißern dargestellt. Aufgrund teilweiser falscher Eliminierung und schlecht geschätzter Polynome hat Schulze das Modell von Brieden durch sich überlappende Randbereiche erweitert (Abbildung 3.5).

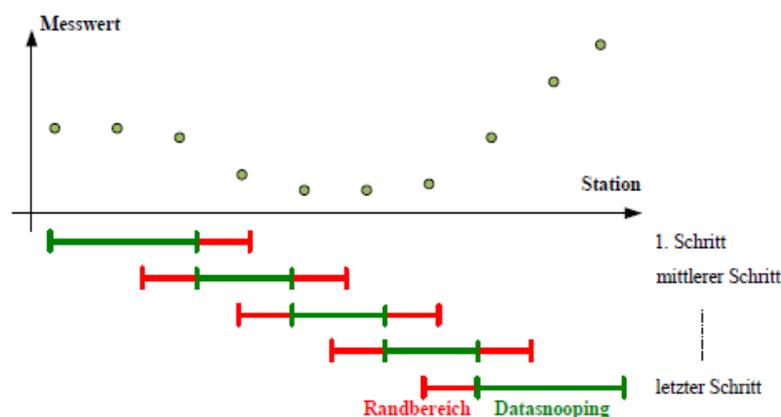


Abbildung 3.5: Prinzipdarstellung der Intervallaufteilung für das Datasnooping (Schulze, 2009, S. 46).

Bei der segmentweisen Schätzung der Polynomparameter werden die Randbereiche in die Schätzung mit einbezogen. Das anschließende Datasnooping nach Baarda (1967) geht von einem einzigen signifikanten Ausreißer aus. In einem iterativen Prozess wird ein Polynom geschätzt und anschließend ein Ausreißer beseitigt. Dies geschieht solange, bis sich keine Ausreißer mehr in dem Datensatz befinden oder bis die Anzahl der Messwerte n kleiner ist als die Anzahl der Parameter $u + 2$. Es erfolgt eine finale Ausgleichung der Polynomparameter für dieses Segment. Das Ergebnis der Segmente mit Randbereichen sind weniger Fehlentscheidungen.

Ein Vorteil der intervallweisen Betrachtung von Brieden und Schulze ist eine deutlich geringere Laufzeitkomplexität als bei der Integration des Ausreißertests in die Ausgleichung (Schulze hat bei 150 Koeffizienten eine 1:2519 schnellere Berechnung ermittelt). Des Weiteren ermöglicht eine intervallweise Vorgehensweise die einfache Abschätzung eines entfernungsabhängigen stochastischen Modells über den a-posteriori Varianzfehler der Ausgleichung.

3.2.3 B-Splines

Profile, z. B. Schienenprofile, sind langgezogene Bauteile mit in der Regel stetigem Verlauf. Nichtsdestotrotz kann es Abschnitte geben, in denen die Stetigkeit unterbrochen wird. Dies können z. B. Ausbrüche am Schienenkopf, Schienenbrüche oder Schienenstöße sein. Eine Änderung der Stetigkeit, insbesondere im Bereich eines Stoßes, kann ihre Ursache auch durch eine Torsion benachbarter Profile zueinander haben. B-Splines haben für die Approximation dieser Kurven optimale Eigenschaften, denn lokale Änderungen haben nur einen lokalen Einfluss (Bureick et al., 2016). Die zuvor beschriebenen Polynome sind nicht optimal für eine Approximation des Verlaufs von Profilen. Splines sind in dem Maße eingeschränkt verwendbar, da lokale Einflüsse sich global auswirken. Die bisher betrachteten Ansätze von Brieden (2007) und Schulze (2009) sehen darüber hinaus eine getrennte Auswertung in Lage und Z-Wert vor. Eine B-Spline Kurve stellt eine bessere Wahl dar. Mit dem Grad p ist sie ein stückweise aus B-Spline Basisfunktionen zusammengesetztes Polynom vom Grad $p - 1$ (Guntermann, 2006). Die Auswertung der Positionen des Messwagens wird dreidimensional, also für Lage und Z-Wert kombiniert, durchgeführt.

Der funktionale Zusammenhang einer B-Spline Kurve ergibt sich aus der Summe der Basisfunktionen multipliziert mit den Kontrollpunkten \mathbf{x} :

$$\mathbf{C}(\bar{u}) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\bar{u}) \mathbf{x}_i \text{ mit } \mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]. \quad (3.55)$$

Zur Berechnung der Basisfunktionen $N_{i,p}(\bar{u})$ haben Boor (1972) und Cox (1972) eine rekursive Funktion eingeführt:

$$N_{i,0}(\bar{u}) := \begin{cases} 1 & \text{wenn } u_i \leq \bar{u} < u_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(\bar{u}) := \frac{\bar{u} - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(\bar{u}) + \frac{u_{i+p+1} - \bar{u}}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\bar{u}). \quad (3.56)$$

Hierbei beeinflussen der Lokalisierungsparameter \bar{u} , der Grad p , sowie der Knotenvektor \mathbf{U} die Berechnung der Basisfunktion. Der Knotenvektor \mathbf{U} beinhaltet die Anzahl $m + 1$ Knoten, mit $m = n + p + 1$, in aufsteigender Folge:

$$\mathbf{U} = |u_0, \dots, u_m| \text{ mit } u_i \leq u_{i+1}, \quad i \in (0, \dots, m - 1). \quad (3.57)$$

Die Knoten können in interne und externe unterteilt werden. Die ersten $p + 1$ Knoten mit dem Wert 0 und die letzten $p + 1$ Knoten mit dem Wert 1 werden als externe Knoten bezeichnet. An jedem externen Knoten beginnt oder endet eine Basisfunktion. An den übrigen Knoten, den internen, fängt eine Basisfunktion an und eine andere endet dort (Abbildung 3.6).

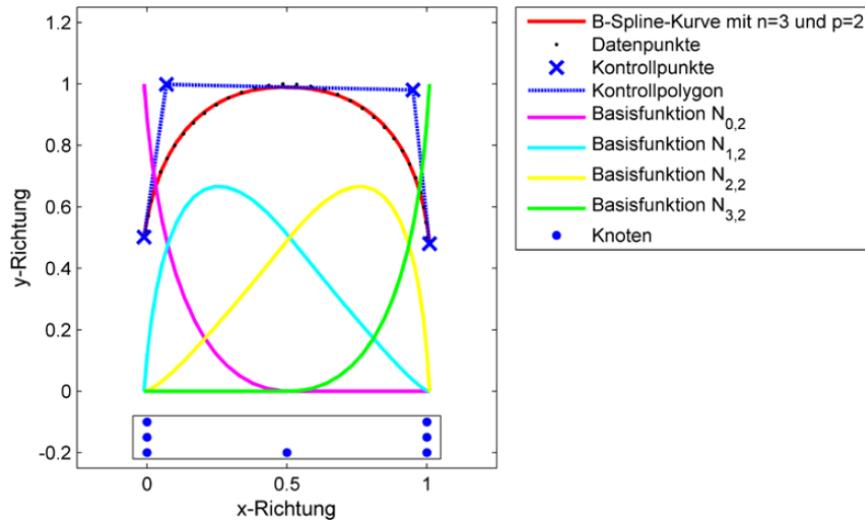


Abbildung 3.6: Beispiel für eine B-Spline Kurve und ihre Einflussparameter (Golnik, 2016).

Für die Bestimmung eines B-Splines müssen im Rahmen eines Ausgleichsprozesses der Grad p , die Anzahl der Kontrollpunkte $n + 1$, die Lokalisierungsparameter \bar{u} , der Knotenvektor \mathbf{U} und die Kontrollpunkte \mathbf{x} bestimmt werden.

In der Literatur (Bureick et al., 2016; Gálvez et al., 2015; Piegler und Tiller, 1997) erfolgt die Approximierung einer 3D Punktwolke durch eine B-Spline Kurve in vier Schritten:

1. Parametrisierung der Daten durch die Berechnung des Lokalisierungsparameters \bar{u} für alle 3D Punkte.
2. Bestimmung des Knotenvektors \mathbf{U} . Die Position der Knoten ist wichtig, da sie die durch die Basisfunktionen beeinflussten Flächen festlegen. Für die Bestimmung gibt es viele Lösungsansätze.
3. Bestimmung der Kontrollpunkte \mathbf{x} . Nachdem die beiden vorherigen Schritte ausgeführt wurden, erfolgt die Modellierung in einem GMM und die Schätzung der Kontrollpunkte.
4. Bureick et al. (2016) hält noch einen vierten Schritt für bedeutsam. Er ist eigentlich ein Teilschritt von Punkt 3 und ist insbesondere im Hinblick auf geodätische Aufgabenstellungen wichtig. Es geht hierbei um die Modellwahl, also die Anpassung der Zahl der Kontrollpunkte $n + 1$ und des Grades p , während des Approximierungsprozesses.

Zu 1.: Der Lokalisierungsparameter \bar{u} ist ein Skalarwert, der für jeden Punkt der sortierten Punktwolke berechnet wird und dessen Position auf der Kurve beschreibt. In Piegler und Tiller (1997, S. 364–365) werden drei Methoden für die Berechnung von \bar{u} beschrieben: gleicher Abstand, Sehnenlänge und Schwerpunkt. Für die Beschreibung der Längsachse von Profilen wird die Sehnenlänge angewendet, da sie am häufigsten verwendet wird. Für die Parametrisierung der Messwerte wird der euklidische Abstand zweier aufeinanderfolgenden Beobachtungen durch die Summe des Abstands aller sortierten Beobachtungen geteilt. Bei Bedarf kann die Methode durch jede andere ersetzt werden.

Zu 2.: Wie bereits erwähnt ist die Bestimmung des Knotenvektors \mathbf{U} ein wichtiger Teilschritt zur Beeinflussung eines B-Splines. Der Knotenvektor definiert durch seine Knoten das Ende und/oder den Anfang eines Bereichs, der durch eine Basisfunktion beeinflusst wird. Bureick et al. (2016) begründen damit den lokalen Einfluss von lokalen Änderungen bei einem B-Spline.

Nach allgemeiner Auffassung ist eine direkte Bestimmung des Knotenvektors schwierig, da es keine analytische Darstellung für die optimalen Knotenpositionen und viele lokale Optima der Funktion bei einer Schätzung der Kontrollpunkte mit der Methode der kleinsten Quadrate gibt. In vielen wissenschaftlichen Beiträgen wurde sich mit dieser Aufgabenstellung auseinandergesetzt (Bureick et al., 2016; Gálvez et al., 2015; Park und Leeb, 2007; Piegler und Tiller, 1997).

Der Vorschlag von Piegl und Tiller (1997) ist einfach und schnell. Er basiert darauf die Knoten an den Lokalisierungsparametern \bar{u} auszurichten. Dies hat zur Folge, dass sich Knoten an den Stellen befinden, an denen sich auch viele Datenpunkte, bzw. Lokalisierungsparameter \bar{u} befinden. Für die Beschreibung des Verlaufs eines Profils ist diese Lösung geeignet, eher weniger jedoch für die Beschreibung von Punktwolken mit scharfen Kanten, Spitzen oder Datenlücken.

Zu 3.: Sind Parameter des Grad p , die Anzahl der Kontrollpunkte $n + 1$, die Lokalisierungsparameter \bar{u} und der Knotenvektor \mathbf{U} bestimmt, kann die Modellierung der Kontrollpunkte \mathbf{x} in einem GMM erfolgen. Die aufzustellende Designmatrix \mathbf{A} beinhaltet die Basisfunktionen des B-Splines:

$$\mathbf{A}_{[s,(n+1)]} = \begin{bmatrix} N_{0,p}(\bar{u}_1) & \dots & N_{n,p}(\bar{u}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,p}(\bar{u}_s) & \dots & N_{n,p}(\bar{u}_s) \end{bmatrix}. \quad (3.58)$$

Die Schätzung der Kontrollpunkte \mathbf{x} erfolgt gemäß Formel 3.59. In dem Beobachtungsvektor \mathbf{l} stehen die sortierten s Beobachtungen der Punktwolke \mathbf{Q} . $\mathbf{P}_{[s,s]}$ ist die Gewichtsmatrix, für die im Falle von nicht korrelierten Beobachtungen mit gleichen Genauigkeiten die Einheitsmatrix \mathbf{I} gewählt werden kann. Die Berechnung des geschätzten Kontrollpunktvektors $\hat{\mathbf{x}}$ erfolgt spaltenweise getrennt nach x , y und z :

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_{x,0} & x_{y,0} & x_{z,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{x,n} & x_{y,n} & x_{z,n} \end{bmatrix} = \left(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$$

mit $\mathbf{l}_{s,2} = \begin{bmatrix} Q_{x,1} & Q_{y,1} & Q_{z,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{x,s} & Q_{y,s} & Q_{z,s} \end{bmatrix}$. (3.59)

Es ist zu erwähnen, dass Bureick et al. die fehlende Robustheit gegen Ausreißer bei der Berechnung nach den kleinsten Quadraten feststellen. Sie schlagen eine Schätzung mit robusten Schätzern, wie z. B. dem Huber-Schätzer, vor.

Zu 4.: Üblicherweise werden die Anzahl der Kontrollpunkte $n + 1$ und der Grad p der Basisfunktion manuell gewählt. Laut Gálvez et al. (2015) hat z. B. der Grad p typischerweise den Wert drei. Durch Anpassung des Grades p und der Kontrollpunkte $n + 1$ kann die Qualität der Approximierung beeinflusst werden. Bureick et al. (2016) betonen, dass die richtige Wahl ein Kompromiss zwischen einer hohen Anzahl an Parametern und einer guten Approximierung ist. Der Algorithmus zur Bestimmung der Profilachse basiert auf einem Bestrafungskriterium („penalisation criteria“) in der zu minimierenden Zielfunktion. Weitere Möglichkeiten die Parameter zu ermitteln, sind laut Bureick et al. (2016) Signifikanztests oder die Anwendung der statistischen Lerntheorie (statistical learning theory (SLT)).

4 Profilvermessungssystem

In diesem Kapitel werden aufbauend auf neue, zu ermittelnde Zustandsgrößen (Abschnitt 4.1) die dafür erforderliche Sensorik diskutiert (Abschnitt 4.2). Die Sensorik zur Erfassung des unmittelbaren Umfelds, wie Schiene, Schienenbefestigung und Schienenstöße, ist deutlich umfangreicher als die bisherige, so dass ein geeignetes Fahrzeug für den Transport notwendig ist. Dieses PVS wird in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Im Abschnitt 4.4 werden die in Verbindung mit den ausgewählten Sensoren erzielbaren Messunsicherheiten dargestellt. Eine Notwendigkeit ist die Synchronisierung und Speicherung der Daten (Abschnitt 4.5). In dem Abschnitt 4.6 wird auf die Kalibrierung der Sensoren eingegangen.

4.1 Neue Zustandsgrößen

Für die objektive Beschreibung des Ist-Zustands einer Kranbahn ist die Definition zusätzlicher Zustandsgrößen, neben den z. B. aus der VDI 3576 bekannten, erforderlich. Ein PVS ermöglicht eine umfangreichere Erfassung und Dokumentation des Ist-Zustandes einer Kranbahn, als es bisher möglich war.

Theoretische und praktische Schienenachse Die in den Richtlinien (z. B. VDI 3576:2011-03 oder ISO 12488-1:2012-07) aufgeführten Zustandsgrößen beziehen sich auf die Schienenachse. Abhängig von dem Messzubehör kann sie direkt (Abbildung 4.1a) oder indirekt über die Schienenkante und einen Offset (Abbildung 4.1b) bestimmt werden. Bei ersterem wird das „direkte“ Maß bei vorhandenem kalt verformtem Schienenkopf (Schienengrat) verfälscht. Bei letzterem werden die Punkte in Bezug auf die Schienenkopfkante ermittelt und dann durch einen Offset korrigiert. Welche Schienenkante taktil erfasst wird, entweder die augenscheinlich abgenutzte oder die ohne Abnutzung, wird im besten Fall mit dem Auftraggeber abgestimmt und dokumentiert.



(a) Spezielle Schienenschere (Molčan, 2014) für die direkte Messung der Schienenachse. Der Reflektor ist auf der Abbildung nicht dargestellt.



(b) Gleismesswinkel mit Reflektor auf einer Schiene. Der Winkel kann mit Hilfe einer Dosenlibelle horizontalisiert werden. Die Darstellung des Winkels lehnt sich an ein Produkt von GOE-CKE GmbH & Co KG (2017) an.

Abbildung 4.1: Hilfsmittel für die direkte (4.1a) und indirekte (4.1b) Bestimmung der Schienenachse. Mit letzterem kann die Schienenkopfkante direkt bestimmt werden.

Bei beiden Methoden ist es schwierig, den Abnutzungszustand der Schienenköpfe zu berücksichtigen. Noch komplizierter wird es, wenn die Abnutzung des Schienenkopfes aufgrund eines wandernden Spurkranzes im Verlauf die Seite wechselt. Missverständnisse und falsche Interpretationen können die Folge sein.

Eine Eindeutigkeit der Schienenachse ist gegeben, wenn der tatsächliche Schienenkopfquerschnitt durchgängig vermessen wird. Eingeführt werden sollen an dieser Stelle die Begriffe der theoretischen und praktischen Schienenachse (Abbildung 4.2). Die praktische Schienenachse bezeichnet die Achse der abgefahrenen Schiene. Die theoretische Schienenachse ist die des nicht abgenutzten Schienenkopfes. Mit den in Abbildung 4.2 dargestellten vier Kanten: linke Schienenkante (lsk), rechte Schienenkante (rsk), abgenutzte linke Schienenkante ($alsk$) und abgenutzte rechte Schienenkante ($arsk$) kann der Abstand der theoretischen Schienenachse von jeder Kante (Gleichung 4.1) und der Abstand der praktischen Schienenachse von jeder Kante gemäß Gleichung 4.2 berechnet werden:

$$d_{\text{theoretische Schienenachse}} := \frac{(rsk - lsk)}{2} \quad (4.1)$$

$$d_{\text{praktische Schienenachse}} := \frac{(arsk - alsk)}{2} \quad (4.2)$$

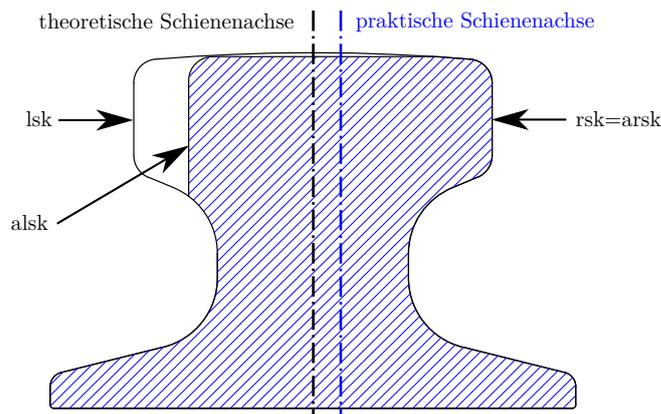
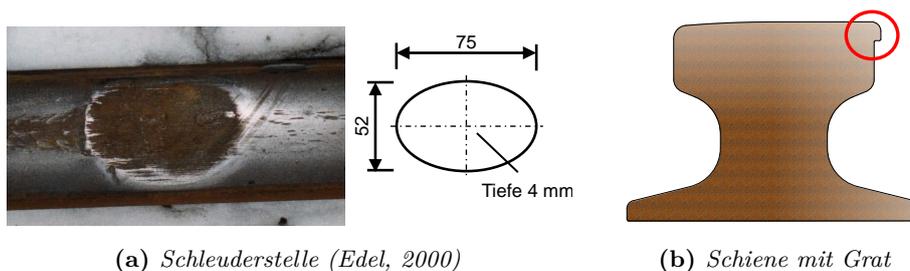


Abbildung 4.2: Querschnitt eines abgenutzten Schienenprofils (blau schraffiert) zur Darstellung der theoretischen (schwarz) und praktischen Schienenachse (blau)

Verschleiß des Schienenprofils Der Verschleiß des Schienenprofils (Abbildung 4.3) kann mehrere Ursachen haben: zu hohe Lasten, schlechte Ausrichtung der Kranbahn, unplanmäßige Beanspruchung durch den Kran (z. B. durch Überschreitung von Toleranzen gemäß ISO 12488-1:2005-04) oder eine falsche Materialpaarung Rad-Schiene. Die Folgen können plastische Verformung oder Materialab-



(a) Schleuderstelle (Edel, 2000)

(b) Schiene mit Grat

Abbildung 4.3: Möglicher Verschleiß von Schienenprofilen

tragung im Bereich des Schienenkopfes sein. Durch die Querschnittsveränderung ändert sich die mögliche statische Aufnahmelast, was wiederum zu einem Schienenbruch oder einer Veränderung des Spurlaufs führen kann. Zusätzliche Beanspruchungen, die auf den Unterbau wirken, sind die Folge. Als Zustandsgrößen können die Schienenkopfbreite, die Schienenhöhe, die Breite von Grat und auf welcher Seite des Schienenkopfes er sich befindet, definiert werden.

Schienenstöße Abhängig von der Bearbeitung der Schienenenden, der Verbindung mit der anschließenden Schiene oder Walztoleranzen kann es zu Stetigkeitssprüngen im Bereich der Schienenstöße (Abbildung 4.4) kommen. Daher sind ihre Position und ihre Bauart (Schrägstoß, 90° Stoß, Stufenstoß, Verbindung durch Schweißen oder Laschen etc.) von Interesse.



Abbildung 4.4: gebrochener Schienenstoß (Wikipedia, 2013)

Schienenbefestigungen Für den Betrieb einer Kranbahn ist die Kenntnis über die Position und den Zustand der Schienenbefestigung (Abbildung 4.5) essentiell. Bei nicht fachgerechter Montage der Schienenbefestigungen liegen sie unter Umständen von Beginn an nicht richtig am Schienenfuß an oder die Verbindungen lösen sich. Die Folge ist, dass das Profil horizontal nicht gegen Bewegung gesichert ist. Während des Betriebs kann das Spiel sich vergrößern und die Bewegungen immer größer werden. Erhöhter Verschleiß, ein Ausfall der Anlage und im schlimmsten Fall ein Unfall mit Personenschaden können die Folgen sein.

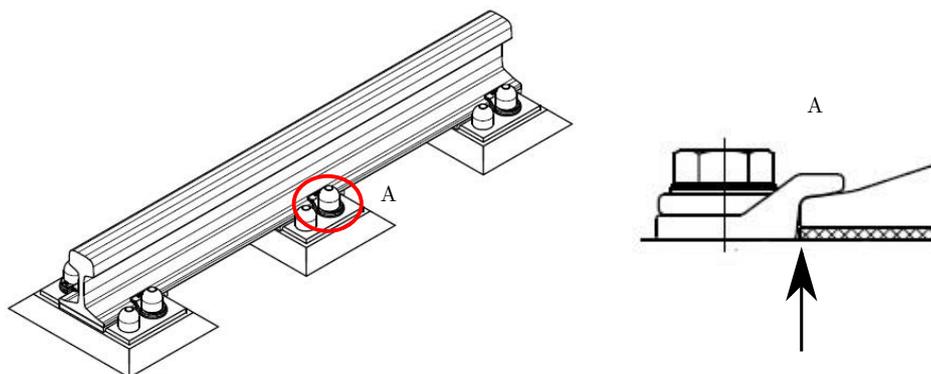


Abbildung 4.5: Kranschiene mit korrekt montierter Schienenbefestigung (ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2010)

Abstand der Messpunkte in Schienenlängsrichtung In den Richtlinien wird nicht direkt ein Abstand der Messpunkte vorgegeben, indirekt dadurch, dass sich das Maß c oder b auf eine 2-Meter Basis bezieht (siehe Abschnitt 2.2.3). Der Mindestabstand der Messpunkte beträgt einen Meter.

In der älteren Literatur und vermutlich bedingt durch die technischen Möglichkeiten ist folgende Angabe zu finden (Hennecke und Werner, 1982, S. 422): Der Abstand der Schienenmesspunkte soll in Abstimmung mit dem Auftraggeber erfolgen. Üblicherweise beträgt der Abstand am Boden 5 bis 10 m. Bei Lagerkranbahnen, also erhöht liegenden Kranbahnen, werden alle über den Stützen liegenden Punkte in die Messung einbezogen.

Sollen alle in Tabelle 4.1 aufgelisteten Zustandsgrößen erfasst werden, dann ist eine deutlich umfangreichere Erfassung notwendig. Die kleinste zu erfassende Größe sind Risse.

Vermessung im belasteten und unbelasteten Zustand Zu einer umfassenden Bewertung einer Kranbahn gehört die Kenntnis über das Verhalten im belasteten und unbelasteten Zustand (Abbildung 4.6). Eine Kranbahn, die im unbelasteten Zustand vermessen wird, kann im belasteten Zustand eine entscheidend andere Lage bzw. Z-Werte (ΔH) haben. Abnutzungen und Auslastung können mit diesem Wissen zuverlässiger erklärt werden. Aus diesem Grund müssen die auf die Lage und Z-Werte bezogenen Zustandsgrößen (z. B. in VDI 3576:2011-03) für beide Zustände ermittelt werden (vgl. auch Neumann und Dennig (2011)).

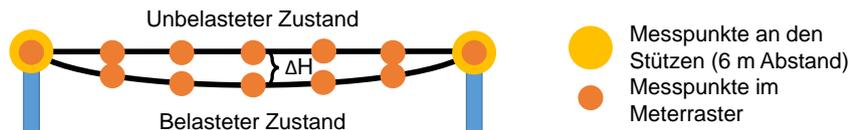


Abbildung 4.6: Vorteil einer höheren Anzahl von Messpunkten: sowohl für den unbelasteten Zustand, als auch bei einer Messung im belasteten Zustand.

Darstellung der Zustandsgrößen Die nachfolgende Tabelle 4.1 fasst die zuvor beschriebenen Zustandsgrößen tabellarisch zusammen:

Tabelle 4.1: Zustandsgrößen einer Kranbahnvermessung gemäß bekannter Richtlinien (Alt) und mit umfangreicherer Sensorik automatisiert erfassbare zusätzliche (Neu).

	Zustandsgröße	Achsen	Bezug	Unsicherheit	Sensor	
Alt	Lage der Schiene	X, Y	absolut	Submillimeter	Lasertracker, optional PLS	
	Höhe der Schiene	X, Z				
	Position und Höhe benachbarter Schienen	X, Y, Z	absolut	$<0,01^\circ$	Lasertracker, Inklinometer	
	Querneigung des Schienenkopfes	Y, Z				
Neigung des Schienenkopfes in Schienenlängsrichtung	X, Z		$<0,06^\circ$			
Neu	Praktische und theoretische Schienenachse	X, Y, Z	absolut	Submillimeter	Lasertracker, PLS	
	Ausbruch am Schienenkopf	X, Y, Z	absolut, relativ	Zentimeter (X), Submillimeter (Y,Z)	Lasertracker oder Odometer, PLS, Kamera	
	Schleuderstelle					
	Grat am Schienenkopf					
	Längs- und Querrisse im Schienenkopf					
	Schienenhöhe	X, Z	absolut, relativ	Zentimeter (X), Submillimeter (Z)	Lasertracker oder Odometer, PLS	
	Pos. der Schienenbefestigung	X	absolut	Millimeter	Lasertracker oder Odometer, PLS, Kamera	
	Zustand der Schienenbefestigung					
	Pos. des Schienenstoßes					
	Art des Schienenstoßes					Lasertracker oder Odometer, PLS, IMU, Kamera

4.2 Sensorik

Bei dem PVS kommen mehrere Sensoren zum Einsatz. Ihre Verwendung ist abhängig von der gewählten Konfiguration (siehe Abschnitt 4.3). Als extern positionsgebender Sensor dient ein Tachymeter oder ein Lasertracker. Zusammen mit dem Neigungsmesser, der IMU und den Encodern ermitteln die Sensoren die Daten um die Position und Orientierung des Messwagens im Raum beschreiben zu können. Diese sechs Parameter (six degrees of freedom (6DoF)) werden zusammengefasst als Pose bezeichnet. Aufeinanderfolgende Posen beschreiben eine Bahnkurve, bzw. die Trajektorie des Messwagens.

Insbesondere für die Bestimmung eines Großteils der neuen Zustandsgrößen (siehe Abschnitt 4.1) kommen die beiden Kameras und die Profillaserscanner zum Einsatz.

4.2.1 Georeferenzierender Sensor

Lasertracker Für den Nachweis der Messgrößen sind georeferenzierende Sensoren erforderlich, die Teile der Pose (6DoF) des Messwagens im übergeordneten Koordinatensystem bestimmen. Detailliert wird darauf in Kapitel 5 eingegangen.

Für die umfassende Aufnahme der Parameter in einem geringen Abstand um ein Profil herum, kommt aus zeitlichen Gründen nur eine kinematische Vermessung in Frage. In Verbindung mit der hohen Genauigkeitsanforderung hat der Lasertracker den Vorteil der flexibleren Wahl des Beobachtungsstandorts. Durch die sehr gute Streckenmessgenauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}/\text{m} + \pm 10 \mu\text{m}$ bei einer dynamischen Zielerfassung überwiegt der Einfluss der Winkelmessgenauigkeit von $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu/\text{m}$.

Es kann jeder Lasertracker zum Einsatz kommen, dessen Daten sich mit einem Zeitstempel im Millisekundenbereich exportieren lassen. Idealerweise gibt es eine Möglichkeit, das Instrument zu triggern oder ein Triggersignal zu exportieren.

Die Messungen mit dem PVS erfolgten mit dem Leica AT960 der Firma Leica Geosystems (Hexagon Metrology, 2014) bei einer Abtastrate von 1000 Hz. Gemäß Spezifikation beträgt die maximal zulässige Geschwindigkeit sowie Beschleunigung eines bewegten Ziels 4 m/s bzw. 2 g.

Tachymeter Alternativ zu dem Lasertracker können Teile der Pose (6DoF, siehe Kapitel 5) des Messwagens auch durch einen Tachymeter bestimmt werden. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen kommt hier nur die Verwendung eines Präzisionstachymeters in Frage.

Der wesentliche technische Unterschied z. B. des Tachymeters Leica TS30 im Vergleich zu dem Lasertracker ist die nicht interferometrisch bestimmte Streckenmessung, die dadurch eine höhere Messunsicherheit hat, bzw. Fehler aus der EDM-Kalibrierung sowie die unzureichende Synchronisation der Richtungs-, Winkel- und Streckenmessungen (Stempfhuber und Sukale, 2017). Damit geht die Bedingung einher, dass das Instrument in Flucht der Fahrtrichtung positioniert sein muss (Dennig und Neumann, 2008). Für die Durchführung bedeutet das bei Hallenkranbahnen ein höheres Gerfährdungspotential aufgrund von Arbeiten in Höhe. Ein weiterer Nachteil ist die geringere mögliche Abtastrate (z. B. bis 19 Hz bei der MS60) im Vergleich zu dem Lasertracker (Leica AT960: bis 1000 Hz). Je höher die Abtastrate ist, umso besser kann die Trajektorie dokumentiert, die Sensoren referenziert und die Zustandsgrößen bestimmt werden.

Nach Stempfhuber und Sukale (2017) konnte in ihren Untersuchungen „die neue Leica-Instrumentengeneration ohne erkennbare systematische Fehler und mit geringen Totzeiten verifiziert werden“. Untersucht wurde die MS60, wobei einerseits explizit auf die Anwendung im Straßenbau und der Gleisvermessung eingegangen wird, andererseits absolute und numerische Ergebnisse, in der für die vorliegende Arbeit notwendige Millimetergenauigkeit nicht aufgeführt werden. Eine abschließende Beurteilung der Eignung einer Instrumentenaufstellung außerhalb der Schienenflucht, z. B. der Leica MS60 für die in dieser Arbeit behandelte Anwendung, ist daher nicht möglich.

4.2.2 Profillaserscanner

An der Halterung für die Sensorik des PVS Messwagens können zwei Lasertriangulationssensoren der Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG vom Typ LLT2600-100 befestigt werden. Hierfür sind das geringe Gewicht von 380 g und die Größe von $96 \times 85 \times 33$ mm ein Vorteil. Der Stromverbrauch liegt bei 24 V bei 500 mA, die Stromversorgung kann flexibel zwischen 11 und 30 V liegen. Emittiert wird ein rotes Laserlicht mit einer im sichtbaren Spektralbereich liegenden Wellenlänge von 658 nm. Der Hersteller gibt für den Sensor die Geräteklasse 2M an. Diese Klasse wird bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) für das Auge als ungefährlich eingestuft, sodass keine weiteren Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Der Messbereich des LLT2600-100 in z-Achse liegt zwischen 190 und 290 mm. Von dem Hersteller ist ein erweiterter Messbereich definiert, der zwischen 125 und 190 bzw. 290 und 390 mm liegt. Die Auflösung in x-Achse beträgt 640 Punkte/Profil und in z-Achse beträgt sie $12 \mu\text{m}$. Bei 100 Hz können somit bis zu 64.000 Messpunkte erfasst werden. Aufgrund ihrer zugewandten Ausrichtung auf dem Messwagen werden sie im Master-Slave Modus betrieben. Hierbei findet ein wechselseitiges Pulsieren statt, das eine Überlappung der Laserlinien verhindert. Ausgelöst wird die Messung durch ein Triggersignal. Die Messdaten der Profillaserscanner werden anschließend mittels einer Ethernet-Schnittstelle über einen Switch an die zentrale Recheneinheit übertragen. Mehr Informationen können in Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG (2013) nachgelesen werden.

Bei Messungen auf blanke Stahloberflächen im Labor hat der LLT2600-100 Messergebnisse geliefert. Wird eine Beleuchtungsstärke von 10.000 Lux überschritten, ist mit Fehlmessungen zu rechnen (Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, 2013). Folgende Beleuchtungsstärken sind typisch: Bedeckter Wintertag: 3.500 Lux, Bedeckter Sommertag: 20.000 Lux, Heller Sommertag: 100.000 Lux. Die Vermessung der Profile findet vorrangig in Hallen bei künstlichem Licht statt. Das Risiko von Fehlmessungen ist damit sehr gering. Bei Messungen im Freien kann der Beleuchtungseinfluss durch Schutzblenden reduziert werden (Strübing, 2015, S. 39).

4.2.3 Kameras

Die beiden monochromen Industriekameras der Firma The Imaging Source Europe GmbH vom Typ DMK 72BUC02 haben ein Gewicht von je 70 Gramm und eine Größe von $36 \times 36 \times 25$ mm. Durch Befestigungspunkte lassen sie sich ohne Schwierigkeiten an der am Wagen vorgesehenen Halterung (siehe Abschnitt 4.3.5) anbringen. Die Versorgungsspannung ist mit 4,5 bis 5,5 V DC angegeben. Der Energiebedarf bei 5 Volt beträgt 0,8 Watt. Die Bildwiederholrate, auf englisch „frames per second (fps)“ beträgt maximal 6 und die höchste Auflösung der Kameras 2592×1944 Pixel. Die Daten werden über eine USB 2.0 Schnittstelle direkt an die zentrale Recheneinheit übertragen. Die Synchronisierung mit den übrigen Messdaten erfolgt über einen Triggereingang.

Über einen genormten Gewindeanschluss, den sogenannten C-Mount, ist an jeder Kamera ein ca. 102 Gramm schweres Objektiv befestigt. Sie haben eine Brennweite von 5 mm und eine Blende von 1,4 bis 16.

4.2.4 Inklinometer

Auf dem PVS Wagen kommt ein flüssigkeitsbasierter Zwei-Achs-Neigungsmesser der Marke Measurement Specialities (MEAS) vom Typ NS-15/DMG2-U zum Einsatz. Der Sensor hat eine Größe von $84,0 \times 70,0 \times 46,4$ mm und ein Gewicht von 290 g. Er ist im vorderen Bereich des Fahrzeugs platziert. Der Messbereich des Sensors liegt zwischen $\pm 15^\circ$ bei einer Auflösung von $0,001^\circ$. Die Messdaten werden über eine RS-232 Schnittstelle an das RS-232 Bricklet der Firma Tinkerforge GmbH übergeben. Weitere Details über den Sensor können in TE Connectivity Sensors Germany GmbH (2017a,b) nachgelesen werden.

4.2.5 Inertiale Messeinheit

Auf dem PVS Messwagen ist eine IMU vom Typ IMU Brick 2.0 der Firma Tinkerforge GmbH verbaut. Das Tinkerforge Modul hat die kompakten Abmessungen von $40 \times 40 \times 19$ mm und ein Gewicht von 12 g. Kern der IMU ist der als mikroelektromechanisches System (MEMS) ausgeführte 9-Achs Sensor BNO055 der Firma Bosch (Bosch, 2016). Dieser kann Beschleunigung (kapazitiv), Drehrate und Magnetfeldströme in jeweils drei Achsen messen. Die IMU misst mit einer Abtastfrequenz von bis zu 100 Hz. Sie berechnet Gimbal Lock freie Quaternionen mit einer Auflösung von 16 Bit, lineare Beschleunigung mit einer Auflösung von 14 Bit und Schwerkraftvektoren mit 16 Bit. Die unabhängigen Gier-, Roll-, und Nick-Winkel werden in $0,0625^\circ$ Schritten aufgelöst. Weitergeleitet werden die Messdaten über den Tinkerforge Masterbrick an die zentrale Messeinheit. Weitere Details können von Tinkerforge GmbH (2017a) entnommen werden.

4.2.6 Encoder

Auf den Achsen beider Antriebsmotoren des PVS Messwagens sind Encoder vom Typ ME22 der Firma PWB encoders GmbH montiert. Sie haben einen Durchmesser von 22 mm und eine Länge von 21,9 mm, ein Gewicht von 7 g und benötigen eine Stromzufuhr von 4,5 bis 5,5 Volt. Die Frequenz beträgt 60 kHz und die Auflösung 360 Schritte pro Umdrehung. Für den PVS Messwagen bedeutet das eine Auflösung der Wegstrecke von 0,031 mm. Weitere Details können bei Oberländer (2011) nachgelesen werden.

4.2.7 Ultraschallsensoren

Zwei Ultraschallsensoren vom Typ US Distance Bricklet der Firma Tinkerforge GmbH mit den kompakten Maßen von $45 \times 20 \times 30$ mm und einem Gewicht von 13 g sind oben auf der Halterung für die Sensoren befestigt. Der Messbereich der Sensoren liegt zwischen 20 und 400 mm bei einer Aktualisierungsrate von 40 Hz. Der Messwinkel beträgt 12° . Sie sollen bei der Fahrt des PVS Messwagens auf einem Profil eventuelle Hindernisse erkennen und davor warnen. Weiterführende Informationen sind bei Tinkerforge GmbH (2017b) zu finden.

4.2.8 Sensorintegration

Die Ansteuerung der Sensoren sowie Übertragung und Speicherung der Messdaten erfolgt bei dem PVS durch das Robot Operating System (ROS). ROS wurde mit dem Ziel entworfen, die schnelle prototypische Entwicklung von Robotern zu ermöglichen (Quigley et al., 2009). Für sich wiederholende Aufgaben, die bei der Entwicklung von Robotern anfallen, soll auf Software-Bibliotheken zurückgegriffen werden können (Willow Garage, 2010). Bezogen auf die Entwicklung des PVS bedeutete dies, dass sich nach der Einarbeitungsphase auf die eigentlichen Forschungsschwerpunkte konzentriert werden konnte.

ROS ist ein Framework, das auf Linux aufsetzt. Es kann mit mehreren Sprachen (C++, Python, Octave and LISP) programmiert werden. Bei dem PVS erfolgt die Einbindung und Ansteuerung der Hardware teilweise über Komponenten der Firma Tinkerforge. Hierfür steht eine gut dokumentierte API zur Verfügung. Tabelle 4.2 zeigt die Software Architektur des PVS.

Eine Funktion des Systems ist die Kommunikation und der Datenaustausch zwischen verteilten Prozessen (Nodes). Ein Node kümmert sich z. B. um die Ansteuerung eines Sensors. Die Topologie (Netzstruktur) der Nodes ist ein Peer-to-Peer-Netzwerk, demnach sind alle Nodes miteinander vermascht. Die Kommunikation wird durch einen Namens-Service bzw. Master koordiniert und erfolgt synchron oder asynchron. Die synchrone Kommunikation durch sogenannte Services geschieht ausschließlich bidirektional zwischen zwei Nodes. Publisher und Subscriber kommunizieren asynchron. Ein Node publiziert (publishes) Daten, die von einem oder mehreren Nodes abonniert (subscribed) werden können. Ein bedeutsames Attribut der Daten ist der Zeitstempel, der eine Auswertung und Prüfung ermöglicht (Igelbrink et al., 2017; Quigley et al., 2009).

Tabelle 4.2: Software Architektur des PVS.

Benutzermodus	Libraries/Nodes (Steuereinheit; c++: Scanner, Encoder. Python: Kameras)
	ROS
	Systemdienste (z. B. acpi d: ein/aus Schalter, ...)
Linux-Kernel	...
Hardware	I/O (USB, Encoder, ein/aus Schalter, ...), CPU, Arbeitsspeicher, Datenträger, Netzwerk (Ethernet, WiFi, ZigBee)

Alle Sensoren und Aktoren, bis auf Profillaserscanner (PLS), Kameras und Encoder, sind über die Tinkerforge Komponenten miteinander verbunden. Abbildung 4.7 zeigt die Hardware-Architektur des PVS.

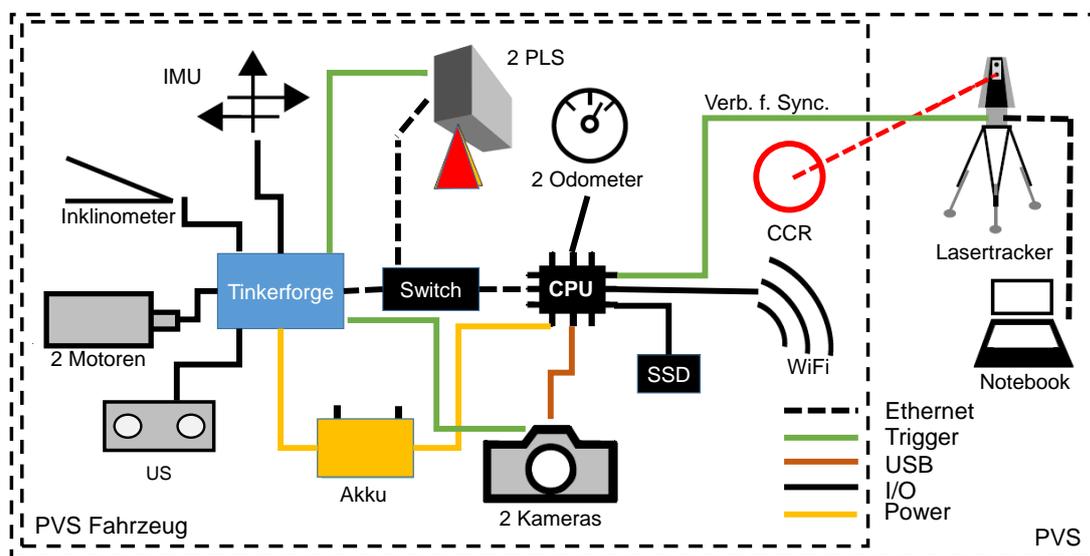


Abbildung 4.7: Hardware-Architektur des PVS. Abbildung in Anlehnung an Dennig et al. (2017)

4.3 Profilvermessungssystem

Die in Abschnitt 2.3 vorgestellten Systeme haben alle das Ziel, die in den bekannten Richtlinien (VDI 3576, ISO 12488-1 etc.) geforderten Zustandsgrößen zu bestimmen. Sind die automatisierten Systeme mit Inclinometern ausgerüstet, können fast alle Größen durch eine Messfahrt ermittelt werden. Ausgenommen sind bei einer Lagerung der Schiene auf einem Stahlträger die Abweichung der Schienen- zur Kranbahnträgerachse und die Parallelität der Endanschläge.

Anders ist es mit den in Abschnitt 4.1 vorgestellten neuen Zustandsgrößen. Um diese erfassen zu können, sind zusätzliche Sensoren notwendig. Der Stand der Technik ermöglicht es kompakte PLS, Kameras, eine IMU und Odometer in ein System zu integrieren und somit neue Zustandsgrößen zu ermitteln. Die Grundlage für die Entwicklung des PVS ist geschaffen.

Eine weitere Absicht bei der Entwicklung des PVS ist es, die Vermessung nicht nur auf Kranbahnschienen zu beschränken. Die Konstruktion zur Anpassung der Führungsrollen an den Profilkopf wurde so ausgelegt, dass Profile mit Breiten zwischen 20 und 300 mm befahren werden können.

Die beschriebenen Anforderungen an das PVS haben einen starken Einfluss auf die Auslegung der Fahrzeugkonstruktion gehabt. Die genannten und weitere Faktoren sind als Mindmap in Abbildung 4.8 dargestellt.

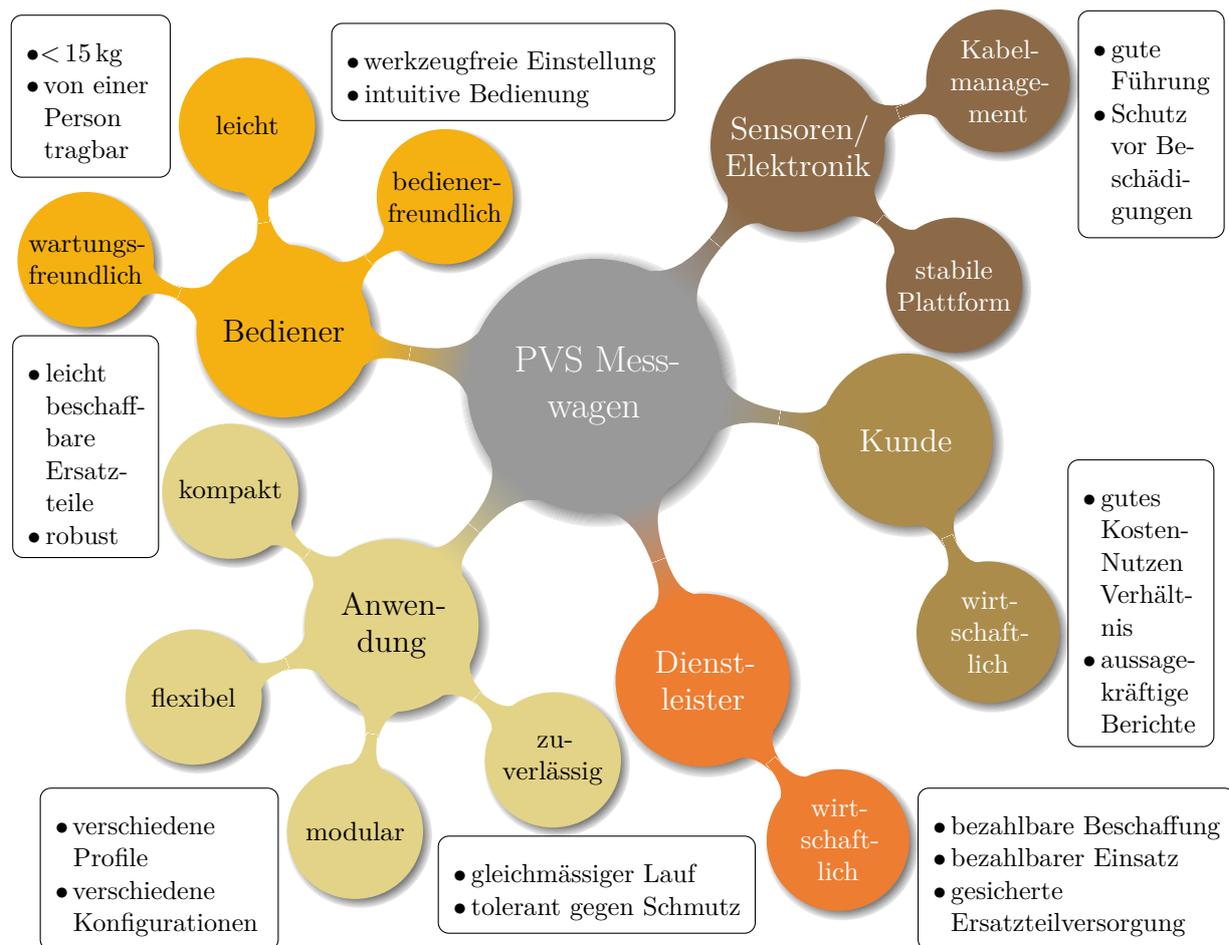


Abbildung 4.8: Anforderungen an das Fahrzeug

Für die Erschließung zusätzlicher Anwendungsfelder ist das PVS modular einsetzbar. Drei Konfigurationen sind möglich:

1. Mit dem System sollen nur die bisher geforderten Messgrößen erfasst werden. In dem Fall kann auf die Laserscanner und Kameras verzichtet werden. Der Wagen wird von einem Lasertracker oder einem Tachymeter getrackt.
2. Soll ein umfassendes Abbild der Kranbahn erfasst werden, ist es notwendig, zusätzlich zu den bekannten Messgrößen die neuen Zustandsgrößen (siehe Abschnitt 4.1) zu erfassen. Der Messwagen wird dann mit den Profillaserscannern und Kameras ausgerüstet. Die Position des Wagens wird kontinuierlich von einem Lasertracker oder einem Tachymeter bestimmt.
3. Für die Dokumentation des Zustands der Schiene, der Schienenbefestigung, Schienenstöße und Schienenneigung wird der Messwagen mit den Profillaserscannern und Kameras ausgerüstet. Die zurückgelegte Strecke wird mit Hilfe der Odometer bestimmt. Ein Lasertracker oder Odometer wird nicht eingesetzt.

Die Software des PVS gewährleistet praxistaugliche Kalibrierverfahren und gewährleistet synchronisierte Datenwerte. Nach Filterung und Glättung der Messwerte werden die Daten ausgewertet sowie die Mess- und Zustandsgrößen berechnet. Diese Prozesse und Funktionalitäten werden in den folgenden Kapiteln weiter vertieft.

4.3.1 Plattform

Als zentrale Baugruppe muss die Plattform verwindungssteif sein. Die transformierten Messwerte der Sensoren können andernfalls durch den Einfluss unbekannter, nicht linearer Effekte nicht in Bezug zueinander gesetzt werden. Außerdem ist für alle Komponenten und Baugruppen eine

gewichtsoptimierte Konstruktion erforderlich. Der komplette Wagen, inklusive seiner Transportkiste, muss von einer Person tragbar sein. Ziel ist ein Gesamtgewicht des Wagens, inklusive der Sensoren und Akku, von 15 kg. Der zur Verfügung stehende Platz muss optimal für die Anordnung von Mechanik, Sensoren, Elektronik und Kabeln genutzt werden.

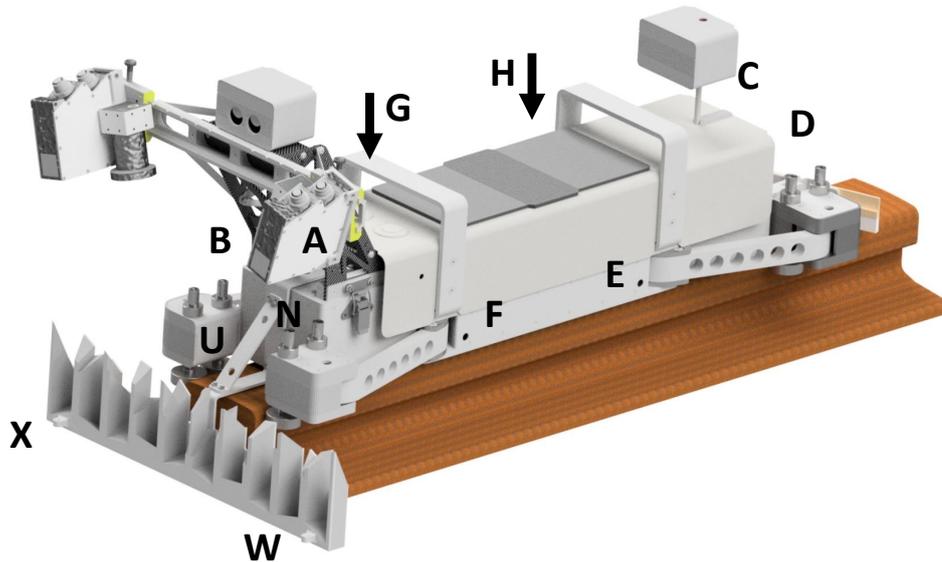


Abbildung 4.9: PVS mit Kalibrierkörper auf einer Schiene. Aufnahmepunkte für CCRs als Referenzpunkte für das Wagenkoordinatensystem mit alphanumerischer Bezeichnung.

Unter Beachtung der Kosten kommt ein gefrästes Bauteil nicht in Frage. Stattdessen wird eine Lösung aus gelaserten Aluminiumblechen gewählt, die in Sandwichbauweise verschraubt ist. Entstehende Kammern trennen Mechanik, Elektronik und Kabel voneinander ab.

Die Anordnung der elektronischen Komponenten erfolgte bereits vorab in der 3D CAD Software. Hierdurch kann eine optimale Gewichtsverteilung und Zugänglichkeit aller Komponenten gewährleistet werden. Befestigungspunkte auf der Plattform für alle Teile wurden ebenfalls berücksichtigt.

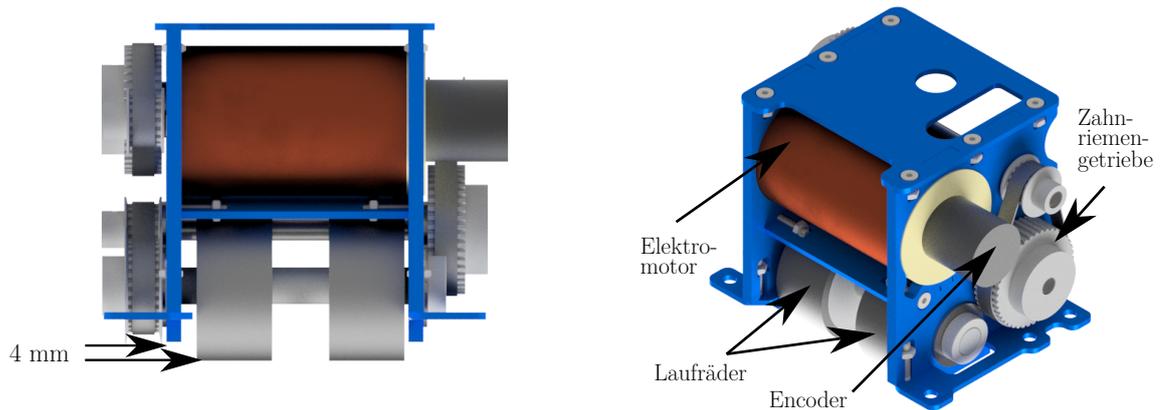
4.3.2 Antriebseinheit

Auch die Antriebseinheit muss kompakt und leicht sein. Gleichzeitig muss sie genügend Drehmoment liefern, um den ca. 15 kg schweren Wagen anzutreiben. Bei der Fahrt über eine Schiene können kurze Abschnitte z. B. verschmutzt oder unvorhergesehen abgenutzt sein. Damit der Wagen an den Stellen nicht zum Stehen kommt, gibt es eine zweite Antriebseinheit, die das Fahrzeug über den problematischen Bereich schiebt. Die Antriebe sind an den jeweiligen Enden des Wagens angeordnet und mit der Plattform verschraubt.

Der Antrieb erfolgt durch jeweils zwei Laufräder, die auf dem Profilkopf aufliegen. Sie sind in Querrichtung verstellbar (Abbildung 4.10a), so dass der Wagen in Abhängigkeit des Profils stabil fährt. Ihr Durchmesser wurde so gewählt, dass ca. 2 cm breite Lücken (z. B. bei nicht verschweißten Schienenstößen) zwischen den Schienen überfahren werden können. Das leichte Maß Unterkante Plattform und Oberkante Profil beträgt 4 mm (Abbildung 4.10a). Der Abstand wurde unter der Berücksichtigung eines möglichst niedrigen Fahrzeugschwerpunkts gewählt.

Die Antriebe bestehen jeweils aus einem 12 Volt Elektromotor und einem Zahnriemengetriebe (Abbildung 4.10b). Das Zahnriemengetriebe ist im Gegensatz zu einem Kunststoff- oder sogar Stahlzahnradgetriebe leise und vibrationsarm. Einflüsse auf die Messergebnisse werden damit reduziert.

Die Übersetzung des Getriebes wurde so gewählt, dass der Wagen eine Geschwindigkeit von 1 m/s erreicht und gleichzeitig ausreichend Drehmoment für einen gleichmäßigen Vortrieb hat.



(a) Frontansicht einer Antriebseinheit. Gut sichtbar sind die quer zur Fahrtrichtung verstellbaren Laufräder.

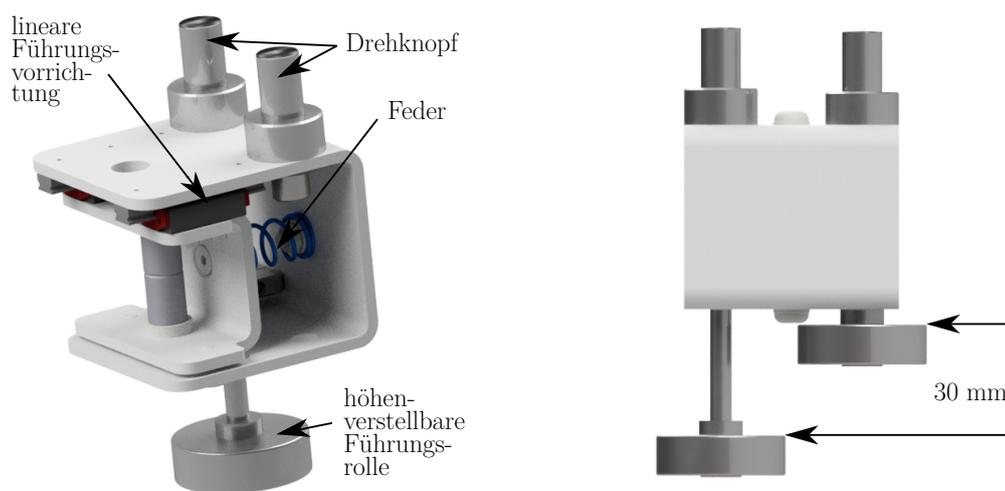
(b) Isometrische Ansicht einer Antriebseinheit

Abbildung 4.10: Ansichten einer Antriebseinheit

4.3.3 Seitenführung

Die angetriebenen Räder laufen auf der Oberseite des Profils. Damit der Wagen nicht von der Schiene fällt, muss er auf beiden Seiten geführt werden. Für den Messwagen sind jeweils vorne und hinten beidseitig des Profils zwei Führungsrollen, insgesamt also acht Stück vorgesehen. Die zweite Führungsrolle soll mehr Möglichkeiten bei der Adaption an verschiedene Abnutzungsgrade der Schiene ermöglichen.

Aufgrund von Walztoleranzen und Abnutzungen ist die Profildbreite Schwankungen unterlegen. Aus diesem Grund ist eine Seite gefedert (Abbildung 4.11a). Aus zwei Gründen darf es die andere Seite nicht sein. Erstens muss es eine klare Bezugskante für die Messwerte geben und zweitens würde eine beidseitig gefederte Führung zu einem instabilen Fahrverhalten und einem Absturz des Wagens führen. Beim Zusammenfahren der Schwingen wird die Federung mittig eingestellt, so dass ein etwas schmaleres oder ein breiteres Profil toleriert werden kann. Die Konstruktion lässt einen Federweg von ± 5 mm zu.



(a) Gefederte Führungsvorrichtung. Die rechte Führungsrollenachse mit der Führungsrolle wurden zu Darstellungszwecken ausblendet.

(b) Starre Führungsvorrichtung. Die linke Führungsrolle ist maximal ausgefahren. Die rechte Führungsrolle ist eingefahren.

Abbildung 4.11: Starre und gefederte Führungsvorrichtung

Die Führungsrollen, die seitlich am Profilkopf anliegen, sind mittels selbstarretierenden Drehknöpfen um 30 mm höhenverstellbar (Abbildung 4.11b).

Die Position kann dadurch optimal den Platzverhältnissen und dem Abnutzungsgrad des Profils angepasst werden. Die Führungsrollen sind so an der Achse befestigt, dass an der Unterseite kein Befestigungsmaterial übersteht. Dadurch kann gewährleistet werden, dass auch bei stark abgenutzten Profilen der verfügbare Platz für die Rollen genutzt werden kann.

4.3.4 Schwingen

Die Anpassung der Seitenführung an die verschiedenen Profiltiefen stellte eine Herausforderung dar, da schmale (20 mm) bis sehr breite (300 mm) Profile befahrbar sein sollen. Um eine Kollision zu vermeiden, darf gleichzeitig der Fahrzeugquerschnitt nicht in das Lichtraumprofil hineinragen. Von der Eisenbahn sind Regellichträume bekannt. In Deutschland werden sie in der EBO (1967) geregelt. Bei Kranbahnen werden Sicherheitsabstände geregelt (DGUV Vorschrift 53, 2001). Hier sollen Objekte einen Abstand von mindestens 0,1 m von dem Kran haben. Nicht geregelt ist der Fahrzeugquerschnitt. Insofern wurde für den PVS Messwagen der minimal mögliche Fahrzeugquerschnitt entwickelt, der sich abhängig von der Profiltiefe verändert (siehe Abbildung 4.12).

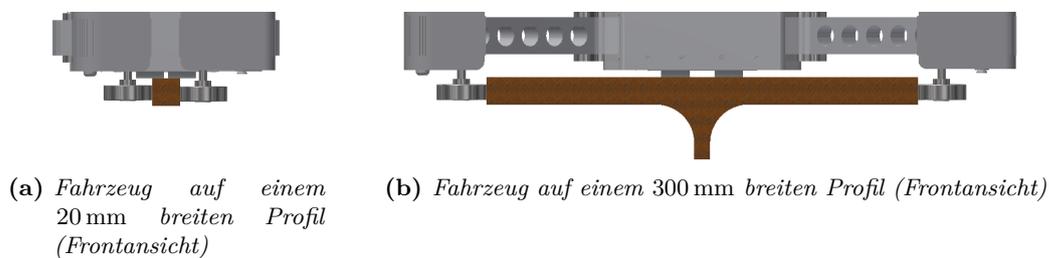


Abbildung 4.12: Die Abbildungen 4.12a und 4.12b zeigen die minimal und maximal befahrbare Profiltiefe des PVS Messwagens

Bei einem 20 mm breiten Profil hat das Fahrzeug eine Gesamtbreite von 163 mm. Bezogen auf die Mittelachse des Profils sind es 81,5 mm nach links und rechts. Fährt der Wagen hingegen auf einem 300 mm breiten Profil beträgt die Gesamtbreite 426 mm. In dieser Anordnung machen sich die unterschiedlichen Konstruktionen der starren und gefederten Führung bemerkbar. Auf der ungefederten Seite benötigt das Fahrzeug 207,5 mm und auf der gefederten 218,5 mm. Für die Vorbereitung einer Messung ist es notwendig, den erforderlichen Fahrzeugquerschnitt zu kennen. Für Abschätzungen des benötigten Lichtraums kann die nachfolgende Formel angewendet werden. Sie berücksichtigt die größere Differenz zwischen Achsabstand und halber Profiltiefe der 20 mm und 300 mm breiten Profile:

$$d_{\text{Querschnittsbreite}} = d_{\text{Profiltiefe}} + 2 \cdot 71,5 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Die Schwingen sind über Spindelmuttern paarweise miteinander verbunden und werden durch Drehen einer jeweiligen Spindel bewegt. Zum Einsatz kommen Trapezgewinde, deren Gewinde dicker sind und eine größere Steigung als Normalgewinde haben. Letzteres hat den Effekt, dass sie selbsthemmend sind. Das ist eine bedeutsame Eigenschaft, damit sich die Schwingen während der Fahrt nicht von alleine bewegen.

Die Spindeln werden durch 12 V Elektromotoren mit angeflanschem Stahlgetriebe bewegt. Die Steuerung erfolgt über zwei Taster am Wagen. Durch drücken eines Knopfes schließen sich die Schwingen. Jedes Paar stoppt individuell selbstständig, sobald sie eine definierte Spannung erreicht haben. Der zweite Taster wird zum Öffnen der Schwingen betätigt. Alternativ kann das Öffnen und Schließen auch über die Bediensoftware erfolgen. Durch diese Option ist es möglich, bei Bedarf die Schwingen zu bewegen, ohne dass der Bediener zu dem Wagen gehen müsste. Der Vorteil liegt darin, insbesondere in einer Situation reagieren zu können, in der der Wagen „hängen“ bleibt oder droht

die Schiene „hochzuklettern“ und herunterzufallen.

4.3.5 Halterung Sensorik

Für die Bestimmung der neuen Zustandsgrößen ist der Einsatz von PLS und Kameras vorgesehen. Ihre Ausrichtung muss quer zur Fahrtrichtung mit freier Sicht auf das Profil, die Schienenbefestigung etc. erfolgen. Benötigt wird eine stabile Aufnahme, die gleichzeitig die Translation und Rotation der Sensoren zulässt.

Als Lösung wurde eine Konstruktion aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFKs) entwickelt (Abbildung 4.13). Der Werkstoff ist einerseits leicht und andererseits sehr stabil. Das gewählte Stecksystem ermöglicht einen stabilen Verbund, der durch Schrauben zusätzlich gesichert wird. An der Konstruktion ist eine Linearführung quer zur Fahrtrichtung befestigt. Auf dieser Führung befinden sich zwei verschiebbare Lineargleitlager, an denen sich eine drehbare Aufnahme für jeweils einen PLS und eine Kamera befindet. Die Führungen werden an vorgegebenen Positionen fixiert. An der höchsten Stelle sind zwei Ultraschallsensoren befestigt, die in Fahrtrichtung und in entgegengesetzter Richtung ausgerichtet sind.

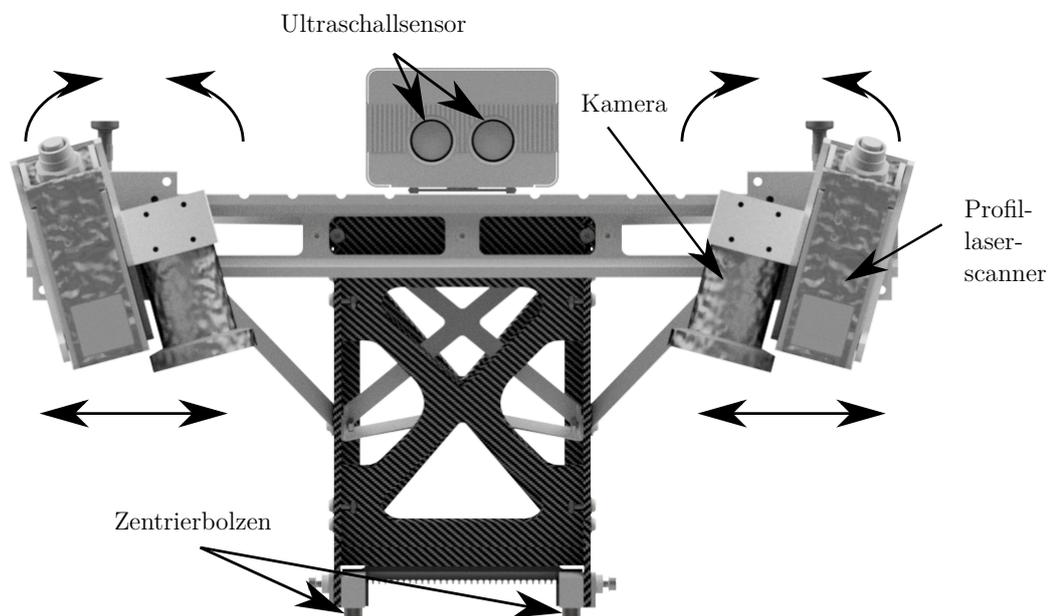


Abbildung 4.13: Abnehmbare Halterung für Profillaserscanner und Kameras

Um die Anforderung an die Modularität zu erfüllen, müssen die Sensoren mit geringem Aufwand demontierbar sein. Hierzu kann die gesamte Halterung von dem Wagen abgenommen werden. Als erstes müssen zwei Befestigungspunkte gelöst werden. Dann kann die durch zwei Zentrierstifte mit der Plattform ausgerichtete Halterung abgenommen werden. Für den Anschluss der Sensoren werden Federkontakteleisten verwendet. Wird die Halterung abgenommen, ist die Verbindung getrennt, wird er wieder aufgesetzt, ist die Verbindung wieder hergestellt. Vorteilhaft ist, dass der Bediener sich keine weiteren Gedanken um den Anschluss machen muss. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Verkabelung gut in den Aufbau integriert werden kann und dadurch geschützt ist.

4.3.6 Drehvorrichtung für Reflektor

Die Genauigkeitsanforderungen machen die Verwendung von Corner Cube Reflektors (CCRs) erforderlich. Deren Vorteil ist eine sehr hohe Zentriergenauigkeit. Allerdings kann bei kinematischen Anwendungen der Öffnungswinkel eines CCR von bis zu $\pm 30^\circ$ einen limitierenden Faktor darstellen, allzumal der Tachymeter oder Lasertracker zu dem Messwagen eine Instrumentenposition außerhalb

der Schienenflucht haben kann. Ein fest montierter CCR kommt daher für den PVS-Messwagen nicht in Frage. Der Zentrierfehler von 360° Prismen beträgt 2–3 mm (Horst und von Gösseln, 2013; Lackner und Lienhart, 2016; Mao und Nindl, 2009). Prismen dieser Art erfüllen die Genauigkeitsanforderungen des PVS nicht und kommen für die Anwendung ebenfalls nicht in Frage (Tabelle 4.3 zeigt verschiedene Reflektoren sortiert nach Genauigkeiten). Zur Erzielung der höchsten Genauigkeit ist das PVS mit

Tabelle 4.3: Zentrierfehler bei Reflektoren (360° Prismen, Rundprismen, CCR)

Abbildung					
Hersteller	Trimble	Leica	Leica	Leica	Leica
Bezeichnung	MT1000	GRZ122	GPH1	GPH1P	Red Ring Reflector
Zentrierfehler [mm]	3-5	2	2	0,3	0,0006



einem Präzisions CCR in einer motorisierten 2-Achs-Drehvorrichtung ausgestattet (Abbildung 4.14). Diese ist um die Steh- und Kippachse drehbar gelagert. Jede Achse wird von einem Servomotor angesteuert. Die Stehachse ist gleichzeitig eine Hohlachse, durch die die Kabel zur Ansteuerung des Kippachs-Servos geführt werden.

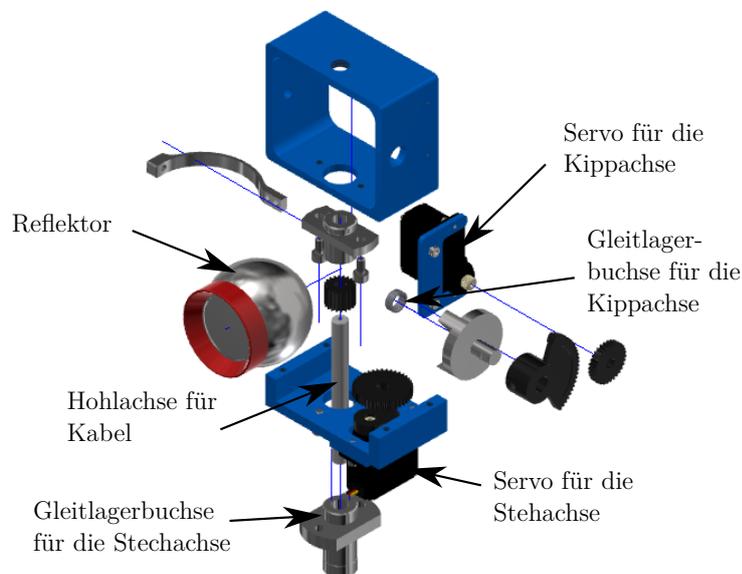


Abbildung 4.14: Explosionsdarstellung der 2-Achs-Drehvorrichtung

Um die Vorteile der Zentriergenauigkeit des CCR nicht durch Verwendung einer Drehvorrichtung zu verlieren, werden die Achsen indirekt angetrieben. Eine direkte Lagerung auf der Achse z. B. eines Servomotors birgt zwei Risiken, zum einen das des Lagerspiels der Drehachse (Taumelfehler) und das der Exzentrizität zwischen CCR und Drehachse. Bei der Drehvorrichtung des PVS sind die Achsen in Messingbuchsen mit sehr geringer Toleranz gelagert. Auf den Achsen sind Zahnräder aus Kunststoff befestigt. Servomotoren mit aufgeschraubten Kunststoffzahnradern treiben die Achsen an. Die Servomotoren können sich in beide Richtungen um 45° drehen. Zur Abdeckung aller Szenarien ist eine Drehbewegung um die Stehachse von $\pm 180^\circ$ gewünscht. Eine Übersetzung des Servowegs von 4:1 ermöglicht den Drehbereich zu erreichen.

Die Ausrichtung der Drehvorrichtung erfolgt durch die kontinuierliche Übertragung des Richtungs-

und Zenitwinkels zwischen Lasertracker und Position des Wagens. Die Orientierungsparameter werden von der Trajektorie abgeleitet. Alternativ ist die Nutzung der IMU Daten denkbar.

4.4 Erreichbare Messunsicherheiten

Zur Erzielung der hohen Anforderungen an einige der in Tabelle 4.1, Seite 52 aufgeführten Messunsicherheiten, z. B. der Y-Komponente des Schienenachspunktes, kommen für die Erfassung aufgrund ihrer hohen Messunsicherheit und Messfrequenz PLS in Frage.

Für die Berechnung der Messunsicherheit der Zustandsgrößen sind alle relevanten Einflussgrößen zu berücksichtigen (Abbildung 4.15).

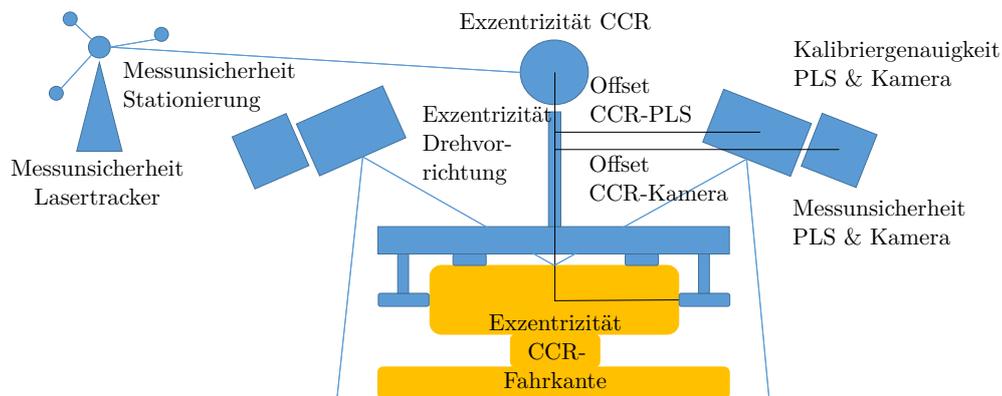


Abbildung 4.15: Auswahl von Einflussgrößen für die Berechnung der Messunsicherheit (Dennig et al., 2017).

Herstellerseitig als maximal zulässige Fehler (engl.: Maximum Permissible Error, MPE) angegebene Unsicherheiten, mit oberem und unterem Limit (a_+ und a_-), müssen in eine Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ umgerechnet werden. Unter Annahme einer Gleichverteilung erfolgt die Umrechnung gemäß JCGM 100 (2008, S. 13) nach Formel 4.4:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{mit } a = \frac{(a_+ - a_-)}{2} \quad (4.4)$$

Nach Dennig et al. (2017) beschreibt Formel 4.5 den schematischen, funktionalen Zusammenhang bei der Bestimmung der Y-Komponente der Lage (Y_P). Deren Unsicherheit Y_P ist insbesondere für die Zustandsgrößen der Richtlinien, wie z. B. der VDI 3576, relevant:

$$\begin{aligned} Y_P &= f_Y(Y_S, z, S_d, t, Y_{Fahr}, Dreh, CCR_M, CCR_K, Z_{P-SOK}, in) \\ Y_P &= Y_S + \sin(z) \cdot S_d \cdot \cos(t) + Y_{Fahr} \cdot \cos(in) + Dreh \\ &\quad + CCR_M + CCR_K + Z_{P-SOK} \cdot \sin(in) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Tabelle 4.4 führt die Haupteinflussgrößen auf, deren Unsicherheiten und den Typ, bzw. die Methode mit der die Unsicherheit ermittelt wurde sowie die Quelle für die Unsicherheit. Gemäß JCGM 100 (2008) können Unsicherheiten nach Typ A nach statistischen Methoden selbst berechnet, und Typ B aus anderen Quellen (z. B. gemäß Literatur- oder Herstellerangaben) bezogen werden. Die in Tabelle 4.4 aufgeführten Typen A, werden in Ausgleichungen ermittelt. Alle Typen B entsprechen

den Herstellerangaben. Die Einflussgrößen folgen der Normalverteilung, bzw. wird angenommen, dass sie ihr folgen.

Tabelle 4.4: *Wesentliche Einflussgrößen und Messunsicherheiten für die Bestimmung der Lage (Dennig et al., 2017).*

Einflussgröße		Messunsicherheit	Verteilung, Typ	Unsicherheitsquelle
Y_S	Y-Komponente Standort	$u_{Y_P} = 0,026 \text{ mm}$	Normal, A	Schätzung aus Ausgleichung
z	Zenitwinkel	$u_{afix} = 8,7 \mu\text{m},$ $u_{avar} = 3,5 \mu\text{m/m}$	Normal, B	Datenblatt
S_d	Schrägdistanz	$u_{dfix} = 5,8 \mu\text{m},$ $u_{dvar} = 0,3 \mu\text{m/m}$	Normal, B	Datenblatt
t	Richtungswinkel	$u_{afix} = 8,7 \mu\text{m},$ $u_{avar} = 3,5 \mu\text{m/m}$	Normal, B	Datenblatt
Y_{Fahr}	Y-Komponente Offset Zielpunkt zur Fahrkante	$u_{Fahr} = 0,01 \text{ mm}$	Normal, A	Datenblatt
$Dreh$	Zentrierfehler Drehvorrichtung	$u_{Dreh} = 0,01 \text{ mm}$	Normal, A	Datenblatt
CCR_M	CCR Fehler Mittelpunkt	$u_{CCR_M} = 0,006 \text{ mm}$	Normal, B	Datenblatt
CCR_K	CCR Fehler Kugelform	$u_{CCR_K} = 0,0015 \text{ mm}$	Normal, B	Datenblatt
Z_{P-SOK}	Z Komponente Offset CCR-Schienenoberkante	$u_{Z_{P-SOK}} = 0,01 \text{ mm}$	Normal, A	Schätzung aus Ausgleichung
in	Neigung des Inklinometers	$u_{in} = 0,01 \text{ gon}$	Normal, B	Datenblatt

Durch das Aufstellen der partiellen Ableitungen nach den Einzelkomponenten kann die Messunsicherheit der Y-Komponente des Zielpunktes berechnet werden:

$$\frac{\partial f_Y}{\partial_i}, i : \text{Einflussgröße.} \quad (4.6)$$

Im nächsten Schritt erfolgt durch Einsetzen in das Fehlerfortpflanzungsgesetz (Dennig et al., 2017) die Berechnung der Unsicherheit für die Y-Achse:

$$\begin{aligned} u_{Y_{Axis}}^2 = & u_{Y_P}^2 - \sin^2 t \cdot \sin^2 z \cdot (u_{afix} + u_{avar} \cdot S_d)^2 + \sin^2 t \cdot \cos^2 z \cdot (u_{dfix} + u_{dvar} \cdot S_d)^2 \\ & + \cos^2 z \cdot \cos^2 t \cdot (u_{afix} + u_{avar} \cdot S_d)^2 + u_{Fahr}^2 \cdot \cos^2 in \\ & + Y_{Fahr}^2 \cdot \sin^2 in \cdot u_{in}^2 + u_{Dreh}^2 + u_{CCR_M}^2 \\ & + u_{CCR_K}^2 + \sin^2 in \cdot u_{Z_{P-SOK}}^2 + Z_{P-SOK}^2 \cdot \cos^2 in \cdot u_{in}^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Gemäß den gewählten Parametern in Dennig et al. (2017) mit einem Zenitwinkel von 100 gon,

Richtungswinkel von 100 gon, Entfernung zum Ziel von 100 m, Offset Prisma zur Fahrkante von 100 mm und Offset Prisma zur SOK von 100 mm ergibt sich eine Messunsicherheit von:

$$u_{(Y_P)} = 0,87 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Die mit dem Lasertracker gemessenen Werte haben eine kleinere Messunsicherheit, als die geforderten Größen und sind damit als ausreichend anzusehen.

Messunsicherheit der Gratbreite am Schienenkopf

Dennig et al. (2017) haben die theoretisch erzielbare Unsicherheit am Schienenkopf ermittelt. Für die Erfassung der Zustandsgrößen werden PLS eingesetzt. Diese messen quer zur Fahrtrichtung mit einer Frequenz von 100 Hz jeweils 640 Punkte/Profil. Dies bedeutet, dass bei einem mittleren Messbereich von 100 mm sich ein Messpunktabstand von $100 / 639 \approx 0,16 \text{ mm}$ ergibt. In der Vertikalen (Z-Achse) haben die Sensoren bei einem Standardmessbereich von 240 mm eine Messunsicherheit von 0,16 mm (1σ). Die kleinste unterscheidbare Größenänderung beträgt 0,012 mm.

Folgende zwei Formeln beschreiben den funktionalen Zusammenhang zwischen der erfassten Kante am Schienenkopf und der Kante des Schienengrats (vgl. Abbildung 4.3b):

$$\begin{aligned} Y_{Grat} &= f_Y(Y_{Grat_Kante}, Y_{Schiene}) \\ Y_{Grat} &= Y_{Grat_Kante} - Y_{Schiene} \end{aligned} \quad (4.9)$$

In Tabelle 4.5 werden die maßgeblichen Variablen und Unsicherheiten aufgeführt, die für die Bestimmung der Unsicherheit der Gratbreite relevant sind. Die Tabelle ist analog zu Tabelle 4.4 aufgebaut.

Tabelle 4.5: Wesentliche Einflussgrößen und Messunsicherheiten bei der Ermittlung des Grats (Dennig et al., 2017).

Einflussgröße		Messunsicherheit	Verteilung, Typ	Unsicherheits-quelle
Y_{Grat_Kante}	Kante Grad	$u_{Y_{Grat_Kante}} = 0,16 \text{ mm}$	Normal, B	Datenblatt
$Y_{Schiene}$	Kante Schiene	$u_{Y_{Schiene}} = 0,16 \text{ mm}$		

Die Messunsicherheit der Y-Komponente des Grats berechnet sich durch das Aufstellen der partiellen Ableitungen nach den Einzelkomponenten (siehe Formel 4.6). Durch Einsetzen in das Fehlerfortpflanzungsgesetz folgt Formel 4.10 gemäß Dennig et al. (2017):

$$u_{Y_{Grat}}^2 = u_{Y_{Grat_Kante}}^2 + u_{Y_{Schiene}}^2 \quad (4.10)$$

Die Berechnung der Messunsicherheit des Grats ergibt:

$$u_{Grat} = 0,23 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Die berechnete Messunsicherheit der Messwerte, die mit dem PLS erfasst werden können, ist kleiner als der geforderte Millimeter und damit annehmbar.

4.5 Datensynchronisierung und Datenhaltungskonzept

Für die erfolgreiche Auswertung einer kinematischen Messung müssen der präzise Erfassungszeitpunkt und der Messwert in einem globalen Zeitbezug zueinander stehen (Gläser und Schollmeyer, 2004,

S. 50). Dafür ist es notwendig, dass die Messwerte mit einem entsprechenden Zeitstempel versehen sind. Für jeden beliebigen Zeitpunkt können durch Interpolation zwischen Messwerten zusätzliche Werte berechnet werden. Insofern unterscheidet sich eine kinematische von einer statischen Messung essentiell.

In Abschnitt 4.5.1 werden die Anforderungen an die Synchronisierung definiert. Gläser und Schollmeyer (2004) haben festgestellt, dass sich in der Praxis zwei Verfahren für die Synchronisierung etabliert haben, die beide auf einem Zeitsignal basieren. Das eine basiert auf einem zentralen Impuls („event trigger“), durch den eine Erfassung ausgelöst wird, das andere basiert auf von Sensoren eigenständig erfassten Daten („time trigger“), die einen systemweit gültigen Zeitstempel erhalten. Auf sie wird in Abschnitt 4.5.2 eingegangen. Abschnitt 4.5.3 befasst sich mit der Synchronisierung über den Objektraum.

Damit die Messwerte einerseits für die Auswertung und andererseits als Rohdaten zu Dokumentations- und Archivierungszwecken verwendet werden können, ist ein Datenhaltungskonzept erforderlich. Dies wird in Abschnitt 4.5.4 erläutert.

4.5.1 Anforderung an die Synchronisierung

Für eine ideale Auswertung, bzw. bei einer perfekten Synchronisation, existiert keine Zeitspanne zwischen Erfassungszeitpunkt und Ausgabe eines Messwerts. Bei analogen Systemen ist die Signallaufzeit annähernd null, da der Stromfluss ungefähr dem der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Sobald Analog-Digital-Wandler bzw. Digital-Analog-Wandler sowie digitale Signalprozessoren verwendet werden, treten Verzögerungen auf. Die Folge ist, dass das gespeicherte Datum nicht zu dem aufgetretenen Ereignis passt. Idealerweise bleibt es bei einer einmaligen Wandlung von analog zu digital und zurück.

Die folgenden Faktoren beeinflussen die Synchronisierung der Messwernerfassung:

- Die **Zykluszeit** beschreibt eine Zeitspanne, in der Daten ausgetauscht werden. Für ein Ethernet Netzwerk gibt Goller (2019) eine Zykluszeit von ~ 100 ms an. Hingegen haben Echtzeit-Ethernet-Standards in der Regel eine Dauer von 10 ms bis 500 μ s oder sogar 31,25 μ s (Dürkop, 2016; Mauer, 2017). Innerhalb eines Echtzeit Ethernet-Standards wird die Zykluszeit während der Auslegung festgelegt und bleibt für die Dauer des Betriebs konstant.
- Die **Laufzeitverzögerung** ist die kumulierte Zeit, die auf dem Weg von Absender bis Empfänger durch Netzwerkkomponenten verursacht wird. Es handelt sich hierbei um einen konstanten Faktor, der bestimmt werden kann (Mauer, 2017).
- Die Zeit zwischen dem Ausgangssignal und dem identischen, aber zeitlich verschobenen Eingangssignal wird als **Totzeit** bezeichnet. Unter den gleichen Bedingungen lautet eine alternative Bezeichnung „**Latenz**“. Zur Minimierung des Synchronisationsfehlers ist es demzufolge erforderlich, die auftretende Totzeit so genau wie möglich zu kennen, um sie in der weiteren Datenverarbeitung berücksichtigen zu können. Die Latenz ist nicht konstant. Aus vielen Zyklen lässt sich der Jitter ermitteln (Mauer, 2017).
- In der Regelungs- und Netzwerktechnik versteht man unter **Jitter** die Abweichung der Zeit, zu der ein deterministisches Ereignis eintrat (Dürkop, 2016; Mauer, 2017). Der Begriff entspricht der Angabe einer Unsicherheit.
- Die Zeitdifferenz von Uhren zueinander wird als **Offset** bezeichnet. Er lässt sich z. B. als Ergebnis eines Triggererimpulses bestimmen: $\Delta t_{\text{Offset}} = \bar{t}_{1,\text{sync}} - t_{1,\text{sync}}$.
- Jede Uhr weist eine mehr oder weniger starke **Drift** auf. Gemeint ist damit, dass eine Uhr schneller oder langsamer läuft als ein Zeitnormal (Referenzuhr, heute Atomuhr). Die Drift fällt insbesondere dann auf, bzw. muss berücksichtigt werden, wenn Ereignisse mit Zeitstempeln unterschiedlicher Quellen miteinander in Bezug zueinander gebracht werden sollen. Für diese Arbeit wird eine lineare Drift angenommen, wobei verschiedene Effekte, z. B. die gerade beschriebenen, dazu führen, dass das Verhalten nicht streng linear ist.

Die Abbildung 4.16 bringt die aufgeführten beeinflussenden Faktoren graphisch in einen Kontext.

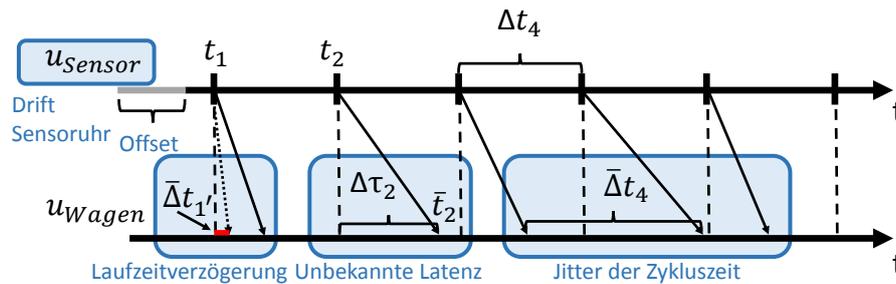


Abbildung 4.16: Zusammenhang zwischen Offset, Drift, Zykluszeit, Laufzeitverzögerung, Jitter und Latenz. Abbildung in Anlehnung an Forschungsinitiative Ko-FAS (2011)

Hierbei stellen die Zeitpunkte t_i an der Stelle i die tatsächlichen Aufnahmezeitpunkte dar. \bar{t}_i entspricht dem Zeitstempel, der durch die Software auf der zentralen Recheneinheit auf dem Wagen vergeben wird, nachdem die Daten den Weg von dem Sensor, über die Datenverbindung bis zu der zentralen Recheneinheit zurückgelegt haben. Δt_i steht für die tatsächliche Zykluszeit. Entsprechend sind alle Δt_i die durch Jitter beeinflusste Zykluszeiten. $\Delta \tau_i$ ist die Latenz, bis die Daten des Sensors bei dem Wagen ankommen. In dem Betrag der Latenz ist die konstante Laufzeitverzögerung $\bar{\Delta t}'_i$ enthalten.

Als Erkenntnis aus Abbildung 4.16 kann mitgenommen werden, dass ein stabiles Eingangssignal und ein instabiles Ausgangssignal einen entsprechend hohen Jitter bedeutet. Nach Festlegung der Anforderung an die Synchronisierungsunsicherheit gibt es folgende drei Möglichkeiten im Umgang hiermit:

1. Der Einfluss der Latenz wird eliminiert, indem der Sensor getriggert wird.
2. Bei bekanntem Offset und Drift wird ein Zeitstempel des Wagens mit einem korrespondierenden Zeitstempel des Sensors synchronisiert. Die folgenden Messwerte des Sensors erhalten diesen Zeitstempel plus den kumulierten stabilen Takt des Eingangssignals. Der Einfluss des relativ hohen Jitters wird hierdurch eliminiert. Für diese Vorgehensweise spricht auch, dass Sticha (2014, S. 23, 32) bei Auftreten einer erheblich großen Anzahl von Zeitstempeln eine zunehmende Latenz ermittelt hat. Von Nachteil ist, dass ein neuer Offset in Kauf genommen werden muss. Dieser ist der Latenz des für die Synchronisierung verwendeten Zeitpaares zuzuordnen. Sticha (2014, S. 23, 32) hat für den ersten Zeitstempel eine höhere Latenz festgestellt. Demzufolge sollte für die Synchronisierung einer der folgenden Zeitstempel verwendet werden.
3. Die Zeitstempel werden akzeptiert.

Erforderliche Synchronisierungsgenauigkeit Die Synchronisierung eines Teils der Messwerte soll besser als 1 ms sein. Der Betrag ergibt sich aus der angestrebten Fahrzeuggeschwindigkeit von 1 m/s und der während der 1 ms zurückgelegten Strecke von 1 mm. Dieser Wert entspricht den definierten Genauigkeiten in Tabelle 4.1. Um die Pose des Fahrzeugs ermitteln und die Zustandsgrößen aus den gescannten und fotografierten Profilen ableiten zu können, ist die Einhaltung dieses Wertes für die PLS, die Kameras, die Encoder und den positionsgebenden Sensor notwendig.

Die von PLS und Kameras erzeugten Messwerte werden ausgelöst durch ein Triggersignal der zentralen Recheneinheit (siehe Abbildung 4.17). Da die Sensoren mit einem eigenen Zeitgeber ausgestattet sind, erhalten sie den Timestamp von dem Sensor selber. Die Daten werden per Ethernet, bzw. USB auf dem Massenspeicher abgelegt und der Zeitstempel wird mit dem der zentralen Recheneinheit synchronisiert.

Für die Bestimmung der Zustandsgrößen, für die die Messwerte der IMU und des Inclinometers benötigt werden, ist eine Genauigkeit im Millimeterbereich ausreichend. Aus diesem Grund ist die Anforderung an die zeitliche Genauigkeit der Messwerte an sie geringer. 2 ms, bzw. 2 mm (bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 2 m/s) in Fahrtrichtung werden hierfür als ausreichend erachtet. Dieser Wert kann mit der vorhandenen Hardware-Architektur erreicht werden.

Stabilität des Triggersignals Ein stabiles Triggersignal erleichtert die Synchronisierung. Die Stabilität des Pulsweitenmodulation (PWM) Signals, dass durch die zentrale Recheneinheit erzeugt wird, wurde überprüft. Hierfür wurde der Signalausgang an ein Oszilloskop angeschlossen.

Untersuchung des Driftverhaltens Das Driftverhalten der Sensoren muss bekannt sein. Ist es das nicht (es ist auch temperaturabhängig), kann es durch eine zusätzliche Synchronisierungsmessung, bei einem angenommenen linearen Verhalten, als Korrektur angebracht werden.

Aufwärmeffekte können durch Warmlaufen der Instrumente minimiert werden. Bei den Fahrzeugsensoren sollte dies mindestens eine halbe Stunde betragen (siehe Abschnitt 4.6.1). Für den Lasertracker beträgt die Aufwärmzeit zwei Stunden. On-/Off-Effekte werden ausgeschlossen, indem die Hardware während der Messung kontinuierlich eingeschaltet bleibt. Eventuelle Stromschwankungen und ein damit einhergehendes Ausschalten kann durch Pufferakkus vermieden werden.

4.5.2 Synchronisierung über die Zeit

Bei der Synchronisierung über die Zeit ist ein übergeordnetes Zeitsignal der maßgebliche Faktor. Erst hierdurch werden die Messdaten zusammenführbar und erst dann ist eine Auswertung möglich. Abbildung 4.17 zeigt den physikalischen Zusammenhang aller Sensoren des PVS Messsystems, dass die Zeitsynchronisierung aller Messdaten ermöglichen soll:

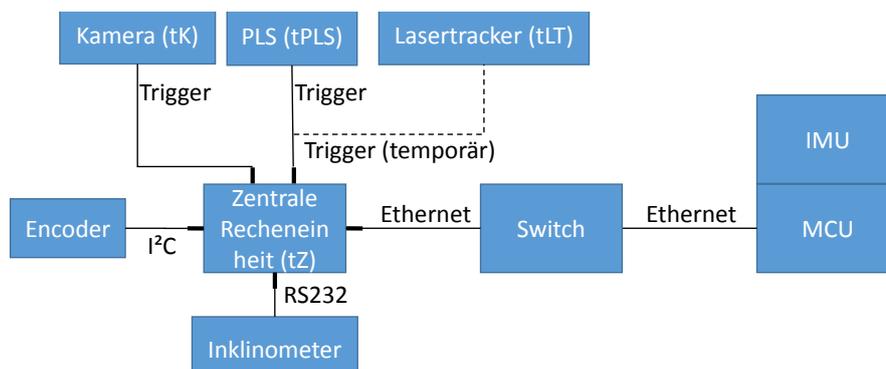


Abbildung 4.17: Konzept zur Gewährleistung der definierten Zeitsynchronisierung

Triggerung Zur Umgehung von Latenzen und anderen zeitverzögernden Einflüssen sollte, wenn möglich, eine Synchronisierung durch Triggerimpulse erfolgen. Nach Herrmann (2016, S. 88) und Gläser und Schollmeyer (2004) ist das die ideale Lösung für die Synchronisierung von Sensoren.

Synchronisierung der Uhren des Lasertrackers und des Messwagens Die Synchronisierung hat zum Ziel die Unterschiede zwischen der Uhr des Lasertrackers und der der Recheneinheit des Messwagens, also den Offset, zu bestimmen und als Korrekturwert an die Zeitstempel des Lasertrackers anbringen zu können.

Mit Hilfe eines „event trigger“ in Form eines von der zentralen Recheneinheit des Messwagens erzeugten PWM Signals wird zu Beginn und Ende jeder Messkampagne eine Messung bei dem PLS auf dem Messwagen und dem durch ein Kabel verbundenen Lasertracker ausgelöst. Hiermit ist die Bestimmung des Offsets zwischen beiden Zeitsystemen möglich.

Herrmann (2016) hat die Triggerung des AT901 in seiner Arbeit beschrieben. Die Erkenntnisse lassen sich auf das Folgemodell AT960 übertragen. Der Lasertracker AT960 regelt und misst mit einer Taktrate von 3 kHz, jedoch gibt er Werte mit einer Rate von 1 kHz aus. An dem Tracker kann durch ein externes Triggersignal eine Messung ausgelöst werden. Das Ereignis wird im Systemtakt registriert und mit einem Zeitstempel versehen. Zu genau diesem Zeitstempel wird ein Wert aus den mit 3 kHz erfassten Messwerten interpoliert. Die Zeitspanne von der Erfassung des Triggersignals bis zu den Messwerten ist mit 5 μ s spezifiziert. Bei der Messung bewegter Ziele kann dies je nach

Anwendung relevant sein. Beispielsweise kann sich ein mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s bewegtes Ziel um 5 μm weiter bewegt haben. Für das Abgleichen der Systemzeiten zwischen Lasertracker und PWM Signal von dem PLS des PVS ist die Totzeit in der angegebenen Größenordnung nicht relevant, da nur die Uhren synchronisiert werden und die Ergebnisse der Richtungs- sowie Streckenmessung bedeutungslos sind.

Profilaserscanner Am Beispiel des PLS wird der Ablauf der Triggerung während einer Messung erläutert (siehe Abbildung 4.18). Sobald am Triggereingang das von der Recheneinheit des Wagens ausgelöste PWM Signal registriert wird, wird sowohl die Zeit der Blendenöffnung, als auch die der Verschlusszeit mit den Profildaten an das ROS System übergeben. Dort wird das Mittel aus den beiden Zeiten unter Berücksichtigung eines einmal ermittelten Offsets zwischen der Zeit des PLS und des Wagens gespeichert. Die Messwerte der PLS befinden sich nun in dem Zeitsystem des Messwagens.

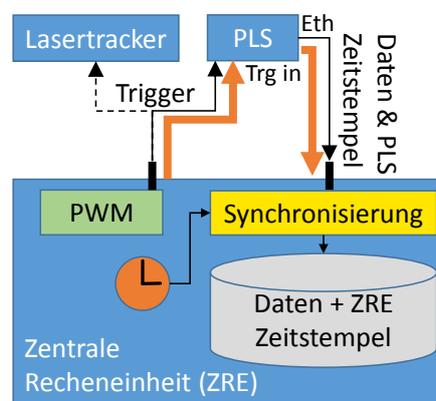


Abbildung 4.18: Synchronisierung von Lasertracker und PLS

Kameras Die Kameras haben, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, ebenfalls einen Triggereingang. Die Belichtung beginnt 4,8 μs nachdem das Signal registriert wurde (The Imaging Source, 2008). Es ist folglich der zuvor für die PLS beschriebene Ablauf simultan für die Kameras durchführbar.

Geht man hier konservativ von einer Latenz in der Größenordnung von 10 ms aus, entspricht dies bei einer Wagensgeschwindigkeit von 1 m/s einer gefahrenen Strecke von 10 mm.

Zeitstempel für die Messdaten der übrigen Sensoren Es ist mit Latenzen von um die 1 ms zu rechnen. Sehr wahrscheinlich würden die Zeitstempel von einer Optimierung durch RTLinux profitieren.

IMU Für Synchronisierungszwecke am wenigsten geeignet, aber technisch einfach und kostengünstig verfügbar ist Ethernet-Hardware. Die IMU ist gekoppelt an den Microcontroller-Baustein und über eine Ethernet-Schnittstelle mit der zentralen Recheneinheit verbunden. Dort erhalten die Daten auch ihren Zeitstempel.

Inklinometer Das Inklinometer liefert über eine RS232 Schnittstelle direkt an die zentrale Recheneinheit seine Daten, die um den Zeitstempel ergänzt werden.

Encoder Die Encoder sind ebenfalls direkt an die zentrale Recheneinheit angeschlossen, wo die Messwerte ihren Zeitstempel erhalten.

4.5.3 Synchronisierung im Objektraum

Das PVS System soll alternativ mit einem Tachymeter eingesetzt werden können. Für die Synchronisierung der Tachymeterdaten mit den Messwerten des PVS Messwagens ist aufgrund eines fehlenden Triggereingangs an Tachymetern aktuell keine Synchronisierung über ein Triggerkabel möglich. Alternativ kann eine Synchronisierung über den Objektraum durchgeführt werden. Hierfür werden die Starts und Stopps des Messwagens die aus den Messwerten des georeferenzierenden Sensors und denen des Odometers bestimmbar sind, miteinander abgeglichen. Es kommt ein einfaches Modell zum Einsatz, dass nur die Bewegung in Fahrtrichtung berücksichtigt.

Moderne Tachymeter wie z. B. die MultiStation Leica MS60 haben eine Ausgaberate von 19 Hz (Stempfhuber und Sukale, 2017), die damit deutlich unter der eines Lasertrackers mit 1000 Hz liegt. Für eine möglichst präzise Positionsbestimmung sollte der Messwagen daher mit einer signifikant geringeren Geschwindigkeit als 1 m/s fahren. Bei einer Geschwindigkeit von ca. 0,4 m/s kann die Position immerhin alle 21,1 mm bestimmt werden.

Dieses Konzept wurde praktisch überprüft, indem der Wagen bei einer Geschwindigkeit von ca. 0,4 m/s auf einem ca. 6,6 m langen Schienenstrang von dem Lasertracker AT960 bei einer Abtastrate von 1000 Hz getrackt wurde. Um das Ergebnis mit z. B. einer Leica MS60 vergleichbar zu machen, wurde die Abtastrate auf 19 Hz heruntergetaktet (engl. Downsampling). Der Wagen ist dreimal hin und zurück gefahren. Die Abbildungen 4.19 sowie 4.20 zeigen das Ergebnis der Synchronisierung.

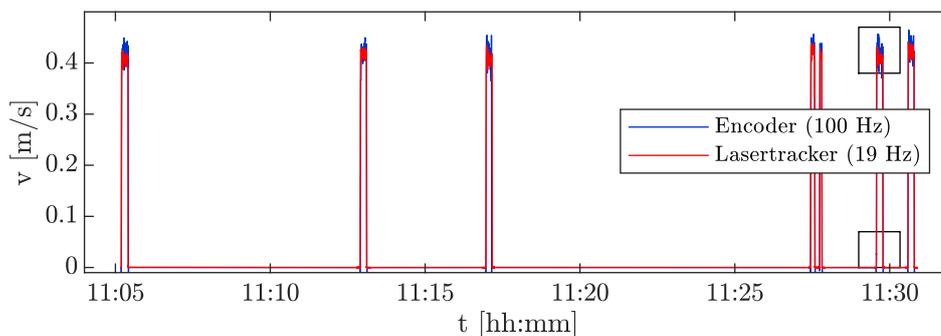


Abbildung 4.19: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm zur Darstellung der Synchronisierung über den Objektraum. Von ursprünglich 1000 Hz auf 19 Hz heruntergetaktete Messdaten. Die beiden Details sind in Abbildung 4.20 vergrößert dargestellt.

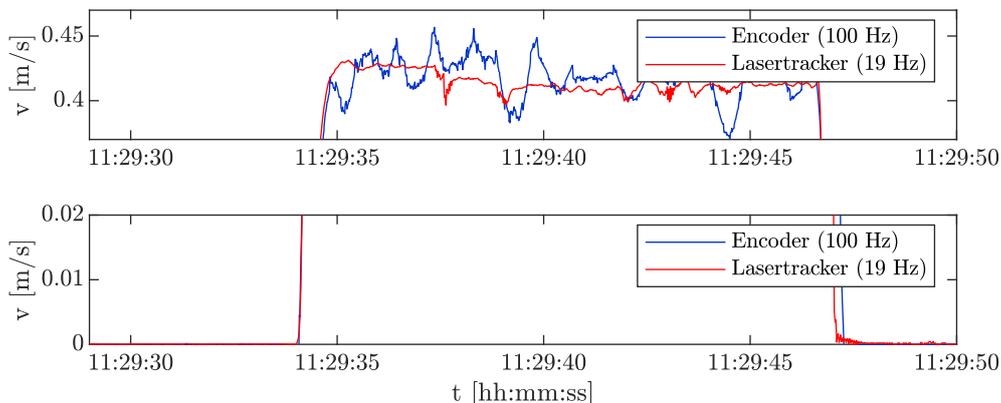


Abbildung 4.20: Details in Ergänzung zu Abbildung 4.19. Oberes Diagramm: Zu erkennen ist, wie die ermittelten Geschwindigkeiten von Lasertracker und Encoder zueinander passen. Unteres Diagramm: Das Augenmerk soll im Detail auf das Ergebnis der geometrischen Synchronisierung gelenkt werden.

Aus den Daten sind somit sieben Starts und Stopps zu erkennen. Im arithmetischen Mittel wurde eine Synchronisierung auf ca. 24 ms erreicht. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Messwagens ergibt sich daraus eine Unsicherheit in der Position aufgrund der Synchronisierung von ca. 9,6 mm. Die ermittelten Differenzen an den jeweils sieben Starts und Stops sind unterschiedlich groß, sodass nicht von einer Drift der Uhr ausgegangen werden kann. Bei linear ansteigenden Differenzen könnte eine Drift vermutet und die Abweichung linear über die gefahrene Strecke verteilt werden.

Auch wenn diese Synchronisierung formal den zuvor gestellten Anforderungen (Tabelle 4.1) nicht genügt, so ist doch zu bedenken, dass z. B. Schienenprofile, wenn sie nicht im Borgen verlegt sind, einen geraden Verlauf haben und sprunghafte Richtungsänderungen außer im Bereich von ungeschweißten Schienenstößen unwahrscheinlich sind. Daher können z. B. die wertvollen Informationen, die für die Bestimmung der theoretischen und der praktischen Schienenachse (siehe Abschnitt 4.1) benötigt werden, abgeleitet werden. Ebenso verwendbar sind die Inklinometerdaten, da nicht erwartet wird, dass Neigungsänderungen sprunghaft auftreten. Auch die Bildaufnahmen sind für die Dokumentation verwendbar. Weitere Messungen mit einem Ingenieurtachymeter sind aufgrund der höheren Unsicherheit des Tachymeters bei der Streckenmessung notwendig, um diese erste Untersuchung zu überprüfen.

4.5.4 Datenhaltungskonzept

Abbildung 4.21 zeigt das vorab geplante Datenhaltungskonzept bzw. Entity-Relationship Diagramm des PVS-Systems. Hinzugefügt wurden auch die Taktraten für Signalein- und ausgang sowie die zulässige Latenz. Alle erzeugten Messwerte werden in einer Datenbank abgelegt, aus der für die späteren Auswerteschritte die Zustandsgrößen generiert werden. Die Beschreibung der Assoziations- und Beziehungstypen erfordert einen umfangreichen Einstieg in relationale Datenbanksysteme und kann im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Zur weiteren Vertiefung wird auf die Fachliteratur verwiesen, z. B. Steiner (2014).

Mit der Nutzung des ROS Frameworks (siehe Abschnitt 4.2.8) für das Abrufen der Sensordaten hat sich die Verwendung der sogenannten ROS Bags angeboten, die alle Daten strukturiert ablegen. Im Prinzip erfolgt dies gemäß der Abbildung 4.21 und ist vor allem einfach verwendbar.

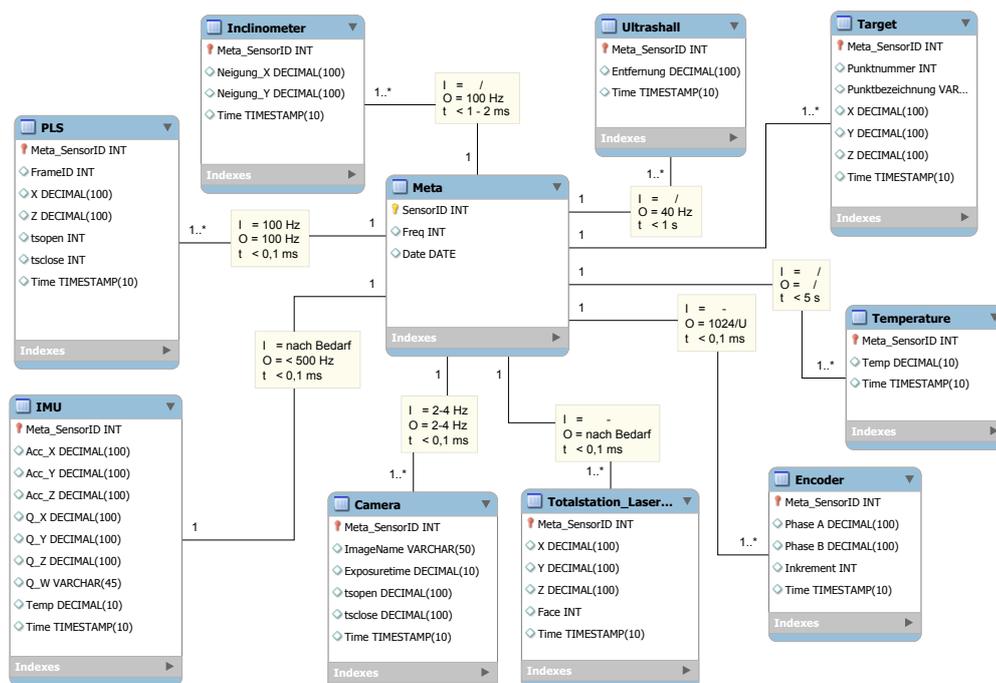


Abbildung 4.21: Entity-Relationship Diagramm der Messwerte

4.6 Kalibrierung

4.6.1 Komponentenkabrierung

Unter Kalibrieren wird im Vermessungswesen die Bestimmung einer Korrekturfunktion für eine signifikante Abweichung verstanden (Hennes und Ingensand, 2000, S. 2). Das Wörterbuch der Metrologie (VIM, Brinkmann (2012)) beschreibt den Vorgang noch detaillierter: „Kalibrieren umfasst die Tätigkeiten zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen den ausgegebenen Werten eines Messmittels [...] und den bekannten Werten der Messgröße unter bekannten Bedingungen“. Die Erweiterung betrifft demnach die Anforderung, den Messwerten Referenzwerte gegenüberzustellen und die Kalibrierung unter kontrollierten Bedingungen, also Laborbedingungen, durchzuführen.

Hennes (2010, S. 1) differenziert hierauf aufbauend zwischen dem Messmittel und dem Messprozess. Sie betont nicht nur die erforderliche Kenntnis über das Messmittel sondern auch über das Messverfahren und die Messbedingungen, unter denen die Messung stattfindet. Mit Hilfe eines Ishikawa Diagramms können die Einflussfaktoren, die auf die Kalibrierung wirken, visualisiert werden. Die strukturierte Auflistung der Messunsicherheitsbeiträge ermöglicht die Aufdeckung der einflussstärksten Größen und die Optimierung des Messprozesses. Dies entspricht dem Gedanken des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).

Damit die Messergebnisse den wahren Werten bestmöglich entsprechen, also eine hohe Genauigkeit haben, werden Korrekturwerte von Sensoren durch Kalibrierungen bestimmt. Die sorgfältige Durchführung einer Kalibrierung hat direkten Einfluss auf die hohe und gleichbleibende Qualität der Messergebnisse. Aufgrund der Bedeutung der Kalibrierung für Prozesse in Organisationen, ist dafür in der ISO 9001 das Kapitel „Ressourcen zur Überwachung und Messung“ (ISO 9001:2015) vorgesehen. Die ISO 9001 trägt damit dem Umstand Rechnung, dass die Kalibrierung nicht nur für das Vermessungswesen relevant ist, sondern für alle Organisationen die Messtechnik einsetzen. Die systematische Reduzierung der Abweichungen und die Bewertung der Genauigkeit der Messergebnisse steigern das Vertrauen und Verständnis in das Messsystem.

Durch die gemeinsame Auswertung der Messwerte, der sogenannten Sensorfusion, können Ergebnisse generiert werden, die mit einem Sensor alleine nicht möglich gewesen wären. Die Komponentenkabrierung bringt eine Genauigkeitssteigerung dadurch, dass der Einfluss auf das Gesamtsystem ermittelt werden kann. Jedoch reicht eine Komponentenkabrierung, bei der Sensoren einzeln betrachtet werden, nicht aus. Es muss ebenso der räumliche Bezug der Messwerte zu einem übergeordneten Koordinatensystem im Rahmen einer Systemkabrierung stattfinden.

In diesem Zusammenhang stellt Strübing (2015) den Bezug zwischen der aus der Photogrammetrie bekannten inneren, äußeren, relativen und absoluten Orientierung sowie den Sensoren eines MSS her. Er unterstreicht damit die Bedeutung der Komponenten- und Systemkabrierung für die Erzielung und Bewertung guter Messergebnisse bei diesen Systemen:

- Die innere Orientierung beschreibt, unter Vernachlässigung der Linsenverzeichnung, anhand der Kamerakonstanten und den Koordinaten des Hauptpunkts, die Position des Projektionszentrums bezogen auf die Bildebene.
- Die äußere Orientierung beschreibt die Lage (drei Translationen) und die Orientierung (drei Rotationen) eines Bildes in Bezug auf das Messobjekt.
- Die relative Orientierung beschreibt die Lage und Orientierung der Messobjekte zueinander.
- Die absolute Orientierung wird durch eine Transformation der relativ orientierten Bilder in ein übergeordnetes Koordinatensystem beschrieben.

Bei kommerziellen Produkten ist in der Regel nur eine Systemkabrierung möglich, da die Hersteller einen Zugriff auf die einzelnen Komponenten aus verschiedenen Gründen nicht ermöglichen. In der Literatur wird hierfür der Begriff „Black-Box“ verwendet (Hennes, 2010; Strübing, 2015).

Der Kalibrierung vorweg geht die Prüfung, bei der festgestellt wird, wie groß die Abweichungen von einer Referenz sind. Der Kalibrierung folgt ggf. eine Justierung, die mechanisch oder durch anbringen von Korrekturwerten erfolgen kann. Abbildung 4.22 stellt den Kreislauf dar. Tiefergehende Beschreibungen können in der Literatur nachgelesen werden, z. B. Strübing (2015).



Abbildung 4.22: Kreislauf bestehend aus prüfen, kalibrieren, justieren und messen

Lasertracker/Tachymeter Der Tachymeter bzw. der Lasertracker stellt den georeferenzierenden Sensor dar. Von einem Standort aus bestimmt er die Fahrzeugposition. Eine Kalibrierung ist auch für diese eigenständigen MSS erforderlich. Zur Vertiefung wird auf die in der Literatur, z. B. Kahmen (2005), ausführlich beschriebenen, zu untersuchenden instrumentellen Fehlerquellen verwiesen. Bei der Verwendung eines Tachymeters wird der PVS Messwagen bei der Hinfahrt in der ersten Lage und bei der Rückfahrt in der zweiten Lage angemessen. Durch dieses Verfahren können die Einflüsse der Achs- und des Höhenindexfehlers stark minimiert werden.

PLS Für die verwendeten Profillaserscanner scanCONTROL 2600-100 (Kapitel 4.2.2) müssen unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen des PVS die nachfolgend aufgeführten sensorspezifischen Fehlerquellen untersucht und falls erforderlich kalibriert werden (Strübing, 2015; Zogg, 2008):

- Distanzmessung
 - Auftreffwinkel
 - Oberflächereflektion von Objekten (Materialeigenschaften)
 - Mehrwegeeffekte
 - Langzeitstabilität
 - Auflösung
 - Einfluss von Umgebungs- und Gerätetemperatur
- Achsfehler und Exzentrizitäten

Für die Distanzmessung spielt die Intensität des zurückgesendeten Messstrahls, die als Remission bezeichnet wird, eine entscheidende Rolle. Sie wird stark beeinflusst von der Entfernung zu der Messoberfläche (Strahldivergenz), dem Auftreffwinkel und den Materialeigenschaften (z. B. Oberflächenfarbe und Oberflächenbeschaffenheit). Glatte Oberflächenstrukturen führen zu anteiligen oder Totalreflexionen, mit der Folge, dass die Remission teilweise oder vollständig herabgesetzt wird.

Mehrwegeeffekte entstehen durch fehlerhafte Entfernungsmessungen. Der Laserspot trifft auf zwei Flächen unterschiedlicher Entfernung. Die Intensität des reflektierten Signals resultiert in eine scheinbar gemessene Distanz zu einem Punkt, der zwischen den beiden tatsächlichen Flächen liegt. Ähnlich wie bei dem MSS RACER II (Strübing, 2015), kann für den Anwendungsbereich des PVS der Einfluss aufgrund der geringen Strahldivergenz und stetigen Oberflächenform der Schiene vernachlässigt werden.

Die Langzeitstabilität (Drift) von Distanzmessungen ist allgemein kritisch zu betrachten. Insbesondere während der Aufwärmphase kommt es in der Regel zu Veränderungen. Dupuis und Kuhlmann (2014) haben einen PLS scanControl 2700-100 von MicroEpsilon untersucht (Abbildung 4.23). Zogg (2008) präsentiert die Ergebnisse seiner Untersuchungen an einem SICK LMS200-30106. Bei beiden ist eine Aufwärmphase von etwa 20 Minuten zu erkennen. Das Verhalten der Scanner, die in dem PVS verbaut sind, wurde auf Grundlage eines Testdatensatzes einer im Anwendungsfall typischen, zweistündigen Messung untersucht.

Das bereits von Dupuis und Kuhlmann (2014, S. 113) beobachtete Verhalten konnte bestätigt werden. Der Effekt liegt unterhalb der angestrebten Genauigkeit des PVS.

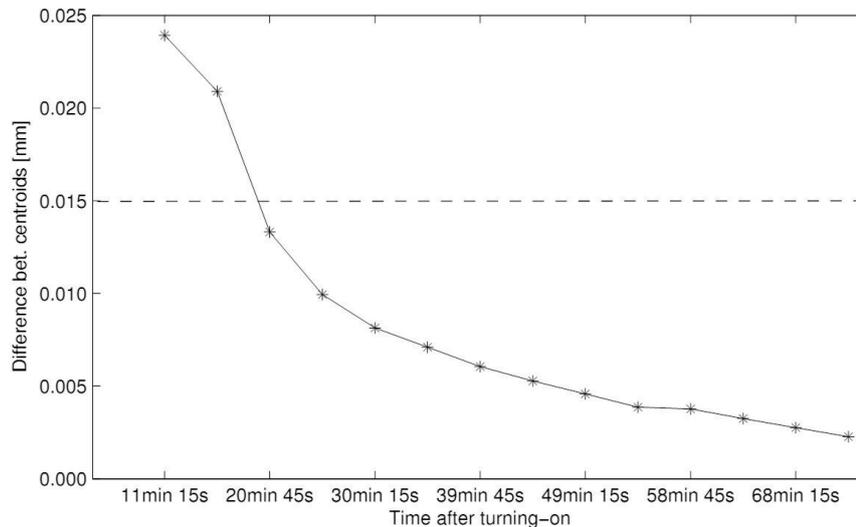


Abbildung 4.23: Aufwärmphase PLS (Dupuis und Kuhlmann, 2014, S. 113) .

Die in Strübing (2015) durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich des äußeren Temperatureinflusses liegen unterhalb der für das PVS angestrebten Genauigkeit. Es wurde zwar ein Sensor eines anderen Herstellers untersucht (M2-ILAN 120/60, Firma wenglor MEL GmbH), da sich jedoch die Gerätespezifikationen sehr ähnlich sind, wurde auf eine Untersuchung an dieser Stelle verzichtet. Eine Berücksichtigung in der Kalibrierdatei ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht erforderlich. Eine Erweiterung der Datei ist bei Bedarf jederzeit möglich.

Kameras Die beiden eingesetzten Kameras sind vom Typ DMK 72BUC02 (The Imaging Source Europe GmbH, 2014). Es müssen die nachfolgend aufgeführten sensorspezifischen Parameter der inneren Orientierung (Brennweite, Hauptpunkt und Linsenverzeichnung) bestimmt werden (Kraus, 2004).

Durch die Kalibrierung der Kameras wurden somit die Parameter der inneren, äußeren und relativen Orientierung bestimmt. Die Ergebnisse der ermittelten Kalibrierparameter (KKPA1 und KKPA2) werden in der Kalibrierdatei hinterlegt.

Inklinometer Das im PVS eingesetzte Inklinometer vom Typ NS-15/DMG2 hat sich bereits in anderen Messsystemen bewährt und ist mehrfach untersucht worden (Schulze, 2009; Strübing, 2015). Der Neigungsmesser dient der Bestimmung der beiden Zustandsgrößen Neigung des Schienenkopfs in Schienenlängsrichtung und Querneigung des Schienenkopfes (siehe Tabelle 4.1). Gemäß dem Datenblatt des Herstellers wird das Inklinometer kalibriert ausgeliefert (MEAS Deutschland GmbH, 2012), wobei die Korrekturen unmittelbar an die Rohmessdaten angebracht werden. Die Ergebnisse von Schulze (2009) und Strübing (2015) lassen vermuten, dass eine gerätespezifische Kalibrierung eine Qualitätsverbesserung bringt. Untersucht wurden daher:

- Offset (auch Bias oder Nullpunktfehler) und Maßstab
- Temperaturabhängigkeit

Die Untersuchungen hierzu wurden in Anlehnung an Schulze und Strübing durchgeführt und lieferten ähnliche Ergebnisse, sodass für weiterführende Informationen auf diese Arbeiten verwiesen wird (Schulze, 2009; Strübing, 2015).

Die Ergebnisse der Bestimmung des Offsets (IKFO) und die Parameter des Polynoms dritten Grades der Korrekturfunktion für die temperaturbedingten Abweichungen (IKFTX und IKFTY) wurden in der Kalibrierdatei hinterlegt.

Schulze (2009) hat ebenfalls den Aspekt der kinematischen Messung untersucht. Aufgrund des in der Regel stetigen Verlaufs der Profile ist das träge Ansprechverhalten des flüssigkeitsbasierten

Inklinometers für diese Anwendung als unkritisch zu bewerten.

Inertiale Messeinheit Die in Form eines Bricks vom Typ IMU 2.0 verbaute MEMS IMU der Firma Tinkerforge GmbH soll mit seinen Messwerten die Ermittlung der Position von Schienenstößen unterstützen. Aufgrund von Imperfektionen, z. B. Schienenversatz, Verwindung der Schienen zueinander oder geometrischer Abweichungen der Schweißung vom Schienenprofil, z. B. durch Ausführung oder Betrieb, werden erhöhte Beschleunigungen in Querrichtung der Schiene und gegebenenfalls auch in vertikaler Richtung erwartet. Der Magnetfeldsensor kann elektromagnetischen Feldern und wechselnden Stahlmassen ausgesetzt sein, weswegen seine Messwerte nicht zuverlässig sind. Auf die Messwerte des Gyroskops kann verzichtet werden, da die spezifizierten Genauigkeiten nicht denen der Zustandsgrößen entsprechen. Ausreichend sind daher die Messwerte des Drei-Achs-Beschleunigungssensor.

Einerseits wird für den Fall von mechanisch sorgfältig ausgeführten Schienenstößen eine Ermittlung deren Positionen als schwierig erwartet, weswegen präzise Messwerte hilfreich sind. Andererseits existieren über die Kalibrierung von MEMS IMUs viele Forschungsberichte (Artese und Trecroci, 2008; Kemkes, 2016; Sahawneh und Al Jarrah, 2008; Shin und El-Sheimy, 2002; Skog und Händel, 2006). In vielen Veröffentlichungen wurden die Kalibrierung sowie das Potential der Sensoren für verschiedenste Messaufgaben dargestellt. Die folgenden systematischen Fehlereinflüsse der Beschleunigungssensoren sind zu berücksichtigen und zu kalibrieren:

- Offset (auch Bias oder Nullpunktfehler)
- Skalierungsfaktor
- Nichtorthogonalität

Laut Aggarwal et al. (2008) hat der Offset von MEMS IMUs den größten Einfluss auf die Messwerte der IMU.

In Kemkes (2016, S. 54 ff.) wurde ein ca. einstündiger Einlaufeffekt eines Beschleunigungssensors vom gleichen Typ festgestellt. Dieser Effekt ist bei dem Vergleich von Beschleunigungen, z. B. von einer Hin- und Rückfahrt auf einer Schiene relevant und sollte bei einer Befahrung berücksichtigt werden.

Weiterhin wurde in Kemkes (2016) festgestellt, dass die z-Achse eine herstellerseitig bedingte geringere Präzision aufweist. Eine andere Montageposition, bei der z. B. die z-Achse in Schienenrichtung zeigt, ist leider nicht umsetzbar gewesen.

Titterton und Weston (2004, S. 247) beschreiben die Temperaturabhängigkeit von z. B. Beschleunigungssensoren. Momentan berücksichtigen die Kalibrierparameter des PVS die Umgebungstemperatur noch nicht. Da relative Maxima für die Detektion der Schienenstoßpositionen ausreichend sind, ist dieses Defizit vertretbar.

Die Kalibrierparameter werden in der Kalibrierdatei abgespeichert (KIM).

Odometer Die beiden Odometer vom Typ ME22 sind jeweils auf den Achsen der Motoren beider Antriebe montiert. Über einen Riemenantrieb wird die Leistung auf die Antriebsräder übertragen. Die Odometer dienen sowohl der Weg- als auch der Beschleunigungsmessung.

Die Ermittlung der Maßstabskorrektur der Odometer erfolgt durch Vergleich zu einer Referenzstrecke sowie der anschließenden Berechnung des Maßstabs μ_{O_i} (mit i = Anfang und Ende). Referenz für den zurückgelegten Weg (D_{Ref}) ist der Lasertracker. Die Maßstabsfaktor berechnet sich aus dem gemessenen Weg D_{O_i} und der Referenz D_{Ref} nach Formel 4.12:

$$\mu_i = \frac{D_{Ref}}{D_{O_i}} \quad (4.12)$$

Beide Maßstabsfaktoren werden in der Kalibrierdatei abgespeichert (OMA, OME).

Sonstige mögliche Einflüsse auf die Messung mit den Odometern sind Schmutz und Schlupf. Schmutz auf der Oberfläche hat einer Verkürzung der Messstrecke zur Folge. Zur Minimierung des Einflusses von Schlupf sind beide Fahrzeugachsen motorisiert. Werden Messfahrten in Verbindung

mit einem referenzierenden Sensor (Lasertracker oder Tachymeter) durchgeführt, können in einem Weg-Zeit Diagramm Schlupf als Sprünge erkannt und ggf. korrigiert werden (Glaus, 2006, S. 77).

Ultraschallsensoren Die Ultraschallsensoren tragen keine Messwerte für die Bestimmung von Zustandsgrößen bei. Ihre Aufgabe besteht darin, Hindernisse zu erkennen, sodass das Fahrzeug gestoppt werden kann. Aus diesem Grund wird eine Funktionsprüfung, jedoch keine Kalibrierung durchgeführt.

4.6.2 Systemkalibrierung

Die bei dem PVS eingesetzten Sensoren wurden in Abschnitt 4.2 aufgeführt. In Anlehnung an Strübing (2015) lassen sie sich in zwei Gruppen einteilen (siehe Tabelle 4.6). Die Gruppe Wagenparameter (WP) beinhaltet Sensoren zur Referenzierung des Fahrzeugs, die Gruppe Zustandsparameter (ZP) enthält Sensoren, die Informationen für die Ableitung von ZP des Profils und der Befestigungen liefern. Tabelle 4.6 führt die Bezeichnungen der verwendeten Koordinatensysteme auf.

Tabelle 4.6: Überblick der Koordinatensysteme

Allgemeine Bezeichnung		Konkrete Bezeichnung (PVS)		Gruppe
S	Sensor-Koordinatensystem	PLS	Koordinatensystem eines Lasertriangulationssensors („Profillaserscanner“)	ZP
		KKS	Kamera-Koordinatensystem	ZP
		IKS	IMU-Koordinatensystem	ZP
		INS	Inklinometer-Koordinatensystem	WP, ZP
		OKS	Odometer-Koordinatensystem	WP
		LKS	Tachymeter-/Lasertracker-Koordinatensystem	WP
		USK	Ultraschall-Koordinatensystem	-
MSS	Multisensor-(Koordinaten-) System	MWKS	Messwagen-Koordinatensystem	-
RFG	Koordinatensystem der Referenzgeometrien	LTS	Lasertracker-Koordinatensystem	-
		KVS	Kalibriervorrichtung-Koordinatensystem	-
-	-	GVS	Koordinatensystem der Gleisvermarkungspunkte	-

Die in der Tabelle 4.6 dargestellten Koordinatensysteme sind kartesische Systeme. In der Regel handelt es sich bei dem Koordinatensystem der Gleisvermarkungspunkte (GVS) um lokale Koordinatensysteme. Ist dem nicht so, muss die Abbildungsverzerrung der Lage kompensiert werden. Es sind Reduktionen mit Hilfe eines Maßstabsfaktors erforderlich, der sich aus den jeweiligen Koordinaten der GVP ortsabhängig ergibt.

Das PVS ist mit einem Lasertracker und alternativ mit einem Präzisionstachymeter einsetzbar. In beiden Fällen liefert der extern positionierte Sensor (Lasertracker-Koordinatensystem (LKS)) die Informationen für einen Teil der absoluten Orientierung des Messwagen-Koordinatensystem (MWKS) im GVS. Für eine Fahrzeugposition sind dies drei Translationen. Das auf dem Messwagen befestigte Inklinometer liefert mit seinen Neigungsdaten die Informationen für die Festlegung einer Rotation des MWKS. Erst die Kinematik des Fahrzeugs ermöglicht die Bestimmung der vollständigen Fahrzeugpose, denn nach einer weiteren gemessenen Position lassen sich die beiden übrigen Rotationen bestimmen. Der zurückgelegte Weg wird durch die beiden Odometer zur Zeit

noch testweise für die geometrische Kalibrierung (siehe Abschnitt 4.5.3) und zur Bestimmung der Beschleunigung eingesetzt.

Die Gruppe ZP der Sensoren liefert Informationen zur Bestimmung von Zustandsparametern des Profils und der Schienenbefestigungen. Wie in Strübing (2015) erläutert, sind diese beiden Gruppen durch die MSP verbunden. Zur Verhinderung von systematischen Fehlereinflüssen, wie z. B. hochfrequente Schwingungen, muss die Plattform stabil und unveränderlich sein.

Definition des MWKS Alle Sensorkoordinatensysteme werden in das zentrale Koordinatensystem, das MWKS, transformiert. Es wird bei jeder Kalibrierung aus den Messdaten der Passbohrung (PB) neu definiert.

Das MWKS wird durch das Reflexionszentrum der in den PB liegenden CCR definiert (siehe Abbildung 4.9 auf Seite 58). Der Ursprung des kartesischen Koordinatensystems ist der Mittelpunkt der Linie durch die PBs C und D. Durch ihn verläuft die positive X-Achse parallel zu der Linie, die durch die Mittelpunkte der PBs E und H sowie PBs F und G definiert ist. Sie ist gleichzeitig die Wagenachse.

Die Einbindung der übrigen PBs erfolgt über eine 3D-Helmert-Transformation. Aufgrund von zwei Messpositionen während des Kalibriervorgangs wird das MWKS separat berechnet und die Koordinaten beider Systeme im Anschluss arithmetisch gemittelt. Die sich nun im MWKS befindlichen Koordinaten aller PBs werden in der Kalibrierdatei abgelegt.

Profilaserscanner

Theorie der Systemkalibrierung Um die anspruchsvollen Anforderungen an die Genauigkeit der Zustandsgrößen zu erfüllen (siehe Tabelle 4.1), müssen die PLS mit geringst möglicher Unsicherheit kalibriert werden. Die Position (t_x, t_y, t_z) und die Orientierung (ω, ϕ, κ) der PLS müssen mit einer Unsicherheit von 0,1 mm in der Lage und 0,1° in der Orientierung erfolgen. Es ist nicht möglich die 6DoF direkt mit einer hohen Präzision, z. B. über Referenzpunkten am Gehäuse der PLS, zu bestimmen. Deshalb muss die Orientierung über den Objektraum erfolgen, was bedeutet, dass Objekte mit bekannter Orientierung von den Sensoren angemessen werden und aus den Messwerten eine Orientierung abgeleitet werden kann.

Strübing und Neumann (2013) beschreiben einen allgemeinen Ansatz zur Lösung der Kalibrierung mit bekannten Flächen eines Kalibrierkörpers im Objektraum. Die Flächen des Kalibrierkörpers, auf die die PLS messen, werden sowohl mit einem Sensor übergeordneter Genauigkeit als auch mit dem zu kalibrierenden Sensor gemessen. Die Messungen des Sensors übergeordneter Genauigkeit werden benutzt, um die Flächenparameter in der Hesse Normalform (Normalenvektor $n = [n_{x,i}, n_{y,i}, n_{z,i}]^T$ und den Abstandparameter d_i) für jede Fläche i (mit $i \in 1, \dots, s$) des Kalibrierkörpers zu bestimmen. Durch Transformation dieser Flächenparameter in das MWKS folgt das funktionale Modell der Ausgleichung den folgenden Gleichungen:

$$\mathbf{X}_{MWKS,j} = \mathbf{t}_{xyz}(\omega) + \mathbf{R}_{xyz} \mathbf{X}_{PLS,j}, \quad (4.13)$$

$$d_j = \mathbf{X}_{MWKS,j}^T \mathbf{n}_{MWKS,i} - d_{MWKS,i}. \quad (4.14)$$

$\mathbf{X}_{PLS,j} = [x_{PLS,j}, y_{PLS,j}, z_{PLS,j}]^T$ stellt die j-te kartesische Koordinate (in dem lokalen Koordinatensystem des PLS) als Ergebnis der Messung vom PLS zur Ebene i des Kalibrierkörpers dar. Diese kartesische Koordinate wird mit Hilfe der 6DoF Parameter $(t_x, t_y, t_z, \omega, \phi, \kappa)$ in das Koordinatensystem des Messwagens transformiert und in $\mathbf{X}_{MWKS,j}$ gespeichert. $n_{MWKS,j}$ und $d_{MWKS,i}$ enthalten die Ebenen Parameter (im Fahrzeugkoordinatensystem) der Ebene i . Durch Einsetzen der Formel 4.13 in Formel 4.14 ist der funktionale Zusammenhang vollständig. Durch Lösung des sich ergebenden nicht linearen Gauß-Helmert-Modells (GHMs) wird der Abstandsvektor $\mathbf{d} = [d_1, \dots, d_j, \dots, d_r]^T$ (wobei r der Gesamtanzahl der Messungen des PLS zum Kalibrierkörper

entspricht) minimiert und man erhält die benötigten 6DoF Parameter (Hartmann et al., 2017; Strübing und Neumann, 2013).

Kalibrierkörper Die Besonderheit des PVS ergibt sich aus der Möglichkeit, die PLS und Kameras in Abhängigkeit der örtlichen Situation auszurichten, also in einer Ebene zu rotieren und in einer Achse zu verschieben (Dennig et al., 2017). Zur Verwendung der Messdaten in einem gemeinsamen Koordinatensystem müssen die Kalibrierparameter der Ausrichtungen mit der erforderlichen Unsicherheit bekannt sein.

Unter Berücksichtigung des funktionalen Zusammenhangs der Gleichungen 4.13 und 4.14 wurde die Unsicherheit der Kalibrierparameter für verschiedene Geometrien von Kalibrierkörpern nach der Fehlerfortpflanzung und Monte Carlo Simulation berechnet. In einem iterativen Prozess wurden verschiedene Formen und Anordnungen so lange untersucht, bis jede Position der Scanner und Kameras optimal kalibriert werden konnte. Final besitzt der Kalibrierkörper 61 (= s) geneigte und versetzte Ebenen Abbildung 4.9. Der Körper (siehe Abbildung A.1) wurde im 3D Druckverfahren aus einem grauen, synthetischen Material hergestellt. Für eine einfache und reproduzierbare Anwendung während des Kalibriervorgangs, kann der Körper durch Zentrierstifte temporär an dem Wagen befestigt werden.

Die Ebenen des Kalibrierkörpers wurden vorab und einmalig eingemessen. Als Messsystem kamen ein Lasertracker in Verbindung mit einem hochgenauen Scansystem zum Einsatz (Leica T-Scan, Leica Geosystems AG (2013)). Die Ebenenparameter wurden von der erzeugten Punktwolke abgeleitet. Durch zusätzliche Messung der Positionen der Bohrungen auf dem Fahrzeug mit dem Lasertracker konnten die Ebenen einfach in das Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden.

Vorgehensweise der Systemkalibrierung Im Zusammenhang mit der Kalibrierung der PLS gibt es zwei wesentliche Prozesse. Der erste Prozess findet initial statt und danach nur noch in sinnvollen Abständen.

1. Prozess:

- 1.1. Siehe Abschnitt „Definition des MWKS“.
- 1.2. Siehe Abschnitt „Kalibrierkörper“.
- 1.3. Siehe Prozess 2.4.

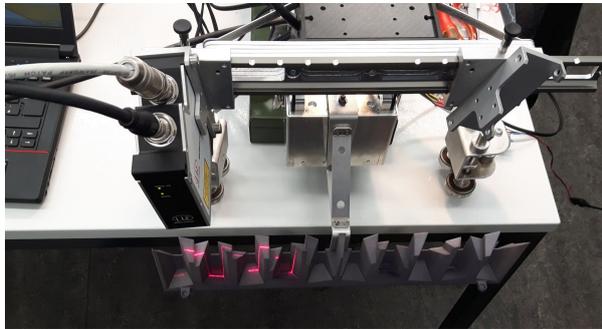
Der zweite Prozess muss vor einer Vermessung durchgeführt werden, bzw. idealerweise vor und, zur Kontrolle, nach jeder Messfahrt. Außerdem, wenn mindestens eine Aufnahme für PLS und Kameras absichtlich oder unabsichtlich verschoben oder gedreht wurde. Um die Kalibrierung zu beschleunigen, wurde dieser Prozess automatisiert.

2. Prozess:

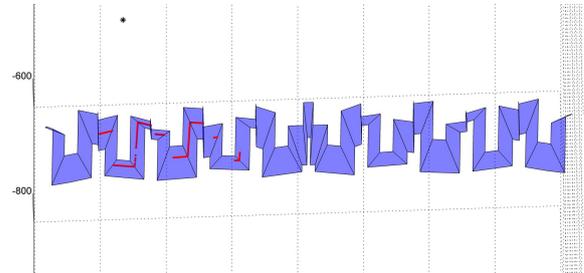
- 2.1. Nachdem der Kalibrierkörper an dem PVS Fahrzeug befestigt wurde, messen beide PLS auf den Kalibrierkörper. Diesem Schritt folgt anschließend eine Eliminierung von Punkten, die nicht auf dem Kalibrierkörper liegen.
- 2.2. Bei dem Schritt „Linien Extraktion“ werden die Messdaten mit Hilfe des Ramers-Douglas-Peucker Algorithmus in Linien unterteilt.
- 2.3. Der folgende Schritt beinhaltet die Zuordnung der extrahierten Linien den Ebenen des Kalibrierkörpers. Diese Zuordnung wird mit Hilfe der PLS Daten durch Verbesserung der Näherungswerte für die 6DoF Parameter erreicht. Die verbesserten Näherungswerte werden verwendet, um die PLS Daten zu drehen und verschieben. Schließlich wird die Zuordnung gewählt, bei denen der quadrierte Abstand zwischen Fläche und PLS Daten minimal ist.
- 2.4. Die finale Ausgleichung umfasst die exakte Näherung der 6DoF Parameter durch Anwendung der Methode von Strübing und Neumann (2013).
- 2.5. Nach dem Kalibrierungsprozess wird der Kalibrierkörper vom Wagen abgenommen und das PVS ist einsatzbereit.

2.6. Die Parameter der Kalibrierung werden in KPLSL und KPLSR in der Kalibrierdatei hinterlegt.

Abbildung 4.24a stellt den 2. Prozess unter Laborbedingungen dar. In Abbildung 4.24b wird das Ergebnis der Kalibrierung gezeigt.



(a) Durchführung der Kalibrierung (Quelle: Bureick, 2016).



(b) Auswertung der Kalibrierung in Matlab® (Quelle: Bureick, 2016).

Abbildung 4.24: Die Abbildungen 4.24a und 4.24b zeigen die Durchführung der Kalibrierung sowie das Ergebnis der Auswertung.

Bestimmung von Mittelwerten und Standardabweichungen für die Kalibrierparameter der PLS unter Laborbedingungen Der Kalibrierprozess der PLS wird durch die Montage des Kalibrierkörpers beeinflusst. Für die Bestimmung einer Wiederholgenauigkeit wurden mehrere Kalibrierungen nacheinander durchgeführt. Zeitliche Effekte und solche durch Erschütterungen sollten dadurch ausgeschlossen werden. Übrig bleiben Effekte, die von der Montage des Kalibrierkörpers herrühren.

Durchführung: Der Kalibrierkörper wurde zehnmal nacheinander an- und abgebaut. Dazwischen erfolgte eine Messung der PLS auf den Kalibrierkörper sowie Speicherung der Messwerte. Im Nachgang erfolgte die Bestimmung der Kalibrierparameter. Von den zehn Epochen in denen die 6DoF Parameter bestimmt wurden, sind im Anschluss die Standardabweichungen σ sowie die arithmetischen Mittelwerte des Messrauschens ermittelt worden. Die Tabellen 4.7 und 4.8 zeigen die Ergebnisse für den linken und rechten PLS. Zum Erkennen eventueller Systematiken wurden die jeweils niedrigsten und höchsten Werte hell- bzw. dunkelgrau hervorgehoben.

Die Mittelwerte der Standardabweichungen der 6DoF Parameter zeigen, dass das Konzept funktioniert und die erforderlichen Dimensionen im praktischen Versuch erreichbar sind. Die Mittelwerte liegen in der Größenordnung von $\leq 0,23$ mm, der in dem Abschnitt 4.4 abgeschätzt wurde. Die Min- und Max-Werte der Kalibrierparameter sind zufällig verteilt.

Die Standardabweichungen der ermittelten 6DoF Parameter, die in der jeweils letzten Zeile von Tabelle 4.7 und 4.8 stehen, lassen erkennen, dass genau in diesem Prozess unerwünschte Abweichungen produziert werden. Möglich sein sollten hier bei den Translationen ein σ in der Größenordnung von $0,05 - 0,1$ mm und bei den Rotationen ein σ in der Größenordnung von $0,001 - 0,002^\circ$. Die Arretierung des Kalibrierkörpers auf dem Wagen ist verbesserungswürdig und muss in einem Evolutionsschritt verändert werden.

Kameras Die Ermittlung der absoluten Orientierung der beiden Kameras wird in diesem Abschnitt beschrieben. Zur Anwendung kommt die Schätzung der Kamera-Pose, die auch als „Perspective-n-Point (PnP)“ Problem bezeichnet wird. Das Ziel ist, hierbei die Pose der kalibrierten Kameras durch ein Objekt, von dem 3D Punkte auf dessen Oberfläche und die zugehörigen 2D Projektionspunkte in einem Bild bekannt sind, zu ermitteln. In diesem Fall wird die im MWKS bekannte Lage des Kalibrierkörpers verwendet. Die Lage von Kamera zum Kalibrierkörper wird durch drei Translationen und drei Rotationen beschrieben.

Tabelle 4.7: Ergebnisse der zehn Kalibrierungen für den linken PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle zehn Kalibrierungen und die arithmetrischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt. Hellgrau unterlegt ist der niedrigste, dunkelgrau unterlegt ist der höchste Wert je Spalte eines Parameters

Nr.	tx	σ_{tx}	ty [mm]	σ_{ty}	tz	σ_{tz}	ω	σ_{ω}	ϕ [Grad]	σ_{ϕ}	κ	σ_{κ}	
1.	688,13	0,10	-110,84	0,08	76,12	0,02	3,382	0,003	-0,015	0,003	1,563	0,003	
2.	687,99	0,11	-110,49	0,09	76,50	0,02	3,378	0,003	-0,014	0,004	1,564	0,003	
3.	687,98	0,16	-110,48	0,09	76,50	0,02	3,378	0,003	-0,014	0,004	1,564	0,003	
4.	687,98	0,11	-110,49	0,09	76,50	0,02	3,378	0,003	-0,014	0,004	1,564	0,003	
5.	688,12	0,10	-110,82	0,08	76,12	0,02	3,382	0,003	-0,014	0,003	1,563	0,003	
6.	687,98	0,11	-110,48	0,09	76,50	0,02	3,378	0,003	-0,014	0,004	1,564	0,003	
7.	688,12	0,10	-110,81	0,08	76,13	0,02	3,382	0,003	-0,014	0,003	1,563	0,003	
8.	687,74	0,11	-110,28	0,09	77,01	0,02	3,377	0,003	-0,013	0,004	1,564	0,003	
9.	687,89	0,11	-110,36	0,09	77,01	0,02	3,378	0,003	-0,017	0,004	1,564	0,003	
10.	688,12	0,10	-110,81	0,08	76,13	0,02	3,382	0,003	-0,014	0,003	1,563	0,003	
		$\varnothing 0,10$		$\varnothing 0,09$		$\varnothing 0,02$		$\varnothing 0,003$		$\varnothing 0,003$		$\varnothing 0,003$	
		σ der 6DoF Parameter											
1.-10.	0,12		0,21		0,34		0,002		0,001		0,000		

Tabelle 4.8: Ergebnisse der zehn Kalibrierungen für den rechten PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle zehn Kalibrierungen und die arithmetrischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt. Hellgrau unterlegt ist der niedrigste, dunkelgrau unterlegt ist der höchste Wert je Spalte eines Parameters

Nr.	tx	σ_{tx}	ty [mm]	σ_{ty}	tz	σ_{tz}	ω	σ_{ω}	ϕ [Grad]	σ_{ϕ}	κ	σ_{κ}	
1.	688,30	0,18	101,88	0,12	78,34	0,04	2,795	0,004	-0,015	0,006	1,556	0,005	
2.	688,35	0,19	102,54	0,13	77,72	0,04	2,790	0,004	-0,016	0,006	1,556	0,005	
3.	688,35	0,19	102,55	0,13	77,72	0,04	2,790	0,004	-0,014	0,006	1,556	0,005	
4.	688,35	0,19	102,55	0,13	77,72	0,04	2,790	0,004	-0,014	0,006	1,556	0,005	
5.	688,30	0,18	101,88	0,12	78,34	0,04	2,795	0,004	-0,015	0,006	1,556	0,005	
6.	688,35	0,19	102,55	0,13	77,72	0,04	2,790	0,004	-0,014	0,006	1,556	0,005	
7.	688,30	0,18	101,89	0,12	78,34	0,04	2,795	0,004	-0,015	0,006	1,556	0,005	
8.	688,34	0,19	102,72	0,13	78,15	0,04	2,789	0,004	-0,014	0,006	1,556	0,005	
9.	688,34	0,19	102,73	0,13	78,15	0,04	2,789	0,004	-0,014	0,006	1,556	0,005	
10.	688,29	0,18	101,89	0,12	78,34	0,04	2,795	0,004	-0,015	0,006	1,555	0,005	
		$\varnothing 0,19$		$\varnothing 0,13$		$\varnothing 0,04$		$\varnothing 0,004$		$\varnothing 0,006$		$\varnothing 0,005$	
		σ der 6DoF Parameter											
1.-10.	0,03		0,38		0,30		0,003		0,000		0,000		

Die Kalibrierung der Kameras wurde im Abschnitt 4.6.1 dargestellt. Mit Hilfe eines Schachbrettmusters liefert der dort beschriebene Algorithmus die innere, äußere und relative Orientierung der beiden Kameras zueinander. Für den weiteren Verlauf werden jedoch nur die Parameter der inneren Orientierung verwendet. Unter der Annahme, dass (X, Y, Z) die MWKS Koordinaten eines 3D Punktes sind, R die Rotationsparameter und t die Translationsparameter, können die (x, y, z) Koordinaten eines Punktes P im KKS berechnet und nach folgender linearen Gleichung dargestellt werden (Mallick, 2016; OpenCV dev team, 2014):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t \quad (4.15)$$

Stellen R und t die Unbekannten dar und sind ausreichend Punktpaare bekannt, kann das Gleichungssystem gelöst werden. Zu berücksichtigen ist jedoch noch ein Skalierungsfaktor s , wodurch das System nicht mehr einfach lösbar wird. Hinzu kommt, dass nicht die Kamerapunkte (x, y, z) bekannt sind, sondern die Bildpunkte (u, v) . Unter Vernachlässigung der radialen Verzerrung und Berücksichtigung der Skalierung sowie der Brennweite (f_x, f_y) und des Hauptpunktes (c_x, c_y) (üblicherweise die Bildmitte) gilt folgende Gleichung (Mallick, 2016; OpenCV dev team, 2014):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s \cdot \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Gelöst werden kann das Gleichungssystem durch die Direct Linear Transform (DLT) Methode. Diese Methode kann immer bei einer fast linearen Gleichung mit einem Skalierungsfaktor angewendet werden. Die DLT Methode alleine ist jedoch nicht ausreichend. Sie minimiert nicht die korrekte Zielfunktion. Idealerweise soll der Reprojektionsfehler minimiert werden.

Für die Lösung werden zwingend R und t benötigt. Bekannt sind die 3D Punkte im MWKS und die ausgewählten 2D Punkte in den Abbildungen. Durch Minimierung der quadrierten Abstände zwischen 3D und 2D Punkten kann das Reprojektionsfehlermaß berechnet werden. Die DLT Lösung kann durch zufälliges Verändern der Pose optimiert werden. Die Levenberg-Marquardt Methode ist solch eine Optimierungsmethode.

Mit Hilfe der OpenCV Funktion „solvePnP Ransac“ erfolgt die Anwendung des beschriebenen Vorgehens. Wie der Funktionsname bereits suggeriert, wendet er RANSAC für eine robuste Schätzung der Pose an. Mit R und r der rechten und linken Kamera werden die beiden Projektionszentren O_l und O_r (siehe Abschnitt 4.6.1) in das MWKS transformiert. In einem nächsten Schritt wird rechnerisch der Offset zwischen dem Projektionszentrum O der Kamera und dem Zentrum des PLS bestimmt. Da Kamera und PLS über eine Befestigung starr miteinander verbunden sind, ist der Offset unveränderlich, solange die Sensoren nicht demontiert werden. Bei einer erneuten Kalibrierung müssen nur die PLS kalibriert werden. Nach Anbringen der Offsets sind auch die Kameras absolut orientiert. Die Parameter der Kalibrierung werden in KKL und KKR in der Kalibrierdatei hinterlegt.

Inklinometer Für die Anwendung ist die Ausrichtung des Inklinometers in der Längsrichtung des Fahrzeugs relevant. Die Orientierung des Inklinometers zum MWKS wird durch Messen zweier Kanten und Punkte auf der Oberfläche des NS-15/DMG2-U mit Hilfe der Leica T-Probe bestimmt. Der Bezugspunkt befindet sich im Zentrum des Inklinometers. Anschließend erfolgt die Transformation in das MWKS. Die Parameter der Orientierung werden in der Kalibrierdatei abgelegt (KINO).

IMU Für die Anwendung ist die Kenntnis der Ausrichtung der IMU in Fahrzeuggängsrichtung erforderlich. Die Messwerte der IMU 2.0 beziehen sich auf das Zentrum des 9-Achsen absoluten

Orientierungssensors (BNO055). Für die Systemkalibrierung wurden nachfolgende Schritte durchgeführt. Zunächst wird im ausgebauten Zustand des Bricks die Lage des Sensors zu der Platine bestimmt. Hierfür werden von dem Brick zwei orthogonal zueinander liegende Kanten gemessen, die auch im eingebauten Zustand mit der T-Probe bestimmt werden können. Zusätzlich werden zur Berechnung einer Ebene Punkte auf der Platine aufgehalten. Anschließend werden alle vier Kanten, sowie einige Punkte auf der Oberfläche des BNO055 mit der T-Probe gemessen. Aus den Kanten und Flächen kann der Ursprung des Sensors rekonstruiert werden. Mit der Messung auf der Platine ist die Position und Ausrichtung des BNO055 auf dem Brick bekannt.

Im eingebauten Zustand wird im Anschluss die Lage und Orientierung des BNO055 im MWKS durch aufmessen der Kanten und Punkte auf der Platine ermittelt. Die Parameter werden in der Kalibrierdatei hinterlegt (KIO).

Odometer Die Kalibrierung der Position beider Odometer im MWKS erfolgt gemäß dem nachfolgend beschriebenen Vorgehen. Der Wagen steht auf einem Profil. Es erfolgt eine Messung auf den CCR in der Drehvorrichtung. Anschließend wird die Position der Achsen beider Antriebe am Profil markiert. Der Wagen wird entfernt und die beiden angezeichneten Positionen aufgemessen. Die Ausrichtung der Fahrzeugachsen in X-Richtung wird bestimmt und die Positionen in der Kalibrierdatei abgelegt (OPA und OPE).

Ultraschallsensoren Die Bestimmung der Position der Ultraschallsensoren im MWKS ist auf einen Zentimeter ausreichend und kann den Konstruktionszeichnungen entnommen werden. Die Positionen werden in der Kalibrierdatei abgespeichert (UKA und UKE).

Drehvorrichtung für den Reflektor Die Kenntnis der 3D Position des Zentrums des CCRs zu dem MWKS ist von zentraler Bedeutung für die Bestimmung der Messwagenpose. Aufgrund der möglichen Rotationen um zwei Achsen ist eine Kalibrierung der Drehvorrichtung für den CCR notwendig. Horst und von Gösseln (2013) prüfen die Drehachse eines Schrittmotors und stellen eine Zentriergenauigkeit von 0,1 mm fest. Heunecke et al. (2015) ermitteln den Taumelfehler von einer Reflektor-Drehvorrichtung, bei der ein CCR direkt auf einer Motorachse befestigt wurde. Hierzu wurde die Drehvorrichtung auf einem horizontalen Drehtisch befestigt. Der ermittelte Fehler beträgt bei Verwendung eines 1,5" CCR 0,05 mm.

Ein Taumelfehler tritt auf, wenn die Achse beim Drehen ihre Lage nicht in aller Strenge beibehält, sondern um die Mittellage taumelt. Er ist ein mechanischer Fehler mit einem zufälligen und einem systematischen Anteil. Ein weiterer Fehler ist vorhanden, wenn eine geforderte Orthogonalität nicht eingehalten wird, also wenn Achsen nicht rechtwinklig zueinander stehen. Als dritter Fehler ist die Exzentrizität zu nennen. Sie beschreibt den Abstand von Mittelpunkten oder Symmetrieachsen zweier Formelemente.

Mit dem Ziel den Einfluss eines Taumelfehlers zu reduzieren, erfolgt bei dem PVS Messwagen der Antrieb der Dreh- und Kippachse indirekt (siehe auch Abschnitt 4.3.6). Eng tolerierte Gleitlager sollen den zufälligen Anteil des Taumelfehlers zusätzlich reduzieren.

Für die Feststellung von Orthogonalitätsfehlern und Exzentrizitäten wurde die Lage folgender Bauteile mit Hilfe der Leica T-Probe überprüft. Hierfür wurde der PVS Messwagen auf ein Profil mit ebener Fläche gestellt:

- Fläche der Profilerseite
- Drehachse
- CCR Driftnest
- CCR Zentrum

Die Parameter werden in der Kalibrierdatei abgelegt (KDOF).

Die ermittelten Parameter wurden aus zeitlichen Gründen im Algorithmus nicht implementiert. Folglich wurde die Dreh- und Kippfunktion bei den in Kapitel 6 beschriebenen Testmessungen nicht eingesetzt, auch wenn es mechanisch und elektrisch möglich gewesen wäre.

5 Zustandsgrößen einer überarbeiteten VDI 3576

In diesem Kapitel werden die Voraussetzungen beschrieben, aus den Rohdaten der Sensoren Zustandsgrößen ableiten zu können, die in eine überarbeitete VDI 3576 aufgenommen werden sollen. Hierfür wird auf die in Kapitel 3 ausgeführten Grundlagen sowie die im Kapitel 4 beschriebenen Sensoren aufgebaut. In Abschnitt 5.1 wird auf Besonderheiten der Messdatenerfassung und -aufbereitung eingegangen. Ziel von Abschnitt 5.2 ist es, ein mathematisch stochastisch begründetes nichtlineares Filtermodell aufzustellen, das die Kinematik der Plattform hinreichend genau beschreibt, so dass bei der Geschwindigkeit der Plattform von 1 m/s die geometrischen und zeitlich resultierenden Abweichungen von $1/10$ mm, bzw. 1 ms möglichst nicht überschritten werden. Erst nachdem die Bewegung der Sensorplattform mit Hilfe des Filters gegeben ist, kann mit der Ableitung der Zustandsparameter zur Bewertung des Zustandes des Profils fortgefahren werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird der in Abschnitt 3.1.5 beschriebene Unscented Kalman Filter (UKF) verwendet. Im Vergleich zu dem Extended Kalman Filter gibt es gemäß Literatur nur wenige Unterschiede. Als Auswahlkriterium kann angeführt werden, dass der Prädiktionsteil des UKF ableitungsfrei ist, da er auf einem statistischen Ansatz beruht. Der Austausch von Bewegungsmodellen wird dadurch vereinfacht. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass das UKF mit nicht-linearen Modellen besser umgehen kann als das EKF.

5.1 Messdatenerfassung und -aufbereitung

5.1.1 Messdatenerfassung

Die Messwerte des Lasertrackers bzw. Tachymeters, des Inklinometers, der Encoder, der IMU, der PLS und der Kameras werden während der Messung in einem ROS Bag gespeichert (Abschnitt 4.5.4). Für die Auswertung werden die Daten aus dem ROS Bag gelesen, zum Teil aufbereitet und weiter verarbeitet. Die Rohdaten bleiben folglich unangetastet und können jederzeit erneut ausgelesen werden.

Alle Messwerte sind mit einem Zeitstempel versehen. Beim Einlesen aus dem ROS Bag werden die Daten der einzelnen Sensoren zusammengeführt und chronologisch sortiert. Die Sensoren liefern Messwerte, die für die Berechnung der Trajektorie oder für die Ableitung von Zustandsgrößen benötigt werden (siehe auch Abschnitt 5.2). Für die Verarbeitung in dem UKF Filter werden die Messwerte des Lasertrackers, bzw. des Tachymeters aufbereitet, bevor sie für die Berechnung der Trajektorie verwendet werden.

5.1.2 Orientierungsparameter aus Positionsdaten

In dem folgenden Unterabschnitt sollen zwei Ansätze für die Bestimmung zweier Orientierungsparameter des PVS Messwagens untersucht und verglichen werden. Voraussetzung dafür sind Positionsdaten aus Lasertracker- oder Tachymeterdaten, so wie sie durch eine modulare Konfiguration 1 oder 2 des PVS zur Verfügung stehen (vgl. Abschnitt 4.3).

Ansatz 1 (Sehne) Die Orientierungsparameter Gierwinkel κ und Nickwinkel ϕ des Messwagens einer Epoche k sind mit Hilfe der Position einer weiteren Epoche $(k + 1)$ bestimmbar:

$$\begin{aligned}\kappa_k &= \arctan\left(\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k}\right) \\ \phi_k &= \arctan\left(\frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k}\right).\end{aligned}\tag{5.1}$$

Der für eine vollständige Orientierung fehlende Rollwinkel ω^1) kann durch die Messwerte der Inklinometermessungen, die ebenfalls vorher durch eine Spline bzw. B-Spline Funktion approximiert wurden, ergänzt werden.

Die 3D Punkte der beiden Epochen k und $k + 1$ liegen auf der Trajektorie. Haben die beiden 3D Punkte der Epochen k und $k + 1$ den Abstand der Führungsrollen, beschreiben die Orientierungsparameter zusammen mit dem 3D Punkt der Epoche k die Pose dieser Epoche. Im Fall eines Kreisbogens ist die beide Epochen verbindende Gerade eine Sehne. Der Vorteil dieser Überlegung ist, dass die Bestimmung der Orientierung sich an der realen Ausrichtung des Messwagens orientiert. Ein Nachteil ist, dass für die Berechnung einer Orientierung Epochen im Abstand der Führungsrollen bekannt sein müssen.

Ansatz 2 (Tangente) Es soll ein alternativer Ansatz betrachtet werden, der unabhängig von einer weiteren Epoche ist. Nimmt man einen idealen Kreisbogen an, stellt die sie verbindende Gerade der beiden Epochen eine Sehne dar. Durch die Reduzierung des Abstands zwischen den beiden Epochen auf Null wird aus der Sehne eine Tangente, die die Trajektorie an der Position der Epoche k berührt. Die X, Y, Z-Komponenten der Pose zum Zeitpunkt k seien durch eine Parameterdarstellung gegeben:

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ z(k) \end{bmatrix}.\tag{5.2}$$

Für eine Epoche k_0 ist dann $\mathbf{x}(k_0)$ ein Punkt auf der Kurve. Mathematisch betrachtet ist eine Tangente eine Gerade, die an einem Punkt $\mathbf{x}(k_0)$ eine Kurve berührt. Ihre Gleichung entspricht also der einer Geraden:

$$\mathbf{T}(s) = \begin{bmatrix} T_1(s) \\ T_2(s) \\ T_3(s) \end{bmatrix} = \mathbf{a} + s \cdot \mathbf{v}, \quad s \in \mathbb{R}.\tag{5.3}$$

Der Parameter der Tangente wird mit s bezeichnet. Der Punkt \mathbf{a} liegt auf der Tangente. Da der Kurvenpunkt der Epoche k_0 identisch mit der Tangente sein soll, ist $\mathbf{a} = \mathbf{x}(k_0)$. \mathbf{v} ist der Richtungsvektor. Er ist der Ableitungsvektor der Parameterdarstellung der Kurve an der Epoche k_0 :

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{x}}(k_0) = \begin{bmatrix} \dot{x}(k_0) \\ \dot{y}(k_0) \\ \dot{z}(k_0) \end{bmatrix}.\tag{5.4}$$

Die Gleichung der Tangente an der Stelle s hat folglich die Darstellung:

$$\mathbf{T}(s) = \mathbf{x}(k_0) + s\dot{\mathbf{x}}(k_0), \quad s \in \mathbb{R}.\tag{5.5}$$

¹Im Englischen werden die Bezeichnungen „roll“, „pitch“, und „yaw“ für Roll- (Drehung um die x-Achse), Nick- (Drehung um die y-Achse) und Gierwinkel (Drehung um die z-Achse) verwendet. Beschrieben wird mit diesen Eulerwinkeln die Orientierung eines Objekts im dreidimensionalen Raum. Alternativ zu dem Begriff „yaw“ kann der Begriff „heading“ verwendet werden.

Es bietet sich an, die Tangente als Basis für die Bestimmung von Orientierungsparametern zu nehmen.

Das lokale Verhalten der Kurve wird durch drei Vektoren beschrieben: Tangenteneinheitsvektor \mathbf{t} , Hauptnormalenvektor \mathbf{n} und Binormalenvektor \mathbf{b} . In dieser Reihenfolge bilden sie ein Rechtssystem und eine Orthonormalbasis des \mathbb{R}^3 . Die Vektoren haben also alle den Betrag eins und sind paarweise senkrecht zueinander. Diese Orthonormalbasis wird auch als begleitendes Dreibein der Kurve bezeichnet.

Mit Hilfe der sogenannten Frenetschen Formeln ist es möglich, die Ableitungen der drei Vektoren nach der Bogenlänge s als Linearkombination dieser drei Vektoren darzustellen. Die in den Frenetschen Formeln enthaltene Torsion $\tau(s)$ beschreibt die Richtungsänderung des Binormaleneinheitsvektors. Die ebenfalls enthaltene Krümmung $\kappa(s)$ stellt die Richtungsänderung des Tangenteneinheitsvektors dar.

Punkte, bei denen die Krümmung κ die Größe Null hat, heißen Wendepunkte. Die Ableitung des Tangenteneinheitsvektors \mathbf{t} ist an diesen Stellen der Nullvektor. Der Binormalenvektor \mathbf{b} liefert an diesen Stellen keine brauchbaren Informationen mehr. Haben mehrere Punkte in Folge die Krümmung Null, handelt es sich bei diesem Abschnitt der Raumkurve um eine Gerade.

Die Ausführungen machen deutlich, dass der Hauptnormalenvektor \mathbf{n} und der Binormalenvektor \mathbf{b} für die Bestimmung der Orientierungsparameter des PVS Messwagens ungeeignet sind. Dafür zeigt der Tangenteneinheitsvektor \mathbf{t} in die Richtung der Tangente bei der Epoche k_0 der Raumkurve. Der Tangenteneinheitsvektor \mathbf{t} ist der normierte Richtungsvektor an der Stelle k_0 :

$$\mathbf{t}(k_0) = \frac{1}{|\dot{\mathbf{x}}(k_0)|} \dot{\mathbf{x}}(k_0). \quad (5.6)$$

Aus den normierten Komponenten des Tangenteneinheitsvektors \mathbf{t} können nun die Orientierungsparameter κ und ϕ berechnet werden:

$$\begin{aligned} \kappa_{k_0} &= \arctan \frac{t_{y,k_0}}{t_{x,k_0}} \\ \phi_{k_0} &= \arctan \frac{t_{z,k_0}}{t_{x,k_0}}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Den Wert für den Rollwinkel ω liefert das Inklinometer.

Gegenüberstellung der beiden Ansätze Durch eine einfache Abschätzung kann gezeigt werden, dass der 1. Ansatz, die Bestimmung der Orientierungsparameter durch zwei Positionen, einen Gierwinkel liefert, der näher an der Realität liegt.

Bestimmt werden soll der Winkel zwischen einer Sehne und einer Tangente. Angenommen wird ein Objekt mit rechteckiger Grundfläche und mit jeweils einer Führungsrolle pro Ecke. Das Objekt bewegt sich auf einem horizontalen Kreisbogen mit Radius $R = 10$ m. Für die seitlichen Führungsrollen wird ein Abstand in Längsrichtung von $d_2 = 660$ mm angenommen.

Mit Hilfe des Sehnen-Tangentenwinkelsatzes kann der Winkel einfach berechnet werden. Der Satz besagt, dass der Sehnen-Tangentenwinkel α gleich jedem Peripheriewinkel ϕ über dem Kreisbogen ist, der zwischen den Schenkeln des Sehnen-Tangentenwinkels liegt. Legt man nun fest, dass der eine Schenkel durch den Mittelpunkt verläuft, also demnach die Länge $2R$ hat, dann befindet sich nach dem Thalesatz zwischen dem anderen Schenkel und der Sehne d_2 ein rechter Winkel (Abbildung 5.1).

Der Winkel α zwischen Tangente und Sehne berechnet sich wie folgt:

$$\alpha = \arcsin \frac{d_2}{2 \cdot R} = \arcsin \frac{660 \text{ mm}}{2 \cdot 10 \text{ m}} = 1,89^\circ. \quad (5.8)$$

Die Orientierung des Messwagens kann unter Berücksichtigung der Anlage beider Führungsrollen

(1. Ansatz) genauer bestimmt werden als mit dem 2. Ansatz. Der in dem Rechenbeispiel ermittelte Wert von $1,89^\circ$ errechnet sich bei einem angenommenen Radius von 10 m, aus der Differenz einer angenommenen tangentialen Orientierung und einer auf zwei Punkten basierenden Orientierung.

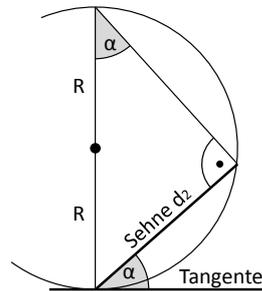


Abbildung 5.1: Sehn-Tangentenwinkelsatz.

5.1.3 Aufbereitung der Lasertracker- oder Tachymeterdaten

Der georeferenzierende Sensor, in diesem Fall ein Lasertracker oder ein Tachymeter, liefert Messwerte, die zur Bestimmung der Position und Orientierung des Messwagens dienen. Um die hohe Genauigkeit des Sensors zu nutzen, können indirekt, durch die Auswertung von zwei Fahrzeugpositionen, die Orientierung in zwei Achsen (Gier- und Nickwinkel) berechnet werden. Der dritte Orientierungsparameter der Pose ist der Rollwinkel. Er wird durch die Beobachtungen des Inclinometers bzw. der IMU festgelegt.

Aus zwei Positionen, die sich im Abstand der beiden ungefederten Führungsrollen befinden, können die beiden Orientierungsparameter (Gier- und Nickwinkel) berechnet werden. Der Abstand ist variabel, da er von der Schienenkopfbreite (d_1) abhängt, aber konstant, solange die Aufnahmen der Führungsrollen nicht bewegt werden. Die Bestimmung des Abstands (d_2) erfolgt durch direkte Messung, z. B. mit einem Bandmaß. Beide Führungsrollen sind fest mit dem Fahrzeug verbunden und liegen immer an dem Profil an. Änderungen der Profildbreite, z. B. aufgrund von Abnutzung, werden durch die gefederten Führungsrollen der gegenüberliegenden Seite kompensiert. Die Fahr- und Führungsrollen übertragen somit jede Lage- und Änderung des Z-Wertes, die Einfluss auf die Orientierung der Sensoren im Raum hat. Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 5.2 drei mit einem Lasertracker oder Tachymeter aufgenommene Epochen ($k - 1, k, k + 1$).

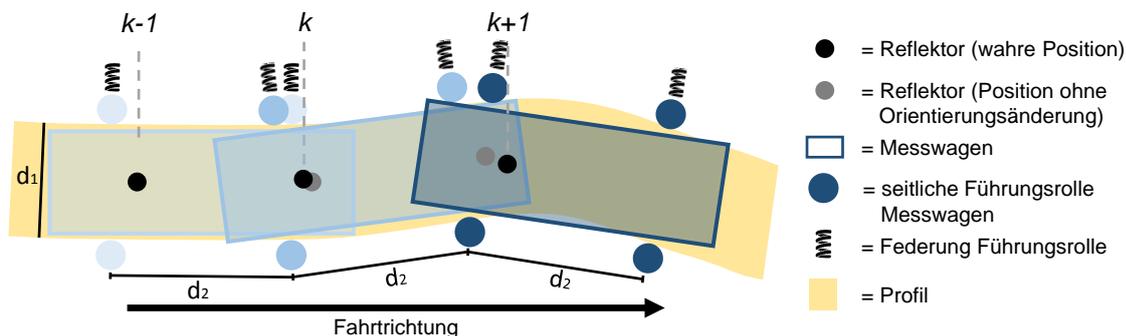


Abbildung 5.2: Posen des PVS zu drei Epochen auf einem Profil.

Korrektur des Gier- und Nickwinkels Bei der Berechnung des Gier- und Nickwinkels aus Lasertracker- oder Tachymeterdaten ist das Anbringen von Korrekturwerten zu berücksichtigen. Abbildung 5.2 ist zu entnehmen, dass im Falle z. B. eines gebogenen Profils oder einer Unstetigkeit der Wagen an der Position k eine andere Orientierung als an Position $k - 1$ hat. Kann die Differenz beider Orientierungen (α) ermittelt werden, ist es möglich, für die Berechnung der Pose an Position k die Position von $k - 1$ um die ermittelte Differenz zu korrigieren und die Orientierung an der Position

k erneut zu berechnen. Bei der Anbringung dieser Korrektur ist zu berücksichtigen, dass für die Bestimmung der Orientierung einer Epoche die Positionen um zwei Fahrzeuglängen im Voraus bekannt sein müssen.

Abschätzung Nachfolgend wird der Einfluss der Abweichung exemplarisch für den Gierwinkel abgeschätzt. Es sind sowohl konstante Gierwinkel, wie bei einem Bogen, als auch sich ändernde, wie z. B. bei breiteren Profilstößen oder Ausbrüchen im Profil möglich. Abbildung 5.3 zeigt die Zusammenhänge. Die Korrektur für den Nickwinkel erfolgt simultan.

Angenommen werden für dieses Beispiel die folgenden Parameter:

- Änderung des Gierwinkels κ um $\alpha = 1^\circ$
- Profilbreite $d_1 = 300$ mm. Daraus folgt der
- Abstand der Führungsrollen in Längsrichtung: $d_2 = 548$ mm und
- der sich aus dem Gierwinkel ergebende Radius des Profils von ca. $R = 31,4$ m
- der Reflektor hat von der Fahrkante den Abstand $d_3 = 150$ mm sowie eine
- Exzentrizität $d_4 = 30,1$ mm

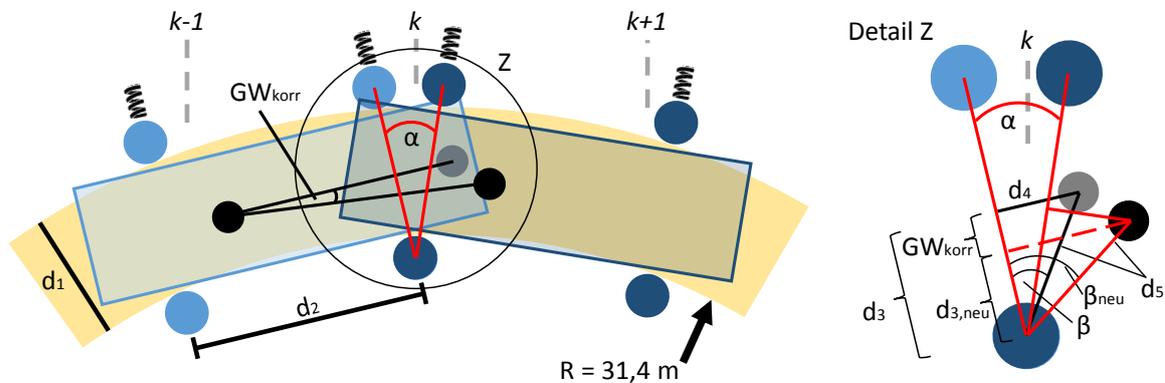


Abbildung 5.3: Position des Reflektors im Bezug zur Fahrkante. Legende siehe Abbildung 5.2.

Der folgende Rechenweg führt zu dem Korrekturwert GW_{korr} [deg], um den der Gierwinkel κ des Messwagens für die Epoche k korrigiert werden muss:

$$\begin{aligned}
 d_5 &= \sqrt{d_3^2 + d_4^2} && \approx 152,99 \text{ mm} \\
 \beta &= \arctan(d_4/d_3) && \approx 11,35^\circ \\
 \beta_{neu} &= \beta + \alpha && \approx 12,35^\circ \\
 d_{3,neu} &= d_5 \cdot \cos(\beta_{neu}) && \approx 149,45 \text{ mm} \\
 GW_{korr} [mm] &= d_3 - d_{3,neu} && \approx 0,55 \text{ mm} \\
 GW_{korr} [deg] &= \arctan(GW_{korr} [mm]/d_2) && \approx 0,06^\circ
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Verfügbarkeit der Orientierungsparameter Für die Berechnung einer Pose (ohne Neigung) aus Lasertracker- oder Tachymeterdaten sind für das PVS im Detail die folgenden Besonderheiten zu beachten:

- Für jede Pose ist für die Epoche k eine Position der Epoche $k + i$ in der Zukunft zu finden, die dem Abstand der Rollen am nächsten kommt.
- Für bestimmte Epochen k können keine Orientierungsparameter berechnet werden. Und zwar ab einer Wagenlänge vor dem Ende der Hinfahrt. Hierfür wird angenommen, dass sich der Reflektor auf der dem Streckenanfang zugewandten Seite befindet.

Daraus folgt, dass nicht alle durch einen Lasertracker oder Tachymeter bestimmten Positionen Orientierungsparameter besitzen. Abbildung 5.4 zeigt diese Situation. Dargestellt ist eine Hin- und Rückfahrt des Messwagens. Bei einer Messung mit einem Tachymeter oder Lasertracker ist das für die Durchführung der Messung in zwei Lagen notwendig. Sowohl bei einer Messung mit Lasertracker

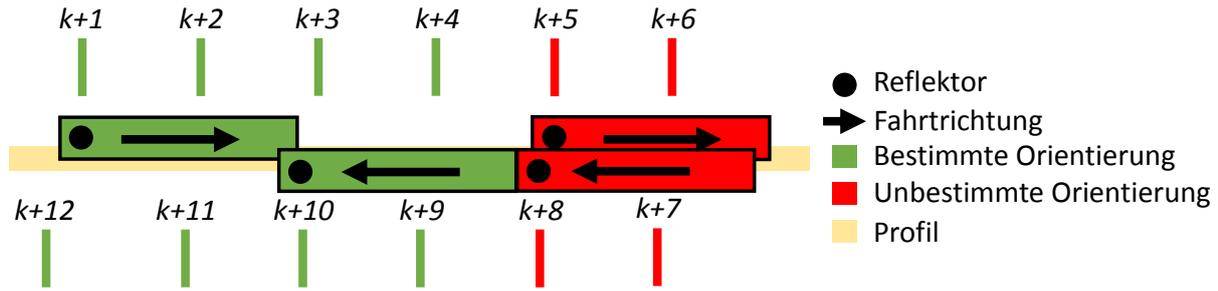


Abbildung 5.4: Epochen $k + i$, mit $i \in \mathbb{N}$, die auf Grundlage der Beobachtungen eines Lasertrackers oder Tachymeters eine bestimmbare (grün) oder nicht bestimmbare (rot) Orientierung haben.

als auch mit Tachymeter sorgen die Messwerte aus der Hin- und Rückfahrt für Redundanz und für die Elimination bzw. Reduktion von instrumentellen Fehlerquellen.

Grüne Bereiche stellen Positionen mit Orientierung und rote Bereiche ohne Orientierung dar. Rote Bereiche müssen im Verlauf des Filters durch Inklinometer- oder IMU-Daten gestützt werden, um die Orientierung bestimmen und somit die Pose vervollständigen zu können.

5.1.4 Korrektur der Beschleunigungswerte von der Erdschwere

Die Daten des auf dem Messwagen integrierten Beschleunigungssensors der IMU fließen als Messgrößen in dem Update Schritt des Kalman Filters ein. In dem Prädiktionsschritt des Filters werden die Beschleunigungen für das Bewegungsmodell, direkt und indirekt, für die Bestimmung von Position und Geschwindigkeit verwendet.

Bewegt sich der Messwagen auf einer idealen horizontalen Ebene, liefert der Sensor die tatsächliche Beschleunigung. Ist der Wagen geneigt, z. B. aufgrund eines abgefahrenen Profils, sind in den Messwerten von der Gravitation abhängige Komponenten enthalten, die für die weitere Verarbeitung der Beschleunigungsdaten nachteilig sind (Nistler und Selekw, 2011).

Durch einen einfachen numerischen Algorithmus sollen die Einflüsse von Schwere, Corioliskraft und den Rotationskomponenten der Beschleunigung bestmöglich kompensiert werden. Hierfür werden die Beschleunigungswerte mit Hilfe der bekannten Quaternion in die Ebene gedreht und auf die Z-Achse normiert. Der Übersicht halber wird im Folgenden auf den Index k , zur Darstellung der Epoche, verzichtet. g_x , g_y und g_z stellen die aus der Quaternion umgerechneten Schwere in x -, y - und z -Achse als Einheitsvektor dar (DIY Drones, 2013):

$$\begin{aligned} g_x &= 2 \cdot (q_1 \cdot q_3 - q_0 \cdot q_2) \\ g_y &= 2 \cdot (q_0 \cdot q_1 + q_2 \cdot q_3) \\ g_z &= q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Die Beschleunigungen a_x , a_y und a_z der IMU werden auf die Erdschwere G umgerechnet:

$$\begin{aligned} a_{x,skaliert} &= a_x/a_z \\ a_{y,skaliert} &= a_y/a_z \\ a_{z,skaliert} &= a_z/a_z. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Die kompensierte Beschleunigung ergibt sich im Folgenden aus der Differenz der skalierten Beschleunigung und der aus der Quaternion berechneten Schwere sowie dessen Produkt mit der mittleren

Erdbeschleunigung im Vermessungsgebiet, z. B. $9,81 \text{ m/s}^2$:

$$\begin{aligned} acc_{x,komp} &= (a_{x,skaliert} - g_x) \cdot 9,81 \\ acc_{y,komp} &= (a_{y,skaliert} - g_y) \cdot 9,81 \\ acc_{z,komp} &= (a_{z,skaliert} - g_z) \cdot 9,81. \end{aligned} \quad (5.12)$$

5.1.5 Korrektur der Inklinometermesswerte von Beschleunigungseinflüssen

Sind die Beschleunigungswerte von der Erdschwere korrigiert (siehe Abschnitt 5.1.4), können sie zur Korrektur der Inklinometermesswerte verwendet werden.

Der Vorteil der gedämpften Messung des flüssigkeitsgelagerten Inklinometers ist gleichzeitig ein Nachteil. Durch das Nachpendeln der Flüssigkeit werden die Ergebnisse verfälscht.

Starke Beschleunigungsänderungen müssen als zusätzliche Unsicherheit berücksichtigt werden. Da das Messfahrzeug mit relativ konstanter Geschwindigkeit fährt, sind starke Beschleunigungsänderungen in Längsrichtung nicht die Regel und von untergeordneter Bedeutung.

5.1.6 Korrektur der Längs- und Querablage

Die mit einem Hilfsmittel (Abbildung 4.1) oder automatisierten Messsystemen (Abschnitt 2.3.5) aufgenommenen Punkte müssen in der Quer- und Längsablage um den Offset zur Schienenachse korrigiert werden. Die Offsets sind durch eine Kalibrierung zu ermitteln, können aber in Abhängigkeit der Abnutzung der Schiene nur eine Näherung darstellen.

Alternativ dazu ermöglicht das PVS, das mit PLS ausgestattet ist, eine Offsetbestimmung auf Grundlage der Scandaten. Die ermittelten Offsets können an jedem Messpunkt variieren und werden additiv angebracht.

Abbildung 5.5 zeigt den Entscheidungspfad zur Berücksichtigung der Offsets für die Längs- und Querablage.

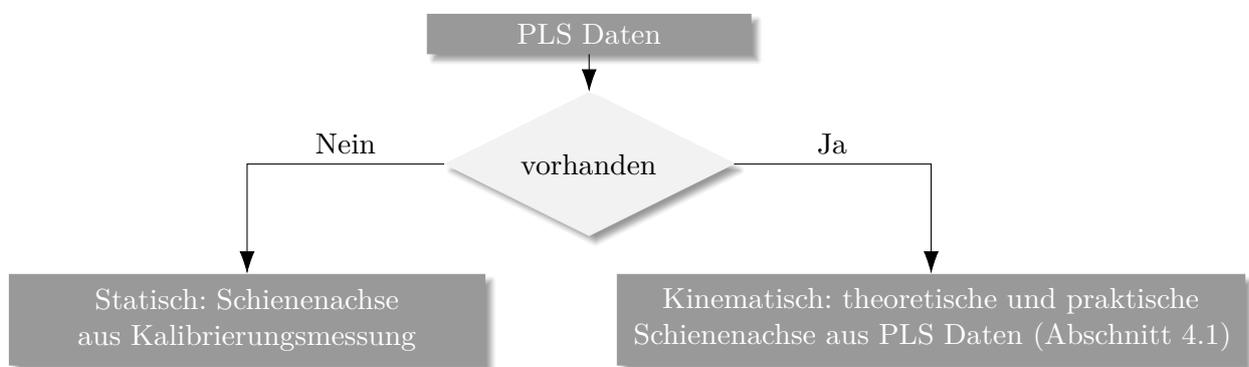


Abbildung 5.5: Korrektur der Längs- und Querablage in Abhängigkeit der eingesetzten Messmittel.

5.2 Sensorfusion für die Georeferenzierung des Profilmesswagens

Für eine bestimmte Anwendung können die Messwerte eines einzelnen Sensors nicht umfassend, genau oder zuverlässig genug sein. Für das in dieser Arbeit beschriebene Multisensorsystem PVS sind das die in den Kapiteln 2.2.3 und 4.1 beschriebenen Zustandsgrößen, für deren Bestimmung ein einzelner Sensor nicht ausreicht. Die Lösung ist in diesem Fall die Nutzung der Messwerte mehrerer Sensoren, um dadurch die Realität der Umwelt oder das Verhalten von Objekten besser oder überhaupt erst darzustellen. Das Zusammenführen dieser Daten und die optimale Auswertung, die zu einem möglichst exakten Abbild führt, wird als Sensordatenfusion bezeichnet. Dabei können die Sensoren auf unterschiedlichen Messverfahren beruhen und die gleiche Messgröße bestimmen oder in einer Kombination die gewünschte Größe liefern. Dies bietet Vorteile, wie z. B.: Höhere

Genauigkeit, Auflösung, Zuverlässigkeit, Ausfallsicherheit, Robustheit, Driftstabilität, Detailgrad, etc. (Silva, 2017). Aber auch die Nachteile sind nicht zu unterschätzen. So werden mit der Zunahme der Datenrate auch die zu verarbeitenden Datenmengen und deren Übertragung umfangreicher und komplexer. Hierdurch wiederum wird das Risiko von Fehlern bei der Implementierung und Schwierigkeiten bei der Integration gesteigert. Die größte Herausforderung ist in der Regel die notwendige Synchronisation der Daten.

Sensorfusionen können gemäß Silva (2017) nach Kriterien, wie z. B. der Funktionalität, kategorisiert werden:

- Komplementäre Fusion: Die Sensoren liefern komplementäre, also verschiedene Daten, die dann gemeinsam ausgewertet werden. Ein Vorteil ist die Umfänglichkeit der Daten.
- Konkurrierende Fusion: Die Sensoren liefern Daten eines gleichen Beobachtungsbereichs. Vorteile sind die Verbesserung der Genauigkeit und Robustheit sowie Reduzierung der Messunsicherheit.
- Kooperative Fusion: Die Messdaten der Sensoren ergänzen sich und ermöglichen so die Bestimmung der gewünschten Messgröße und/oder erhöhen die Genauigkeit.

Aufgrund der hohen Genauigkeit und Abtastrate beeinflusst primär der Lasertracker die Bestimmung der Trajektorie des PVS-Messwagens. Die Ergebnisse werden gestützt durch die übrigen Sensoren. Gemäß dem Konzept des Kalman-Filters werden zeitlich aufeinander folgende Positionen auf Grundlage der stochastischen Erfahrung und der gemessenen Größen berechnet. Die Darstellung des Datenflusses von den Rohdaten der einzelnen Sensoren bis zu den gewünschten Zustandsgrößen wird in Abbildung 5.6 dargestellt. Hiernach werden die Messwerte von Inklinometer, Odometer und IMU zunächst durch Skalieren und Normieren sowie gegebenenfalls durch Orthogonalisieren und von einem Offset korrigiert (siehe hierzu auch Abschnitt 4.6). Es folgt die Transformation von dem Sensorkoordinaten- in das Fahrzeug- bzw. übergeordnete Koordinatensystem. In den weiteren Schritten werden die Sensordaten in dem Kalman-Filter verarbeitet und liefern als Ergebnis die Pose des Messwagens.

Das Kalman-Filter ermöglicht die gemeinsame Auswertung aller Sensordaten bei einem linearen Systemverhalten. Der in Kapitel 3.1.5 beschriebene Algorithmus 3.1 eines Unscented Kalman Filters (UKF) ist auch für nichtlineare Systeme gut geeignet. In den folgenden Abschnitten werden die Adaptionen für das in Abschnitt 4.3 eingeführte PVS erläutert.

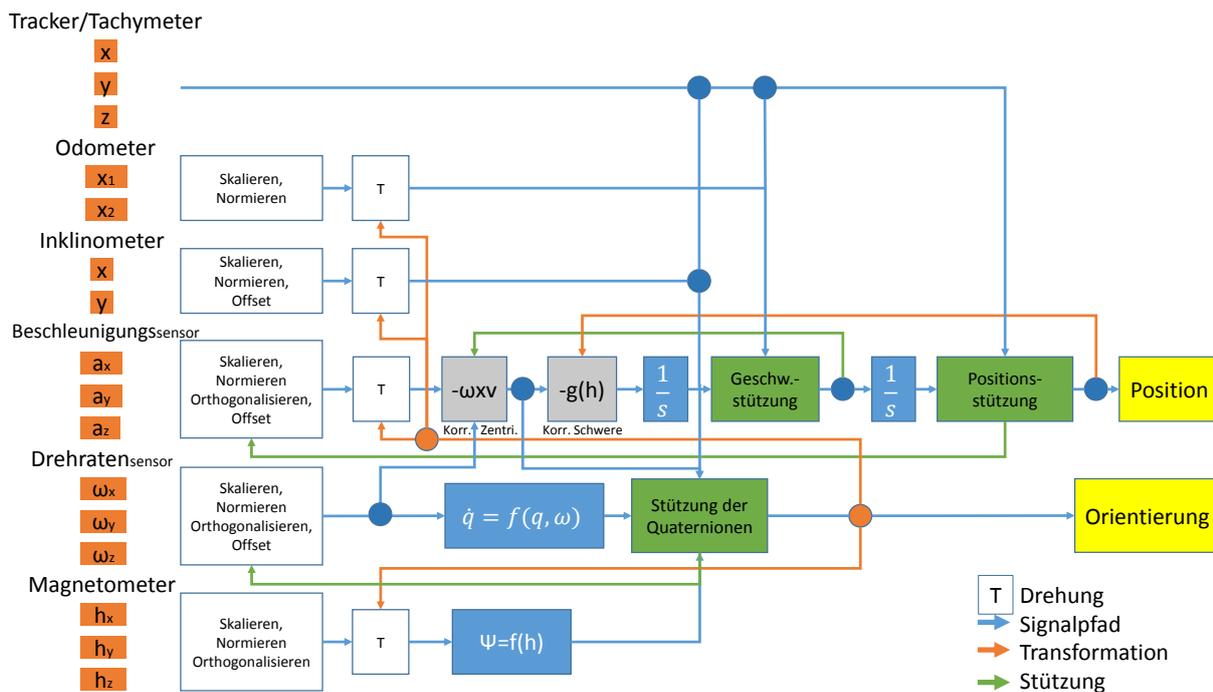


Abbildung 5.6: Visualisierung der Sensorfusion in Anlehnung an Rosenberg (2006, S. 46).

5.2.1 Quaternionen

Die Lage von Objekten im Raum oder von Koordinatensystemen zueinander kann in Eulerwinkeln dargestellt werden. Die Angabe erfolgt dann durch drei Winkel, dem Rollwinkel ϕ dem Nickwinkel θ und dem Gierwinkel ψ . Ein Nachteil der Eulerwinkel ist ihre Singularität, wodurch mathematische und numerische Probleme entstehen können. Nach Zanetti et al. (2009) wird für Echtzeit Anwendungen im Raum daher die Darstellung der Pose mit Quaternionen bevorzugt.

Eine Quaternion wird eindeutig beschrieben durch vier reelle Zahlen (q_0, q_1, q_2, q_3) , die ergänzt werden durch die drei komplex-imaginären Zahlen i, j und k . Zusammen bilden sie ein vierdimensionales Zahlensystem und die grundlegende Formel der Quaternionen-Algebra:

$$\mathbf{q} = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k. \quad (5.13)$$

Der erste Summand wird als Realteil, die letzten drei Summanden als Imaginärteil bezeichnet.

Eine beliebige Quaternion $q \neq 0$ kann normiert werden:

$$\frac{\mathbf{q}}{|\mathbf{q}|} = \frac{q_0}{|\mathbf{q}|} + \frac{q_1}{|\mathbf{q}|} \cdot i + \frac{q_2}{|\mathbf{q}|} \cdot j + \frac{q_3}{|\mathbf{q}|} \cdot k. \quad (5.14)$$

In dieser Arbeit wird der vierdimensionale reelle Vektorraum zur Darstellung der Quaternionen verwendet. Die skalare Komponente q_0 sowie die drei Vektorteile q_1, q_2 und q_3 werden zu einem vierdimensionalen Vektor \mathbf{q} zusammengefasst. Die drei imaginären Zahlen i, j und k haben für die weitere Betrachtung keine Relevanz und werden der Übersicht halber nicht dargestellt.

Die aufgrund der Überbestimmung notwendige Restriktion einer normierten Quaternion (Einheitsquaternion) mit ihren vier Parametern ist, dass ihre Quadratsumme eins beträgt:

$$|\mathbf{q}| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1. \quad (5.15)$$

Es ist auf die Reihenfolge der Parameter zu achten. In diesem Fall stellt q_0 den skalaren Anteil dar sowie q_1, q_2 und q_3 den Vektorteil. Die Multiplikation von Quaternionen ist assoziativ, jedoch nicht kommutativ. Das Distributivgesetz gilt. Einheitsquaternionen bleiben nach Multiplikation sowie Inversion Einheitsquaternionen.

Die Berechnung einer Quaternion q , mit Drehwinkel $\theta \in [0, 2\pi)$ um den Einheitsvektor $\vec{e} = (\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)^T$ kann wie folgt berechnet werden (Kraft, 2003):

$$q_0 = \cos(\theta/2) \quad (q_1, q_2, q_3)^T = \sin(\theta/2) \cdot \vec{e}. \quad (5.16)$$

Die Berechnung der Quaternion \mathbf{q}_e , welche die Differenz bzw. die Drehung von Quaternion \mathbf{q}_a nach \mathbf{q}_b beschreibt ($\mathbf{q}_b = \mathbf{q}_e \cdot \mathbf{q}_a$), erfolgt durch die Multiplikation von \mathbf{q}_b mit der Inversen von \mathbf{q}_a :

$$\mathbf{q}_e = \mathbf{q}_b \cdot \mathbf{q}_a^{-1}. \quad (5.17)$$

Eine Umrechnung von Quaternionen in die drei Eulerwinkel ϕ, θ und ψ erfolgt gemäß der nachfolgenden Formel (Blanco, 2010, S. 14):

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{2 \cdot (q_0 \cdot q_1 + q_2 \cdot q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) \\ \arcsin\left(2 \cdot (-q_0 \cdot q_2 + q_1 \cdot q_3)\right) \\ \arctan\left(\frac{2 \cdot (q_0 \cdot q_3 + q_1 \cdot q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}\right) \end{bmatrix}. \quad (5.18)$$

Die Umrechnung von Eulerwinkeln in eine Quaternion folgt der Darstellung von Henderson (1977)

und geschieht in der Folge der Euler-Winkeldrehungen „ZYX“:

$$\begin{aligned}
 q_0 &= \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\
 q_1 &= \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\
 q_2 &= \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\
 q_3 &= \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right).
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

5.2.2 Adaptive Filterung der IMU-Messwerte

Yuan et al. (2015) beschreiben die Filterung der Sensorwerte einer MEMS IMU. Diese besteht aus einem dreiachsigen Beschleunigungsmesser, einem Gyroskop mit drei separaten Achsen und einem dreiachsigen Magnetometer. Bei der beschriebenen Anwendung geht es um die Orientierungsbestimmung (engl.: „heading estimation“) von Fußgängern. Solin et al. (2018) bestätigen dem Ansatz eine grundsätzlich gute Funktion, auch wenn natürlich berücksichtigt werden muss, dass er aufgrund der kurzzeitigen Stabilität regelmäßig gestützt werden muss.

Die Messungen des Magnetometers werden beeinflusst durch Stahl, Stahlbeton oder Magnetfelder, z. B. erzeugt durch elektrische Umformer. Aufgrund dieses Einflusses verzichten Kok et al. (2017, S. 68) in ihrem Modell auf die Verarbeitung von Magnetometerdaten in geschlossenen Räumen. Gleichwohl weisen sie daraufhin, dass mindestens geringe Bewegungen vorausgesetzt werden, um eine Orientierung auf Grundlage von Beschleunigungs- und Gyroskopdaten bestimmen zu können.

Vorteilhaft sind die zeitlich relativ stabilen Messungen mit dem Magnetometer. Auch das Gyroskop wird für die Lagebestimmung verwendet, jedoch mit dem Nachteil, dass seine Messwerte langfristig nicht so stabil sind wie die des Magnetometers. Der von Yuan et al. (2015) verwendete Ansatz hat das Ziel die Vorteile beider Messsysteme zu kombinieren. In ihren Untersuchungen haben sie mit der von ihnen verwendeten IMU einen Fehler für die Orientierung (Gierwinkel) von ca. 8 Grad nach etwa 50 Sekunden ermittelt. Für die Verwendung der IMU auf dem PVS und der geforderten Genauigkeit, wird hierdurch nochmal deutlich, dass die IMU nur zur ergänzenden und sehr kurzzeitigen Stützung geeignet ist.

Yuan et al. (2015) gehen für ihren Vorschlag der Orientierungsbestimmung mit einer IMU wie folgt vor. Sie beschreiben, wie in der Phase der Prädiktion des Kalman Filters die Berechnung der Pose mit Daten des Gyroskops erfolgt. Das Ergebnis der Orientierung wird in Quaternionen angegeben. Für die Phase der Korrektur (Update) im Kalman Filter, wird die Pose mit den Messwerten von Beschleunigungssensor (Nick- und Rollwinkel) und Magnetometer (Gierwinkel) in Form von Eulerwinkeln bestimmt.

Zanetti et al. (2009) beschreiben, dass Kalman Filter optimale Ergebnisse für unabhängige (engl.: „unconstrained“) Lösungen des linearen stochastischen Schätzproblems liefern. Unabhängigkeit bedeutet, dass keine Abhängigkeit der optimalen Zustandsschätzung während des Update Schritts besteht. In der Realität ist diese Annahme häufig, so wie in diesem Fall, nicht gegeben. Zanetti et al. (2009) ermöglichen durch eine Modifikation des Filters, Abhängigkeiten der Parameter des Zustandsvektors während des Update Schritts. Die Schätzung der Pose in einem Filter, bei der die normierten Parameter der Quaternion voneinander abhängig sind (engl.: „norm-constrained“), ist eine ideale Anwendung für diesen Ansatz (Formel 5.14). Denn die Darstellung der Pose erfolgt nicht im Vektorraum und Redundanzen sind notwendig, um Singularitäten und Unstetigkeiten zu vermeiden (Zanetti et al., 2009). Formel 5.20 beschreibt die optimal abhängige Schätzung (engl.: „optimal constrained estimate“) des Zustands:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \frac{\sqrt{l}}{\|\hat{\mathbf{x}}_k^-\|} \cdot \hat{\mathbf{x}}_k^- \tag{5.20}$$

Hierbei ist im Fall der Schätzung von Quaternionen der Parameter $l = 1$ und $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ der aposteriori Zustandsschätzer. Formel 5.21 zeigt die Korrektur der zugehörigen Kovarianz:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^+ = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^- + \frac{1}{\tilde{\epsilon}_k} \cdot \frac{\hat{\mathbf{x}}_k^- \cdot (\hat{\mathbf{x}}_k^-)^T}{\|\hat{\mathbf{x}}_k^-\|} \cdot \left(\|\hat{\mathbf{x}}_k^-\| - \sqrt{l^2} \right). \quad (5.21)$$

Dabei ist $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}^-$ die aposteriori Kovarianzmatrix. $\tilde{\epsilon}_k$ sind die Residuen zwischen der tatsächlichen und der geschätzten Messung. $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ ist der aposteriori Zustandsvektor und $l = 1$, wie schon zuvor in Formel 5.20. Zur Vertiefung und auf die Herleitung der beiden Formeln 5.20 und 5.21 wird auf Zanetti et al. (2009) verwiesen.

Die Designparameter eines Kalmanfilters sind, wie bereits im Abschnitt 3.1.3 beschrieben, das System- und Messrauschen. Ihre exakte Bestimmung ist für eine gute Zustandsschätzung und zur Minimierung der Fehlerkovarianz von Bedeutung. Häufig ist es nicht ausreichend diese beiden Matrizen einmalig zu bestimmen, da sie sich im Verlauf verändern können (Marchthaler und Dingler, 2017, S. 93).

Yuan et al. (2015) modellieren das Systemrauschen aus den Drehraten und deren Varianzen. In die Berechnung des Messrauschens fließen die Ergebnisse sowohl der Beschleunigungs- als auch der Magnetometermessungen ein. Für die Roll- und Nick-Anteile werden die Beschleunigungsmessungen und deren Varianzen verwendet. Für den Gierwinkel werden die Magnetometermessungen sowie deren Varianzen eingesetzt.

Gradientenverfahren Kraft (2003) weist auf die Besonderheiten im Umgang mit Quaternionen im UKF hin. Die Komponenten des Zustandsvektors werden in einem UKF, genauer gesagt in der Unscented Transformation (UT), wie Elemente eines Vektorraums behandelt. Aus allen $2n$ gewichteten Teilen wird anschließend das arithmetische Mittel gebildet (Formel 3.36). Diese Vorgehensweise ist für vektorielle Anteile richtig, jedoch nicht für die Komponenten von Quaternionen, denn diese sind voneinander abhängig (5.2.1). Als Lösung schlägt Kraft (2003) die Anwendung des Gradientenverfahrens (engl. „gradient descent“) vor, das auch in Pennec (1998) beschrieben wird. In einem iterativen Prozess, der mit einem Näherungswert startet, ändert sich der Wert in Richtung des steilsten Abstiegs, bis es keine Verbesserung mehr gibt. In Menegaz und Ishihara (2018) werden verschiedene Ansätze mit dem Gradientenverfahren verglichen. Die von Menegaz und Ishihara (2018) entwickelte Lösung liegt im Vergleich vorne, dauert jedoch lange und die mittlere quadratische Abweichung liegt nur um 15% vor der des Gradientenverfahrens. Sipos (2008), dessen Lösung in dem Vergleich von Menegaz und Ishihara (2018) ebenfalls berücksichtigt wird, attestiert dem Gradientenverfahren ein sehr gutes Konvergenzverhalten, das sich schon nach zwei bis vier Iterationen einstellt. Pennec (1998) hat die Iterationen unterhalb eines Grenzwerts oder wenn die Anzahl der Iterationen zu groß sind, abbrechen lassen.

Die Lösung zur Verwendung von Quaternionen in einem UKF Algorithmus ist nach Kraft (2003) eine neue Metrik, die den Abstand zwischen zwei Elementen beschreibt. Die Differenz zweier Quaternionen wird gemäß Formel 5.17 berechnet. Nach Formel 5.16, ist in dem skalaren Teil ein Winkel θ enthalten. Durch Umstellung der Gleichung erhält man $\theta = 2 \cdot \arccos(q_0)$. Mit θ können im Anschluss die drei vektoriellen Anteile ($\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$) des Differenzquaternions e berechnet werden.

In einem Iterationsprozess, der mit einem Näherungswert für das Mittel der Orientierung $\bar{\mathbf{q}}$ beginnt, werden die Differenzquaternionen aus dem Näherungswert und den Sigma-Punkten \mathbf{Y} (Formel 3.22) bestimmt. Aus den anschließend bestimmten Winkeln (θ) und vektoriellen Anteilen ($\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$) wird das arithmetische Mittel gebildet. Das Ergebnis ist die neue mittlere Orientierung, die zurück in eine Quaternion konvertiert wird (Formel 5.19). Diese Quaternion wird mit dem Näherungswert multipliziert und ergibt einen verbesserten Näherungswert für das Mittel der Orientierung $\bar{\mathbf{q}}$. Die Iteration beginnt erneut, bis ein definierter Schwellwert unterschritten wird oder mehr als vier Iterationen durchlaufen wurden.

5.2.3 Funktionales Modell

Häufig und so auch bei dieser Anwendung, ist der wahre Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den gesuchten Zustandsgrößen nicht bekannt. Beziehungen werden anhand vermuteter physikalischer Gesetzmäßigkeiten in einem geeigneten funktionalen Modell beschrieben. Dass die Beobachtungen stochastische Größen, also mit Messabweichungen behaftet sind, wird idealerweise berücksichtigt. Die möglichst nahe Abbildung der Realität auf Grundlage von Beobachtungen unter funktionalen und stochastischen Annahmen, stellt übergeordnet das mathematische Modell dar (Casparly und Wichmann, 2007, S. 90; Höpcke, 1980, S. 137).

5.2.3.1 Systemmodell

Systemzustände Die Zustände des Messwagensystems zu einer Epoche k werden über die nachfolgenden Zustandsgrößen beschrieben.

Die Position im Raum wird angegeben durch:

$$\underset{(3,1)}{\mathbf{X}_k} = [x_k, y_k, z_k]^T. \quad (5.22)$$

Die Geschwindigkeit wird über die folgenden Parameter beschrieben:

$$\underset{(3,1)}{\mathbf{v}_k} = [v_{xk}, v_{yk}, v_{zk}]^T. \quad (5.23)$$

Nachfolgende Größen geben die Informationen über die Beschleunigungen des Systems an:

$$\underset{(3,1)}{\mathbf{a}_k} = [a_{xk}, a_{yk}, a_{zk}]^T. \quad (5.24)$$

Eine Quaternion legt die Orientierung des Fahrzeugs fest. Quaternionen und relevante Rechenregeln werden in Abschnitt 5.2.1 aufgeführt. Durch die folgenden vier Parameter wird die Quaternion beschrieben:

$$\underset{(4,1)}{\mathbf{q}_k} = [q_{0k}, q_{1k}, q_{2k}, q_{3k}]^T. \quad (5.25)$$

Die Winkelgeschwindigkeit wird dargestellt durch:

$$\underset{(3,1)}{\boldsymbol{\omega}_k} = [\omega_{xk}, \omega_{yk}, \omega_{zk}]^T. \quad (5.26)$$

Zustandsvektor Aus den dargestellten einzelnen Systemzuständen setzt sich der Zustandsvektor mit seinen 16 Zustandsgrößen zusammen:

$$\underset{(16,1)}{\mathbf{x}_k} = [\mathbf{X}_k, \mathbf{v}_k, \mathbf{a}_k, \boldsymbol{\omega}_k, \mathbf{q}_k]^T. \quad (5.27)$$

Steuerungsvektor Wirken auf ein physikalisches System Steuerungsgrößen \mathbf{u}_k , so hat dies Einfluss auf die Ausgangsgröße \mathbf{x}_k . Für das Messwagensystem des PVS gibt es keinen das System beeinflussenden Steuerungsvektor \mathbf{u}_k . Der Steuerungsvektor wird in der Literatur alternativ auch „Eingangsvektor“ genannt.

Bewegungsgleichungen Die Bestimmung des dynamischen Systemzustands eines Objekts kann als eine grundlegende Aufgabe der Datenfusion angesehen werden. Der Übergang zwischen zwei Systemzuständen \mathbf{x}_{k-1} und \mathbf{x}_k wird durch ein Bewegungsmodell beschrieben. Mögliche Varianten für lineare und kurvenförmige Modelle werden nachfolgend aufgeführt. Komplexere Modelle lassen sich in einfachere überführen, indem Zustandsgrößen null gesetzt werden (Schubert et al., 2008).

- Einfache Modelle, wie zum Beispiel das konstante Geschwindigkeits- (Constant Velocity (CV)) oder konstante Beschleunigungsmodell (Constant Acceleration (CA)) sind für lineare Bewegungsänderungen geeignet. Bei auftretenden Rotationen, insbesondere beim Gierwinkel, sind sie im Nachteil.
- Hierfür besser geeignet ist das konstante Drehraten- und Geschwindigkeitsmodell (Constant Turn Rate and Velocity (CTRV)). Es ist das einfachste Modell, das auch Drehungen um die z-Achse berücksichtigt. Es wird als Modell zweiter Ordnung bezeichnet, bei dem die Geschwindigkeit als konstant angenommen wird und Geschwindigkeitsänderungen als Rauschen modelliert werden.
- Durch Festlegung der Beschleunigung als konstante Variable wird das konstante Drehraten- und Beschleunigungsmodell (Constant Turn Rate and Acceleration (CTRA)) definiert. Es wird als Modell dritter Ordnung bezeichnet, bei dem eine konstante Beschleunigung angenommen wird und Beschleunigungsänderungen als Rauschen modelliert werden.
- Um eine Korrelation von Geschwindigkeit und Drehrate zu vermeiden, können das konstante Lenkwinkel- und Geschwindigkeitsmodell (Constant Steering Angle Velocity (CSAV)) oder das konstante Lenkwinkel und Beschleunigungsmodell (Constant Steering Angle and Acceleration (CSAA)) angewendet werden.
- Bei wiederum Festlegung der Beschleunigung als konstante Variable kommt das konstante Kurven- und Beschleunigungsmodell (Constant Curvature and Acceleration (CCA)) zum Tragen.

CSAV und CSAA Modell modellieren kreisförmige, wohingegen CTRV und CTRA Modell klothoidenförmige Trajektorien modellieren.

Schubert et al. (2008) vergleichen die Performance dieser Modelle. Sie stellen dafür GPS- und Odometriedaten, die sie mit einem Fahrzeug gesammelt haben, einer Solltrajektorie gegenüber. Die geringsten Abweichungen erreicht das CTRA Modell. Aufgrund dessen kommt das Modell in dieser Arbeit zur Anwendung. Gleichwohl soll nicht unerwähnt bleiben, dass alle Modelle nur Näherungen darstellen (Marchthaler und Dingler, 2017, S. 104).

Formel 5.28 zeigt die nichtlinearen Zustandsgleichungen des PVS Systems. Hierin ist Δt_k die Zeitdifferenz der Epoche k sowie der darauf folgenden Epoche $k + 1$:

$$\begin{aligned}
 \underset{(16,1)}{f_{k+1,k}(\mathbf{x}_k)} = & \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ v_{x,k} \\ v_{y,k} \\ v_{z,k} \\ a_{x,k} \\ a_{y,k} \\ a_{z,k} \\ \omega_{x,k} \\ \omega_{y,k} \\ \omega_{z,k} \\ \mathbf{q}_k \\ 4,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} + v_{x,k-1} \cdot \Delta t_k + \frac{1}{2} \cdot a_{x,k-1} \cdot \Delta t_k^2 \\ y_{k-1} + v_{y,k-1} \cdot \Delta t_k + \frac{1}{2} \cdot a_{y,k-1} \cdot \Delta t_k^2 \\ z_{k-1} + v_{z,k-1} \cdot \Delta t_k + \frac{1}{2} \cdot a_{z,k-1} \cdot \Delta t_k^2 \\ v_{x,k-1} + a_{x,k-1} \cdot \Delta t_k \\ v_{y,k-1} + a_{y,k-1} \cdot \Delta t_k \\ v_{z,k-1} + a_{z,k-1} \cdot \Delta t_k \\ a_{x,k-1} \\ a_{y,k-1} \\ a_{z,k-1} \\ \omega_{x,k-1} \\ \omega_{y,k-1} \\ \omega_{z,k-1} \\ \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \mathbf{I}_{4,4} + \frac{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\frac{\theta}{2}} \cdot \mathbf{A} \cdot \Delta t_k \right) \cdot \mathbf{q}_{k-1} \end{bmatrix} \quad (5.28)
 \end{aligned}$$

$$\text{mit } \mathbf{A} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{x,k} & -\omega_{y,k} & -\omega_{z,k} \\ \omega_{x,k} & 0 & \omega_{z,k} & -\omega_{y,k} \\ \omega_{y,k} & -\omega_{z,k} & 0 & \omega_{x,k} \\ \omega_z & \omega_{y,k} & -\omega_{x,k} & 0 \end{bmatrix} \text{ und } \theta = \sqrt{(\omega_{x,k} \cdot \Delta t_k)^2 + (\omega_{y,k} \cdot \Delta t_k)^2 + (\omega_{z,k} \cdot \Delta t_k)^2}.$$

5.2.3.2 Beobachtungsmodell

Beobachtungsvektor Der Beobachtungsvektor \mathbf{y}_k besteht aus den folgenden Elementen:

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} x_k, y_k, z_k, a_{x,k}, a_{y,k}, a_{z,k}, \omega_{x,k}, \omega_{y,k}, \omega_{z,k}, h_{x,k}, h_{y,k}, h_{z,k}, inc_{x,k}, inc_{y,k}, odo_{x1,k}, odo_{x2,k} \end{bmatrix}^T. \quad (5.29)$$

Die Parameter \mathbf{X}_k sind die durch den Lasertracker oder den Tachymeter bestimmten Positionen. Die IMU liefert die Beschleunigungen (\mathbf{a}_k), Drehraten ($\boldsymbol{\omega}_k$) und Magnetometerdaten (\mathbf{h}_k). Die Signale des Inklinometers in x- und y-Richtung sind in den Parametern $inc_{x,k}$, bzw. $inc_{y,k}$ abgebildet. Zusätzliche Informationen über den zurückgelegten Weg $odo_{x1,k}$ und $odo_{x2,k}$ entstammen den beiden Odometern.

Messfunktion Die Messfunktion $H_i(\cdot)$, mit $i = 1, 2, 3$, als Teil der Messgleichung (Abschnitt 3.1.5, Formel 3.29) beschreibt den Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen \mathbf{x}_k und Beobachtungen \mathbf{y}_k . Besteht die Möglichkeit der direkten Messung einer Zustandsgröße, ist $H_i(\cdot)$ eine unveränderte Abbildung (Maurer et al., 2015, S. 428).

Die sequentielle Verfügbarkeit der Daten macht eine dynamische Auswahl der Messfunktion erforderlich. Die Funktion für die Messungen mit Lasertracker- oder Tachymeterdaten sieht wie folgt aus:

$$H_1(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

Die Funktion für die Messungen der Lasertracker- oder Tachymeterdaten mit Orientierungswinkeln, zeigt Formel 5.31. Hierbei erfolgt zusätzlich für die letzten drei Elemente des Vektors die Umrechnung von Quaternionen in Eulerwinkel (vgl. Formel 5.18):

$$H_2(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ \arctan \left(\frac{2 \cdot (q0_k \cdot q1_k + q2_k \cdot q3_k)}{(q0_k^2 + q1_k^2 - q2_k^2 + q3_k^2)} \right) \\ \arcsin \left(2 \cdot (-q0_k \cdot q2_k + q1_k \cdot q3_k) \right) \\ \arctan \left(\frac{2 \cdot (q0_k \cdot q3_k + q1_k \cdot q2_k)}{(q0_k^2 + q1_k^2 - q2_k^2 - q3_k^2)} \right) \end{bmatrix}. \quad (5.31)$$

Und schließlich erfolgt in der Messfunktion für die Inklinometerdaten alleine die Umrechnung von Quaternionen in Eulerwinkel (gemäß Formel 5.18):

$$H_3(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} \arctan \left(\frac{2 \cdot (q0_k \cdot q1_k + q2_k \cdot q3_k)}{(q0_k^2 + q1_k^2 - q2_k^2 + q3_k^2)} \right) \\ \arcsin \left(2 \cdot (-q0_k \cdot q2_k + q1_k \cdot q3_k) \right) \\ \arctan \left(\frac{2 \cdot (q0_k \cdot q3_k + q1_k \cdot q2_k)}{(q0_k^2 + q1_k^2 - q2_k^2 - q3_k^2)} \right) \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

$$\begin{aligned}\theta &= -\arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right), \\ \phi &= \arctan\left(\frac{a_y}{a_z}\right).\end{aligned}\quad (5.35)$$

In die Berechnung von ψ fließen die zuvor ermittelten Winkel θ und ϕ sowie die Magnetometermesswerte h_x , h_y und h_z ein:

$$\psi = \arctan\left(\frac{-h_y \cdot \cos(\phi) + h_z \cdot \sin(\phi)}{h_x \cdot \cos(\theta) + h_y \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) + h_z \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\theta)}\right) = \arctan\left(\frac{H_2}{H_1}\right) \quad (5.36)$$

Die Berechnung der Varianz-Kovarianzmatrix des Messrauschens wird durch den Messprozess bestimmt.

Die Varianz-Kovarianzmatrix von Nick- und Rollwinkel berechnen Yuan et al. (2015) aus der Beziehung der Beschleunigungen in Verbindung mit einer Taylorreihenentwicklung:

$$\mathbf{M}_{\phi\theta} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{a_z}{a_y^2 + a_z^2} & -\frac{a_y}{a_y^2 + a_z^2} \\ -\frac{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} & \frac{a_x a_y}{(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2) \sqrt{a_y^2 + a_z^2}} & \frac{a_x a_z}{(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2) \sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

sowie $\sigma_{a_x}^2$, $\sigma_{a_y}^2$ und $\sigma_{a_z}^2$, den Varianzen der Beschleunigungen a_x , a_y und a_z :

$$\Sigma_{aa,\phi\theta} = \text{diag}\left(\sigma_{a_x}^2, \sigma_{a_y}^2, \sigma_{a_z}^2\right). \quad (5.38)$$

Die Varianz-Kovarianzmatrix von Nick- und Rollwinkel ergibt sich schließlich aus:

$$\Sigma_{ll,\phi\theta} = \mathbf{M}_{\phi\theta} \cdot \Sigma_{aa,\phi\theta} \cdot \mathbf{M}_{\phi\theta}^T. \quad (5.39)$$

Ähnlich wird die Abweichung des auf dem Magnetometer basierenden Gierwinkels berechnet:

$$\mathbf{M}_{\psi} = \begin{bmatrix} -\frac{H_2}{H_1^2 + H_2^2} & \frac{H_1}{H_1^2 + H_2^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \sin(\phi) & \cos(\phi) \sin(\theta) \\ 0 & +\cos(\phi) & -\sin(\phi) \end{bmatrix}. \quad (5.40)$$

Die Kovarianzmatrix des Gierwinkels ergibt sich aus der folgenden Formel:

$$\Sigma_{MM,\psi} = \mathbf{M}_{\psi} \cdot \Sigma_{ll,\psi} \cdot \mathbf{M}_{\psi}^T, \quad (5.41)$$

mit $\Sigma_{ll,\psi} = \text{diag}\left(\sigma_{h_x}^2, \sigma_{h_y}^2, \sigma_{h_z}^2\right)$. Hierin sind $\sigma_{h_x}^2$, $\sigma_{h_y}^2$ und $\sigma_{h_z}^2$ die Varianzen der Magnetometermesswerte. Mit den Ergebnissen der Formeln 5.39 und 5.41 kann die Kovarianzmatrix des Messrauschens aufgestellt werden:

$$\Sigma_{ll,\theta\phi\psi} = \text{diag}\left(\Sigma_{ll,\theta\phi}^2, \Sigma_{ll,\psi}^2\right). \quad (5.42)$$

Zur Vertiefung wird auf Yuan et al. (2015) verwiesen. Die Dimension und der Inhalt der Varianz-Kovarianzmatrix Σ_{ll} des Messrauschens hängt von der Verfügbarkeit der Sensordaten ab:

- Position aus Lasertracker-/Tachymeterdaten: $\Sigma_{3,3}^{\text{ll}}$
- Position sowie Orientierung aus Lasertracker-/Tachymeterdaten: $\Sigma_{5,5}^{\text{ll}}$
- Beschleunigungs-, Drehraten-, und Magnetometerdaten der IMU: $\Sigma_{9,9}^{\text{ll}}$
- Neigungsdaten in x und y Richtung von dem Inclinometer: $\Sigma_{2,2}^{\text{ll}}$
- Position in x -Richtung aus den Encoderdaten: $\Sigma_{1,1}^{\text{ll}}$

Hiermit ist das stochastische Modell aufgestellt.

5.2.5 Steigerung der Zuverlässigkeit der Filterung

Es gibt in der Literatur eine Reihe von Lösungsansätzen, die sich mit der Steigerung der Zuverlässigkeit von Filtern auseinandersetzen. Neben der in Abschnitt 5.2.2 verwendeten adaptiven Filterung von IMU-Messwerten, wird im Folgenden eine kleine Auswahl vorgestellt.

Nach Yang et al. (2019) werden für Auswertungen, die nicht in Echtzeit erfolgen, mehrere Methoden zur Steigerung der Zuverlässigkeit angewendet. Ziel ist es, den Einfluss von Ausreißern bei Beobachtungen auf die geschätzten Zustandsparameter zu reduzieren. Dies sind statistische Hypothesentests (z. B. nach Baarda) oder robuste Schätzfunktion, die den Einfluss von Ausreißern auf die geschätzten Parameter reduzieren. In der Literatur sind mehrere robuste Schätzer, wie z. B. M-Schätzer oder die L1-Norm zu finden.

In der Regel werden zwei Arten von Ausreißern angenommen: dynamische Störungen des Modells und Messausreißer. Üblicherweise treten diese Ausreißer aufgrund von Störungen in dynamischen Umgebungen, unzureichendem Vorwissen, Fehlern in der Hardware etc. auf. Für die Behebung dieser beiden Arten von Ausreißern sind adaptive und robuste Filter geeignet (Yang et al., 2019).

Wang et al. (2014) schlagen einen UKF-Algorithmus vor, der sowohl adaptiv als auch robust ist (ARUKF). Er nutzt die robuste Funktion von Huber, um die Gewichtung der Messung, basierend auf dem Innovationsvektor, anzupassen. Die Systemrauschmatrix wird währenddessen mit einem Fading-Faktor angepasst, der auf der Differenz zwischen der Innovation und dem robust geschätzten Zustand der aktuellen Epoche basiert.

Test der Innovation mit dem Chi-Quadrat-Test (χ^2 -Test) Die Verwendung des χ^2 -Tests zur Untersuchung der Innovation auf Signifikanz hat das Ziel herauszufinden, in welcher Größenordnung die neuen Beobachtungen von der Prädikation des Filters abweichen. Eine signifikante Abweichung zwischen der Beobachtung und der Prädikation kann verschiedene Ursachen haben. In dieser Arbeit wird aber angenommen, dass die einzige Ursache für diese Abweichung durch eine fehlerhafte Messung, also einen Ausreißer in den Beobachtungen, verursacht wird.

Formulierung der Testhypothesen Die Nullhypothese besagt, dass der Erwartungswert E der Beobachtungen und der Prädikation des Filters gleich sind. Zur Formulierung dieser Hypothese wird als Abweichung die mit Formel 3.37 berechnete Innovation verwendet. Die Innovation ist die Differenz der tatsächlichen Messwerte \mathbf{y}_k und der prädizierten Messwerte \mathbf{y}_k^- . Die hieraus folgende Nullhypothese lautet $H_0 : E(\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_k^-) = \mathbf{0}$. Die Alternativhypothese $H_A : E(\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_k^-) \neq \mathbf{0}$ besagt das Gegenteil von der Nullhypothese, nämlich dass die Innovation zu groß ist und sich deswegen Prädiktion und Beobachtungen signifikant voneinander unterscheiden.

Berechnung der Testgröße Zur Berechnung der Testgröße für den χ^2 -Test wird neben der Innovation zusätzlich ihre Kofaktormatrix benötigt. Chambers et al. (2014) berechnen die Kofaktormatrix der Innovation \mathbf{S}_k (Formel 3.38) aus der Summe des während des Update Prozesses prädizierten Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x},k}^-$ und der Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{\text{ll},k}$ des Messrauschens. Die Kofaktormatrix wird

entweder adaptiv ermittelt oder ist aus einer Kalibrierung bekannt:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x},k}^- + \mathbf{Q}_{ll,k}. \quad (5.43)$$

In die Testgröße T_k des χ^2 -Tests fließen die Kofaktormatrix der Innovation \mathbf{S}_k (Formel 5.43) sowie die Innovation (Formel 3.37) ein. Formel 5.44 stellt den Zusammenhang zur Berechnung von T_k dar:

$$T_k = \left((\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_k^-)^T \cdot \mathbf{S}_k^{-1} \cdot (\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_k^-) \right) / \sigma_0^2. \quad (5.44)$$

Die ermittelte Testgröße T_k ist mit n Freiheitsgraden χ^2 verteilt, wenn das System- und Messrauschen normalverteilt sind. Entsprechend Formel 3.8 ist $\sigma_0^2 = 1$ im Rahmen dieser Arbeit gewählt worden. n ist die Anzahl der Beobachtungen. Ist die Testgröße kleiner als das Quantil der theoretischen Verteilung, kann die Nullhypothese H_0 angenommen werden.

Berechnung des Quantilwertes Damit anhand der in Gl. 5.44 berechneten Testgröße eine Testentscheidung getroffen werden kann, muss ein Quantilwert aus der χ^2 -Verteilung berechnet werden. Als Freiheitsgrad wird die Anzahl n an Beobachtungen und als Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ verwendet.

Testentscheidung Die berechnete Testgröße wird mit dem Wert der χ^2 -Verteilung verglichen. Wenn die Testgröße größer ist als der Quantilwert, wird die Nullhypothese abgelehnt und es wird angenommen, dass es sich um einen Ausreißer handelt.

Nach Chambers et al. (2014) funktioniert der Test bei plötzlichen Ausreißern gut. Ein driftender Bias oder zögerlich ausfallende Sensoren werden hingegen nicht erkannt. Sollte das Ergebnis den Betrag des gewählten Konfidenzintervalls überschreiten, schlagen Zheng et al. (2018) eine Optimierung der Kovarianzen des System- und Messrauschens vor. Werden aufeinanderfolgende Ausreißer detektiert, könnte es sich um einen Sensorausfall handeln.

6 Testmessung und Validierung des kinematischen Multisensorsystems

Die in den bisherigen Kapiteln beschriebene Theorie des PVS soll nun in der Praxis getestet und validiert werden. Es soll überprüft werden, ob das Zusammenspiel aller Systemkomponenten funktioniert, ob der Messwagen auf der Schiene fährt, ob die Daten gesammelt werden und sie sich auswerten lassen. Zur Qualitätsbeurteilung werden die Ergebnisse unabhängigen Referenzdaten gegenübergestellt.

Die praktischen Arbeiten wurden im Rahmen zweier Messkampagnen auf zwei Schienenanlagen durchgeführt: Auf drei Schienenstücken in einem Labor des Geodätischen Instituts der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Abschnitt 6.3) sowie in einer Industriehalle auf einem längeren Gleis unter realen Bedingungen (Abschnitt 6.4).

Die Vorteile des Labors liegen auf der Hand: geringer Zeitdruck, kurze Wege und gegebenenfalls die Möglichkeit der Wiederholbarkeit. Einerseits stand nur eine kurze Fahrstrecke zur Verfügung, andererseits konnten im Labor einige Besonderheiten berücksichtigt werden, die die Tests realer machen sollten: Die Schienenstücke wurden so gelegt, dass zwei Schienenstöße mit jeweils einer Lücke von ca. 10 mm entstanden. Es wurde akzeptiert, dass dadurch das Risiko steigt, dass Bewegungen des fahrenden Wagens ggf. nicht ausreichend genug registriert werden. Es wurden Objekte, die Schienenbefestigungen ähneln, verlegt. Es kamen echte Schienenprofile mit einem balligen Kopf zum Einsatz. Auf einem kurzen Schienenstrang lassen sich noch nicht alle Anforderungen validieren. So machen sich die Einflüsse von Achsfehlern beim Lasertracker z. B. erst ab höheren Distanzen signifikant bemerkbar. Auch die Toleranzgrößen der geläufigen Richtlinien lassen sich erst vollständig mit zwei Schienensträngen angeben.

Die Messung in der Industriehalle ermöglicht hingegen Messbedingungen, die deutlich dichter an der Realität liegen. Aufgrund der gewerblichen Nutzung musste ein Zeitfenster gefunden werden, in dem nicht gearbeitet wurde. In diesem Fall musste es auch ausreichend lang sein, damit die Schienen mehrfach befahren und die Referenzmessungen für die Validierung durchgeführt werden konnten. Es stand auch fest, dass nach Ablauf des Zeitfensters die Fertigung wieder in Betrieb gehen muss. Visuren bis 60 m entsprechen den Entfernungen, bis zu denen in Abschnitt 4.4 vorab die erreichbaren Unsicherheiten abgeschätzt wurden. Aufgrund der zwei parallel verlegten Schienenstränge ist auch eine Auswertung gemäß bekannter Richtlinien, wie z. B. der VDI 3576, möglich.

Streng genommen ist für die Schienenanlage eine physikalische Höhe anzunehmen. Da jedoch der Unterschied zwischen einer physikalischen Höhe und einem lokalen kartesischen Koordinatensystem aufgrund der geringen Entfernungen nicht signifikant ist, wird im Folgenden der Übersicht halber, ein kartesisches Koordinatensystem verwendet. Auf den hier maximalen Entfernungen von 50 m beträgt der Einfluss bis zu 0,2 mm.

Dieses Kapitel beschreibt im Folgenden die Durchführung, Auswertung und Ergebnisse für zwei Messkampagnen.

6.1 Durchführung einer kinematischen Schienenmessung mit dem Profilvermessungssystem

Der Ablauf einer Messung mit dem kinematischen PVS kann wie folgt ablaufen. In der Örtlichkeit sind Positionen für Referenzpunkte auszuwählen und zu vermarken. Die Kalibrierung erfolgt gemäß dem Unterabschnitt 4.6.1. Instrument und Wagen müssen vor Messungsbeginn ausreichend warm gelaufen

sein. Scanner und Kameras werden auf dem Wagen nach Bedarf ausgerichtet. Das Inklinometer wird kalibriert, indem Messungen in zwei Lagen durchgeführt werden. Die Kalibrierung der Scanner erfolgt mit Hilfe des Kalibrierkörpers, die Kalibrierung der Kameras mit Hilfe der Kalibriertafel. Lasertracker und Wagen werden synchronisiert. Es ist sicherzustellen, dass die Schienen von grobem Schmutz gereinigt sind und der Betrieb ruht, sodass keine Erschütterungen die Messung beeinflussen.

Nach der Stationierung des Lasertrackers über mehrere Anschlüsse in zwei Lagen erfolgt die Messung. Hierfür wird der CCR auf dem Messwagen während der Hinfahrt in der 1. Lage und während der Rückfahrt in der zweiten Lage angemessen. Nach der Messung erfolgt zur Kontrolle nochmals eine Messung der Scanner auf den Kalibrierkörper sowie eine erneute Stationierung über die Anschlüsse. Wurden keine geometrischen Veränderungen der Scanner oder des Instruments festgestellt, kann die Vermessung der zweiten oder weiterer Schienen erfolgen. Vor der nächsten Messfahrt, die wieder in zwei Lagen erfolgt, wird wieder eine Kalibrierung der Scanner und Kameras sowie die Stationierung des Vermessungsinstruments in zwei Lagen durchgeführt.

Nach Abschluss der Messungen kann mit der Auswertung der Messdaten sowie Bewertung und Dokumentation der Ergebnisse begonnen werden. Die beschriebene Vorgehensweise ist auf spätere Messungen in der Praxis übertragbar. Alle Schritte sind nochmals in Anlage A.3 aufgeführt, wobei die Schritte dort für die Validierung des Systems dreimal durchgeführt werden. In der Praxis würde dies nur einmal erfolgen.

6.2 Qualitätssicherung des Messprozesses

Um die hohen Unsicherheitsanforderungen, die an die Messergebnisse gestellt werden, erfüllen zu können, ist es essentiell, Abläufe, Kontrollen und Tests während des gesamten Prozesses durchzuführen. Viele Punkte wurden bereits in dem vorigen Abschnitt aufgeführt. An dieser Stelle sollen konkret die Punkte zur Sicherung der Qualität aufgeführt werden. Sie tragen zum Gelingen der Vermessung bei, ermöglichen aber auch eine Einschätzung während der einzelnen Prozesse und ggf. die Wiederholung eines Schrittes.

- Zunächst müssen die Vermessungsinstrumente, Tachymeter oder Lasertracker, gemäß Herstellerangabe vor der Messung kalibriert werden. Eine Anpassung an die Umgebungstemperatur und ausreichendes Warmlaufen sind obligatorisch.
- Die Schiene und ggf. umliegende Bereiche, die auch gemessen werden sollen, müssen ausreichend gereinigt sein.
- Das Vermessungszubehör muss in einwandfreiem Zustand sein. Aufnahmen für CCR, sowie die CCR selber müssen gereinigt sein.
- Während der Präzisionsmessung darf es keine betrieblich bedingten signifikanten Erschütterungen geben.
- Die Messungen müssen in zwei Lagen durchgeführt werden, insbesondere die für die Stationierungen. Jede hinzukommende Stationierung kann mit der vorigen verglichen werden. Eventuelle Bewegungen fallen dadurch sofort auf und Messungen können ohne zu großen Aufwand wiederholt werden.
- Die Kalibrierung der Sensoren auf dem Wagen ist für die spätere Auswertung essentiell. Vergleiche der Werte lassen darüber hinaus unmittelbar Rückschlüsse auf Bewegungen zu und ermöglichen, ggf. Messungen zu wiederholen.

Die Anlage A.3 führt die Schritte auf, nach denen während der beiden Messkampagnen für diese Arbeit vorgegangen wurde.

6.3 Messkampagne I: Messung unter Laborbedingungen

Zur Validierung wurde in einem Labor des Geodätischen Instituts der Leibniz Universität Hannover eine Messung mit dem PVS durchgeführt.

Auf einem ca. 1,5 m hohen Stahlbetonpodest wurden drei Eisenbahnschienen (Typ 60E2) mit einer Länge von je ca. 2,2 m mit einem Abstand von jeweils ca. 1 cm hintereinander gelegt, sodass sich eine Gesamtlänge von ca. 6,6 m ergibt. Zur Sicherung vor ungewollten horizontalen Verschiebungen wurden neben den Schienenfüßen auf dem Betonboden Fixierungen aufgeklebt.

Für das Tracken des Messwagens kam ein horizontierter Lasertracker Leica AT 960 zum Einsatz. Seine Position befand sich neben dem Podest, ca. 0,4 m außerhalb der Schienenflucht und ca. 1,2 m vor Kopf der ersten Schiene. An den Wänden der Halle sind Driftnester verteilt, die Koordinaten in einem lokalen Koordinatensystem haben. Hierüber konnte die Position des Lasertrackers während der Messung kontrolliert werden. Da sich die drei Schienensegmente auf dem Podest befinden, bewegte sich der Zenitwinkel des Lasertrackers während der Messfahrt im Bereich von etwa 100 gon (siehe Abbildung 6.1).

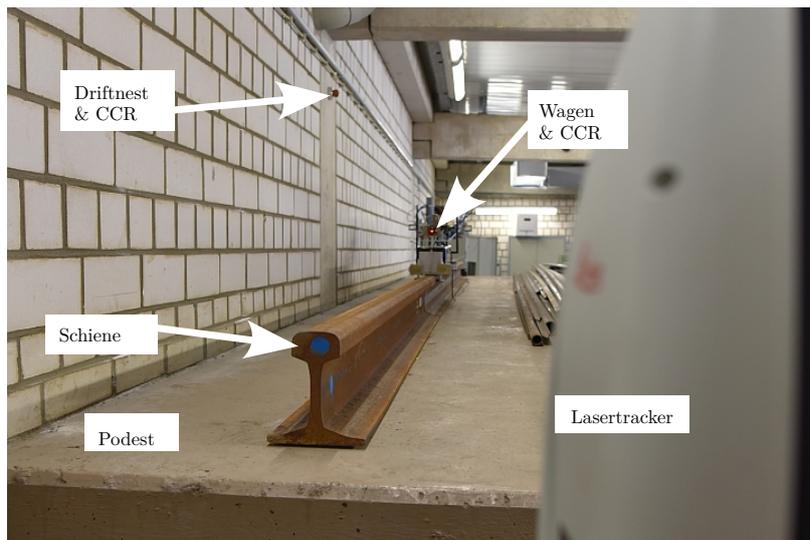


Abbildung 6.1: *Situation Labormessung.*

Der Lasertracker hat den Wagen mit einer Abtastrate von 1000 Hz verfolgt. Für die Messung wurde die Software Tracker Pilot der Firma Hexagon eingesetzt.

Zum Ausschließen von Einlaufeffekten liefen die Sensoren auf dem Messwagen über eine Stunde vor Messbeginn. Der Lasertracker wurde über zwei Stunden vor Messungsbeginn eingeschaltet und hatte so ausreichend Zeit zum Aufwärmen. Für die Ermittlung der Drift und des Offsets (vgl. Abschnitt 4.5.1), wurden vor und nach einer Hin- und Rückfahrt die Uhren des Lasertrackers und des Messwagens synchronisiert. Aus den ermittelten Zeiten konnten die Parameter Drift und Offset bestimmt werden. Mit dem Kalibrierkörper wurden die Kalibrierparameter der Scanner ermittelt (Tabelle 6.1). Die Messungen erfolgten gemäß dem in Anhang A.3 aufgeführten Ablaufschema.

Tabelle 6.1: *Kalibrierparameter der Scanner*

	Scanner links		Scanner rechts	
tx	687,67 mm	$\sigma=0,13$ mm	688,16 mm	$\sigma=0,17$ mm
ty	-109,12 mm	$\sigma=0,09$ mm	101,99 mm	$\sigma=0,12$ mm
tz	76,78 mm	$\sigma=0,02$ mm	79,21 mm	$\sigma=0,04$ mm
omega	3,415°	$\sigma=0,003$ °	2,796°	$\sigma=0,004$ °
phi	-0,012°	$\sigma=0,004$ °	-0,013°	$\sigma=0,005$ °
kappa	1,559°	$\sigma=0,005$ °	1,559°	$\sigma=0,005$ °

6.3.1 Auswertung

Die Fusionierung der Messdaten erfolgte gemäß des in dem Grundlagenkapitel 3.1.5 allgemein erläuterten UKF und der in Abschnitt 5.2 auf diesen Anwendungsfall beschriebenen Messdatenerfassung und Aufbereitung. Unter Berücksichtigung der individuellen Unsicherheit der einzelnen Sensoren (Tabelle 6.2) werden die Daten des Lasertrackers, der IMU und des Inklinometers von dem Filter verarbeitet.

Tabelle 6.2: Zusammenfassende Darstellung von System-, Messrauschen und Abtastrate der einzelnen Sensoren. Für das Systemrauschen werden die Parameter von Position und Winkel entfernungs- und systemabhängig bestimmt.

Messgröße	Achse/ Winkel	Σ_{ll} (Mess- rauschen)	Σ_{WW} (System- rauschen)	Abtast- rate (Hz)	Messwertsätze für eine Fahrt (exemplarisch)
Lasertracker					11861
Position	X, Y, Z	entfernungs- abhängig	kontinuierliches Beschleunigungs- modell	1000	
Winkel (gerechnet)	κ, ϕ		adaptiv		
IMU					1016
Beschleu- nigung	X	90 mm/s ²	20 mm/s ²	100	
	Y	90 mm/s ²	20 mm/s ²		
	Z	90 mm/s ²	60 mm/s ²		
Drehrate	X, Y, Z	0,5 Grad/s	0,05 Grad/s	100	
Magnetometer	X, Y, Z	0,2	-	100	
Inklinometer					116
Winkel	ϕ	0,05 Grad	adaptiv	10	
	ω	0,004 Grad	adaptiv	10	

Das Unsicherheitsmodell berücksichtigt die entfernungsabhängigen Strecken- und Richtungsmessungen des Lasertrackers. Neben der Darstellung der Zustandsparameter Positionen, Orientierungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Drehraten für die X-, Y- und Z-Achse sowie den zugehörigen Kovarianzen (vgl. Anlage A.4) sind die Ergebnisse des χ^2 Tests und der Innovationen (siehe Anlage A.5) Teil der Qualitätskontrolle.

Abbildung 6.2 zeigt die XY-Werte, des auf dem Wagen montierten und getrackten CCR. In den Farben rot (drei Hinfahrten) und blau (drei Rückfahrten) sind die ungefilterten Daten, in schwarz die mit dem UKF gefilterten zu sehen. Augenscheinlich liegen Hin- und Rückfahrten jeweils sehr dicht beieinander. Insbesondere bei getrennter Betrachtung von Hin- und Rückfahrten, liegen die Unterschiede in der Lage im Submillimeterbereich, was beide Detailansichten bestätigen. Die in der Detailansicht unten links zu sehenden Bewegungen quer zur Fahrtrichtung wurden durch die Überfahrt am 1. Schienenstoß verursacht. In der Detailansicht oben rechts ist gut zu erkennen, wie die Fahrten am Ende wieder zusammenlaufen.

Um die Messergebnisse qualitativ bewerten zu können, wurden Stationen im Abstand von 500 mm definiert. Die Stationen befinden sich auf einer Achse, die über den ersten und letzten Messpunkt

auf den Schienelementen definiert ist. In Abbildung 6.2 wurden die Stationen mit einem Offset versehen, sodass sie nicht die X- und Y-Komponente der Trajektorie überlagern.

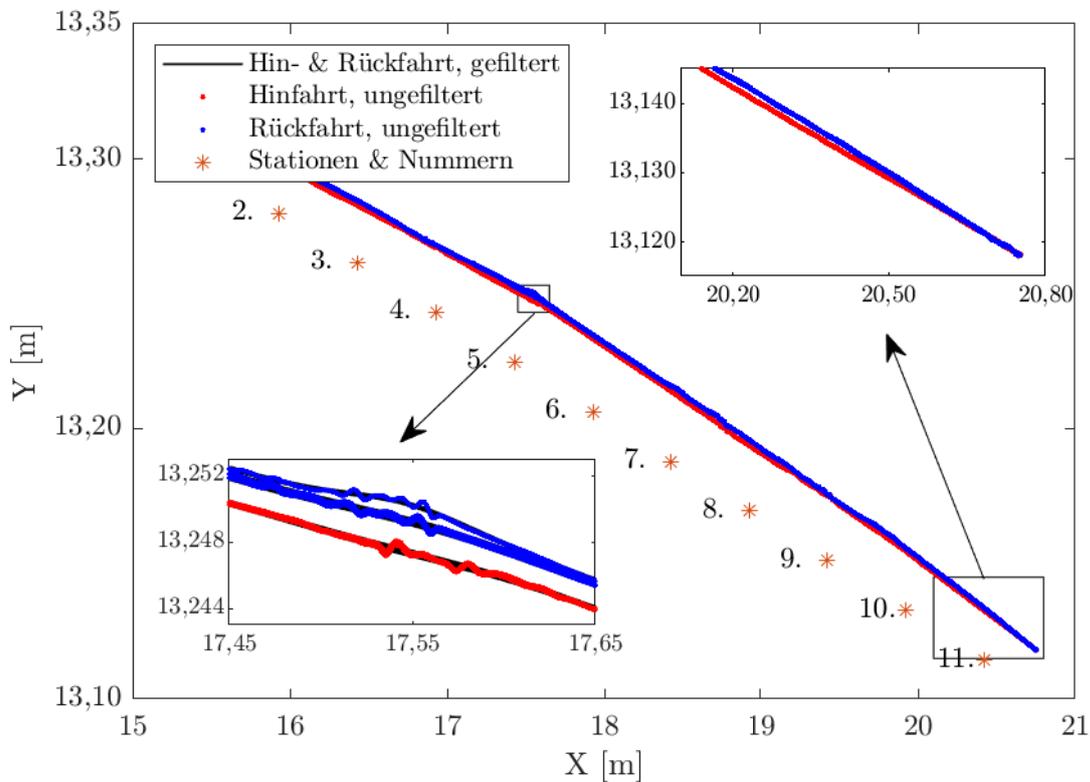


Abbildung 6.2: XY-Plot der gemessenen Einzelpunkte aus den Lasertrackermessungen, getrennt nach den drei Hin- (rote Farbe) und Rückfahrten (blaue Farbe). Die Ergebnisse nach dem UKF Filter und dem anschließenden Rauch-Tung-Striebel Smoother (RTSS) sind als schwarze Linien dargestellt. Die Stationen im Abstand von 500 mm sind zur Verbindungsachse des ersten und letzten Punktes aller Lasertrackermesspunkte versetzt, nummeriert und als * dargestellt, geplottet.

In Ergänzung zu Abbildung 6.2 stellt Tabelle 6.3 die geschätzte Standardabweichung σ der gefilterten 3D-Positionen im Stationsabstand von 500 mm für alle sechs Fahrten sowie getrennt nach Hin- und Rückfahrten dar.

Tabelle 6.3: σ der mit dem UKF und RTS Smoother gefilterten 3D-Positionsdaten im Stationsabstand von 500 mm

Station	3	4	5	6	7	8	9	\varnothing
	[mm]							
σ der jeweils drei Hin- und Rückfahrten	0,93	0,40	0,98	0,74	1,15	1,02	0,27	0,78
σ der drei Hinfahrten	0,08	0,18	0,05	0,12	0,11	0,10	0,13	0,11
σ der drei Rückfahrten	0,15	0,07	0,34	0,17	0,08	0,12	0,12	0,15

Die Unterschiede der Positionsdaten quer zum Schienenverlauf sind auch in den Neigungsdaten des obersten Diagramms von Abbildung 6.3 nachzuvollziehen. Es ist anzunehmen, dass der Wagen während der Fahrt konstruktionsbedingt ein richtungsabhängiges Moment erzeugt, das sich durch

ein minimales, reproduzierbares und somit systematisches Kippen widerspiegelt. Erwartbar und dennoch beeindruckend ist die in Abbildung 6.2 erkennbare Reproduzierbarkeit der Lage.

Abbildung 6.3 zeigt für alle sechs Fahrten in jeweils drei Diagrammen die Längs- und Querneigungen sowie die Geschwindigkeit des Wagens (max. 0,36 m/s).

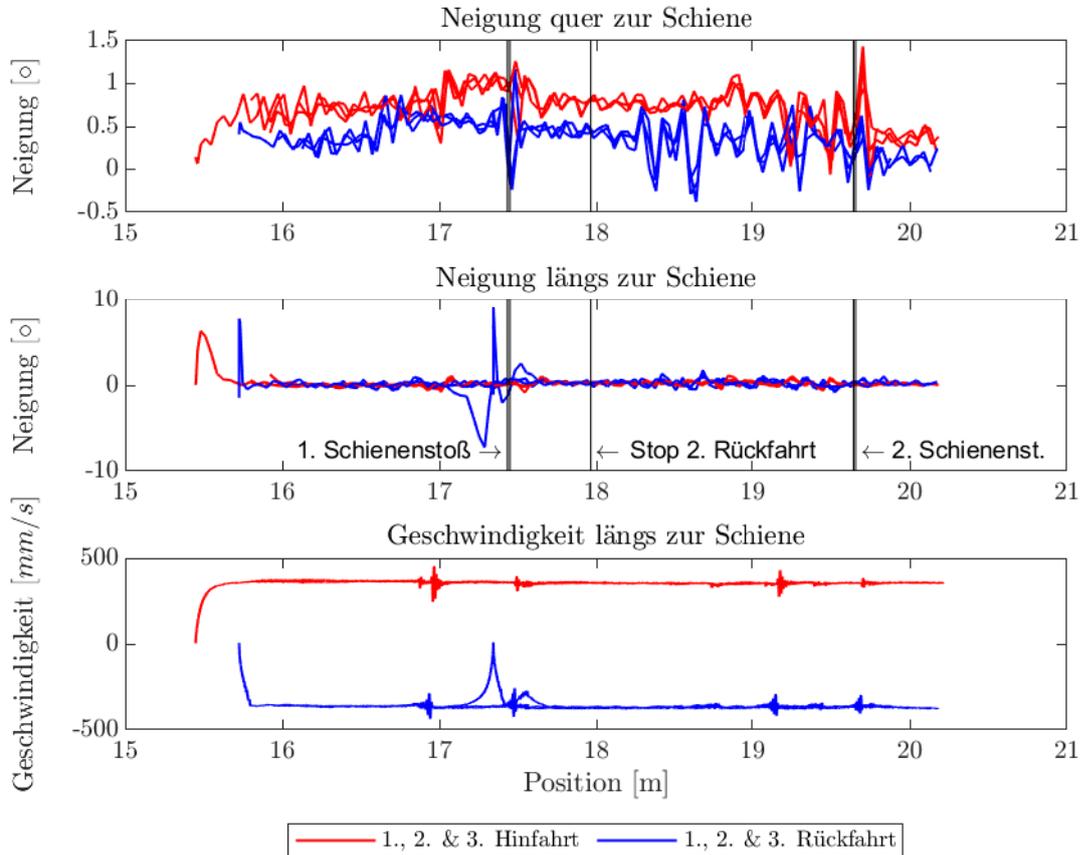


Abbildung 6.3: Neigung längs- und quer zur Schiene sowie Geschwindigkeit in X-Richtung. Die oberen beiden Darstellungen zeigen die ungefilterten Messdaten des Inklinometers. Längs zur Schiene sind die auf das flüssigkeitsgelagerte Inklinometer wirkenden Beschleunigungen beim Anfahren und Bremsen in den Neigungsdaten erkennbar. Die untere Darstellung zeigt Geschwindigkeiten, die aus ungefilterten Positionen und Zeit gerechnet wurden.

Bei einer Vorwärtsfahrt hat die Geschwindigkeit ein positives Vorzeichen, bei einer Rückwärtsfahrt ein negatives (siehe unteres Diagramm in Abbildung 6.3). Wie zuvor erwähnt, sind in dem oberen Diagramm die Querneigung und darunter die Längsneigung zur Schiene dargestellt.

Die in Tabelle 6.3 aufgeführten Standardabweichungen beruhen auf den reinen Positionsdaten. Diese können um die Neigung quer und längs zur Schiene korrigiert werden. Im Idealfall beträgt die Standardabweichung an jeder Station Null. Mehrere Faktoren, wie Unsicherheiten aus den Messungen des Lasertrackers, des Inklinometers, der IMU sowie der Hardware wie dem CCR und dem Messwagen und der Zustand des Profils, welches in diesem Fall sogar zwei unverschweißte Schienenstöße hat, haben Einfluss auf die Messunsicherheit. Es ist zu erwarten, dass die Ergebnisse mindestens gleich, eher besser als die aus Tabelle 6.3 sind.

Tabelle 6.4 stellt die um die Neigung des Messwagens korrigierten Positionen dar. Im Durchschnitt ist die Standardabweichung an den Stationen aller drei Hin- und Rückfahrten ($\sigma = 0,348$ mm) über 50 % besser als die aus den reinen Positionsdaten ($\sigma = 0,784$ mm).

In Abschnitt 4.4 wurde beschrieben, dass die Standardabweichung σ gemäß DIN 18710-1, 2010

10 % bis 20 % der zu bestimmenden Messgröße betragen soll. Konkret auf das PVS bezogen, soll sich σ im Bereich von 0,2 mm befinden. Es wurde abgeschätzt, dass das PVS in der Lage ist, diese Anforderungen zu erfüllen. Der in Tabelle 6.4 ermittelte Durchschnitt, der um die Neigung des Wagens korrigierten Stationen liegt mit 0,348 mm in der Nähe, aber offensichtlich auch ohne durchgeführten Test statistisch betrachtet signifikant darüber. Aufgrund fehlender Experimente auf dieser Teststrecke kann nur vermutet werden, dass die Schienenstöße maßgeblich zu dem Ergebnis beigetragen haben. Eine Lösung kann die Reduzierung der Geschwindigkeit und dadurch weniger Bewegungen während und nach der Überfahrt sein.

Tabelle 6.4: Geschätzte Standardabweichung σ der um die Neigung des Wagens korrigierten Positionsdaten im Stationsabstand von 500 mm. Die Positionen und Neigungen resultieren jeweils aus dem Filter.

Station	3	4	5	6	7	8	9	\emptyset
	[mm]							
σ der jeweils drei Hin- und Rückfahrten	0,31	0,34	0,52	0,24	0,45	0,27	0,30	0,35
σ der drei Hinfahrten	0,09	0,28	0,26	0,11	0,10	0,11	0,29	0,18
σ der drei Rückfahrten	0,15	0,15	0,52	0,18	0,14	0,20	0,12	0,21

Der Vollständigkeit sei erwähnt, dass in der Praxis die Schienen zur Korrektur der Instrumentenfehler in der Regel zweimal befahren werden – Hin und Rück. Die Ergebnisse werden dann gemittelt. Der Übersicht halber (siehe Abbildung 6.3) wurden hier die gemittelten Ergebnisse der drei Hin- und drei Rückfahrten ausgewertet und ein geringfügig schlechteres Ergebnis in Kauf genommen.

Der χ^2 -Test wurde in Abschnitt 5.2.5 eingeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 5\%$ festgelegt. Abbildung 6.4 zeigt die Epochen, die den χ^2 Test bestanden (grün), bzw. nicht bestanden haben (rot) und das getrennt nach den Sensoren, die zu der Bestimmung der Trajektorie beitragen.

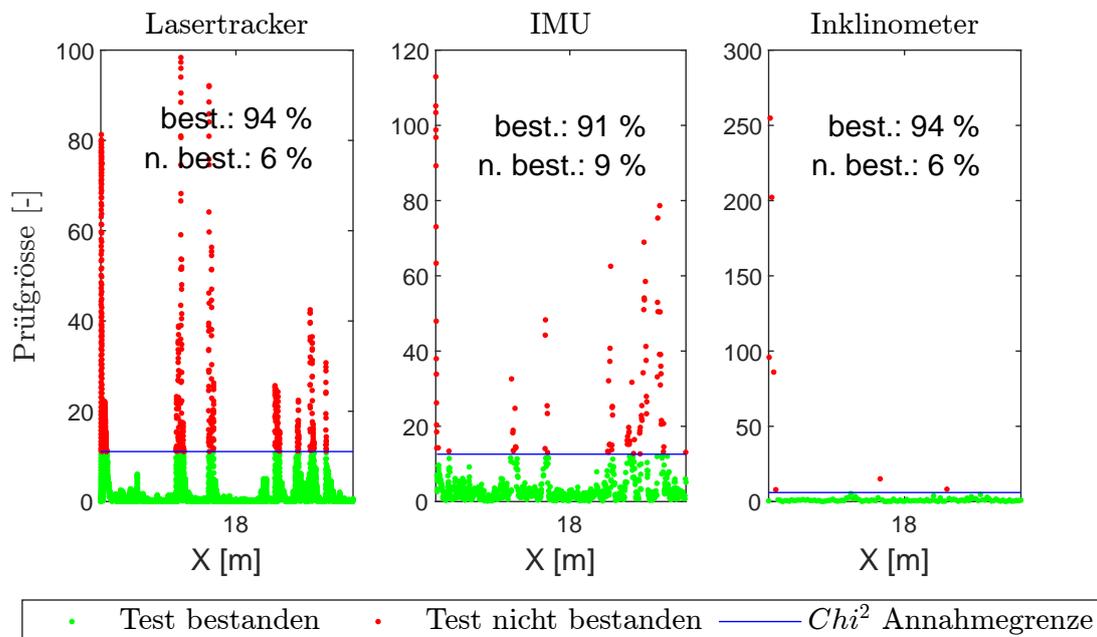


Abbildung 6.4: Ergebnisse des χ^2 -Tests getrennt nach den Sensoren Lasertracker (Abtastrate 1000 Hz), IMU (Abtastrate 100 Hz) und Inklinometer (Abtastrate 10 Hz).

Es ist gut zu erkennen, dass die Ausreißer bei den Daten des Lasertrackers zu Beginn der Fahrt und

in dem Bereich der Schienenstöße auftreten. Das passiert dort, wo das Fahrzeug stark beschleunigt und dies nicht ausreichend gut erfasst, bzw. das nicht ausreichend gut durch das Bewegungsmodell beschrieben werden kann. Gründe dafür können die Abtastrate, die gewählten Parameter für das System- und Messrauschen sowie die Unsicherheit des gewählten Sensors sein.

Die Innovationen bewegen sich idealerweise um den Erwartungswert Null herum und folgen damit einer grundlegenden Annahme für das Kalman Filter, nämlich, dass es sich um ein weißes, normalverteiltes und mittelwertfreies Rauschen handelt (Marchthaler und Dingler, 2017, S. 13). Die Abbildungen in Anlage A.5 bestätigen diese Erwartung.

Abbildung 6.5 zeigt die referenzierte Punktwolke einer Messfahrt. In der Punktwolke, die aus den Messwerten vom Lasertracker, den beiden Laserscannern, der IMU und dem Inklinometer berechnet wurde, sind deutlich die Konturen der drei Schienenprofile, die zwei Schienenstöße und die Schienenbefestigungen zu erkennen.

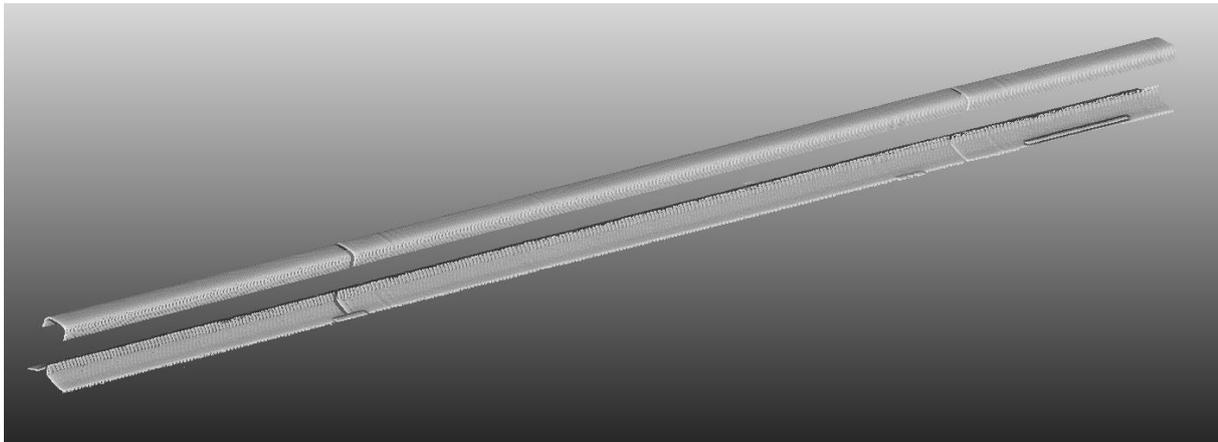


Abbildung 6.5: Referenzierte Punktwolke einer Messfahrt.

Vertikale Auslenkungen Abbildung 6.6 stellt die Z-Werte des Längsschnitts einer Hinfahrt sowie die zugehörigen Stationen dar. Auf der Oberfläche sind in aufsteigender Stationierung nach den Schienenstößen jeweils zwei „wellige“ Abschnitte zu sehen. Diese „Wellen“ befinden sich nicht auf dem Schienenprofil, sondern resultieren aus gemessenen Einflussgrößen. Der Abschnitt mit den höheren „Wellen“ entstand durch die Fahrt der nah an den Scannern befindlichen Achse, die flacheren „Wellen“ durch die Fahrt der entfernteren Achse über den Schienenstoß. Die Räder in der Nähe der Scanner verursachen ein längeres Ausschwingen (ca. 150 mm) während die Räder, die weiter entfernt sind, für ein kürzeres Ausschwingen verantwortlich sind (ca. 60 mm). Die Amplitude bewegt sich im Submillimeterbereich.

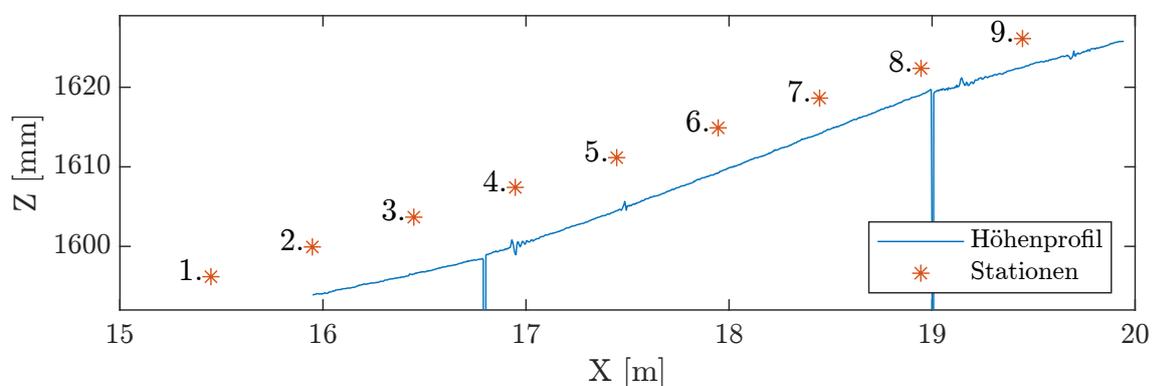


Abbildung 6.6: XZ-Diagramm einer Hinfahrt. Die Bezeichnungen der Stationen (Nr.*) sind für die bessere Übersicht versetzt dargestellt.

Präzision Abbildung 6.7 macht die Unterschiede der Punktwolken bei Hin- und Rückfahrten sichtbar. Der Vergleich der Punktwolken miteinander erfolgte mit Hilfe der Software CloudCompare. Von der 1. Hinfahrt wurde ein Mesh erzeugt, das einen Cloud-Mesh Vergleich ermöglicht. Dieser erfolgte dann für die fünf weiteren Hin- und Rückfahrten.

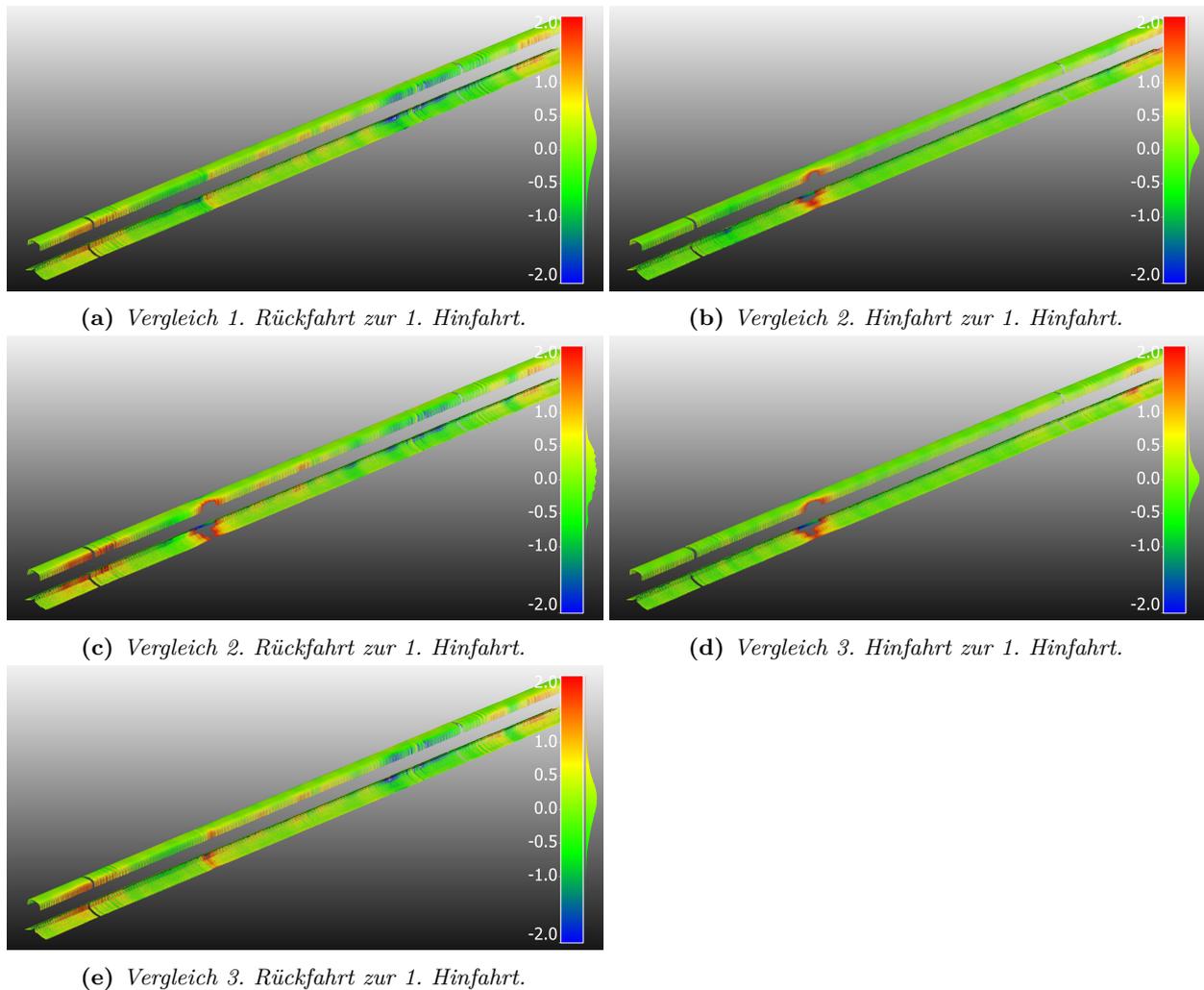


Abbildung 6.7: Punktwolke zu Mesh Vergleich jeweils aller Fahrten zur 1. Hinfahrt.

CloudCompare stellt nach dem Vergleich zur Einschätzung des Ergebnisses zwei Qualitätsparameter zur Verfügung. Das sind zum einen die mittlere Distanz \bar{D} (Gleichung 6.1) und zum anderen die Standardabweichung σ von der mittleren Distanz (Gleichung 6.2). Tabelle 6.5 führt die Ergebnisse der einzelnen Vergleiche auf.

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (6.1)$$

mit n = Anzahl der Abstände

d_i = i-te Abstände,

sowie

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i)^2 \right) - \bar{D}^2} \quad (6.2)$$

X_i = Abstand des i-ten Punktes zu seinem nächsten Nachbarn.

Die graphische Darstellung der Abstände in Abbildung 6.7 ergänzt die in Tabelle 6.5 aufgeführten Ergebnisse.

Tabelle 6.5: *Tabellarische Darstellung für die Messkampagne I: Punktwolke zu Mesh Vergleich aller Fahrten zur 1. Fahrt.*

Vergleich	Mittlere Distanz		Standardabweichung	
	[mm]		[mm]	
	Kopf	Fuß	Kopf	Fuß
1. Rück- zur 1. Hinfahrt	0,07	0,07	0,50	0,46
2. Hin- zur 1. Hinfahrt	0,02	0,03	0,40	0,43
2. Rück- zur 1. Hinfahrt	0,07	0,11	0,47	0,51
3. Hin- zur 1. Hinfahrt	0,03	0,06	0,44	0,48
3. Rück- zur 1. Hinfahrt	0,10	0,12	0,51	0,47

Die einzelnen Darstellungen in Abbildung 6.7 zeigen, dass die Scans der Hin- und Rückfahrten zu einem Großteil deckungsgleich sind. Dies ist, wie bereits erwähnt, auch in den Neigungsdaten von Abbildung 6.3 sowie Tabellen 6.3 und 6.4 mit den Standardabweichungen zu sehen. Unter dem Aspekt der Präzision betrachtet, beträgt die Standardabweichung gemäß Tabelle 6.5 weniger als 0,5 mm.

Abbildung 6.8 zeigt die referenzierten Profile aller sechs Fahrten (Detailbild 6.8c) sowie die beiden Schienenstöße (Detailbilder 6.8a und 6.8b). Den Überlagerungen ist zu entnehmen, dass sie optimal zueinander passen, was wiederum ein Qualitätsmerkmal der Synchronisierung ist.

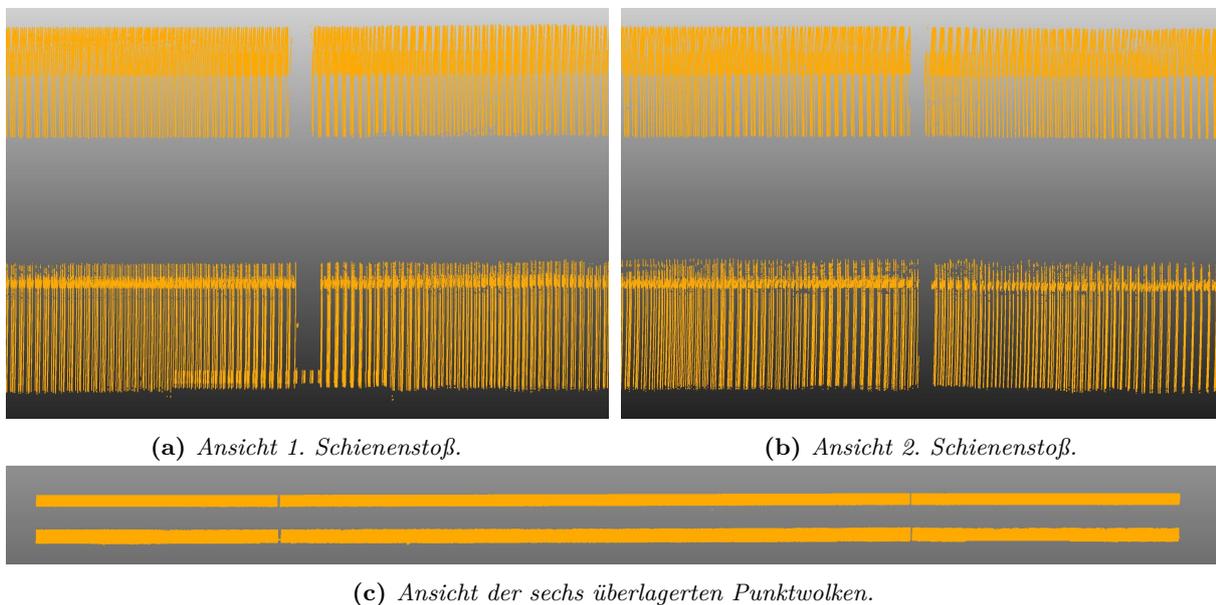


Abbildung 6.8: *3D Scans aller sechs Fahrten sowie Bereich der Schienenstöße im Detail.*

Genauigkeit Die bisherigen Betrachtungen beschäftigten sich mit der Präzision der sechs Befahrungen der Schienenprofile mit dem PVS, wie die Einzelmessungen zueinander passen. Dieses Vorgehen lässt jedoch noch keinen Rückschluss darauf zu, wie die Ergebnisse zu einem übergeordnetes Koordinatensystem passen. Eine Aussage über die Genauigkeit des Messsystems konnte bis dahin noch nicht getroffen werden. Hierfür war eine weitere Untersuchung notwendig. Der ersten Messfahrt

wurden Referenzmessungen von höherer Genauigkeit gegenübergestellt. Bestimmte Bereiche der Schienenköpfe der drei Profile wurden mit einem Corner Cube Reflektor aufgemessen. Der Vergleich der Messwerte erfolgte in der Software CloudCompare. Um einen Vergleich durchführen zu können, wurde zunächst aus den Messdaten der Befahrung ein Mesh erzeugt. Zu diesem Mesh konnten im Anschluss die Abstände der Messpunkte, die mit dem CCR aufgehalten wurden, berechnet und visualisiert werden (Abbildung 6.9). Diese Abbildung gibt einen ersten Eindruck über die Genauigkeit des PVS. Da das Kugelzentrum des 1,5" CCR referenziert wurde, beträgt der Offset 19,05 mm und erklärt den Skalenbereich von 18,2 mm bis 20,0 mm in der Abbildung 6.9.

Durch den Vergleich der Punktwolke aus Einzelpunktmessungen mit einem CCR mit einem Mesh, das aus den Daten einer Messfahrt mit dem PVS erzeugt wurde, kann festgestellt werden, dass die Transformationen, Filterung etc. dazu geführt haben, dass sich die Messungen mit der Referenz decken. Da darüber hinaus auch Profilquerschnitte ca. 50 mm von den jeweiligen Schienenenden aufgemessen wurden, ist eine zusätzliche Kontrolle der Synchronisierung möglich. Die Software CloudCompare gibt nach dem Vergleich die beiden statistischen Parameter mittlere Distanz (Formel 6.1) und Standardabweichung (Formel 6.2) aus. Die mittlere Distanz beträgt 19,00 mm und die Standardabweichung der mittleren Distanz beträgt 0,980 mm. Die mittlere Distanz ist ausreichend dicht am Durchmesser der Kugel. Die Standardabweichung der mittleren Distanz soll laut Abschnitt 4.4 um die 0,2 mm betragen. Wie bereits anhand der Ergebnisse von Tabelle 6.4 festgestellt, beeinflussen vor allem die Effekte der Schienenstöße das Ergebnis. Als Bestätigung, dass die Transformationen und die Synchronisierung erfolgreich waren, soll diese Validierung ausreichend sein.

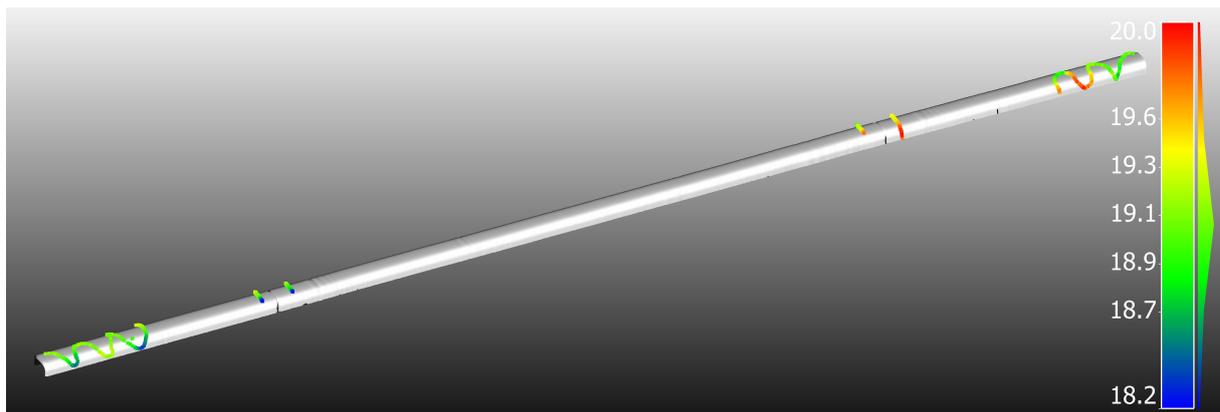


Abbildung 6.9: Validierung durch Vergleich von Punktwolken, die durch Abfahrten des Schienenkopfes mit einem CCR entstanden sind und einem erzeugten Mesh aus der ersten von sechs Messfahrten.

6.3.2 Einfacher Ansatz zum Finden weiterer Zustandsgrößen

Zum Finden weiterer Zustandsgrößen, in diesem Fall Schienenbefestigungen, wird folgende Vorgehensweise verwendet. In allen Profilschans wird jeweils die Summe der Z-Werte gebildet. Da in der Regel bekannt ist, in welchem Bereich um die Schienenprofile herum sich die Schienenbefestigung befindet, erfolgt die Summenbildung nur in diesem Ausschnitt. Überschreitungen eines Schwellwerts deuten in diesem Fall auf eine Schienenbefestigung hin. Als weiteres Kriterium wird die Aufeinanderfolge von überschrittenen Schwellwerten in Schienenlängsrichtung und somit die Länge der Schienenbefestigung ergänzt.

Abbildung 6.10 zeigt den Ablauf in graphischer Form für eine Profilhälfte. Bereits in den Rohdaten sind die in diesem Fall drei Schienenbefestigungen anhand der Überschreitungen unterhalb der blauen horizontalen Linie zu erkennen.

Die blaue Linie ist der 1. Mittelwert aller Rohdaten. Alle Werte, die größer als der Mittelwert sind, werden gleich Null gesetzt. Der magentafarbene Verlauf zeigt das gleitende Mittel der Daten aus dem

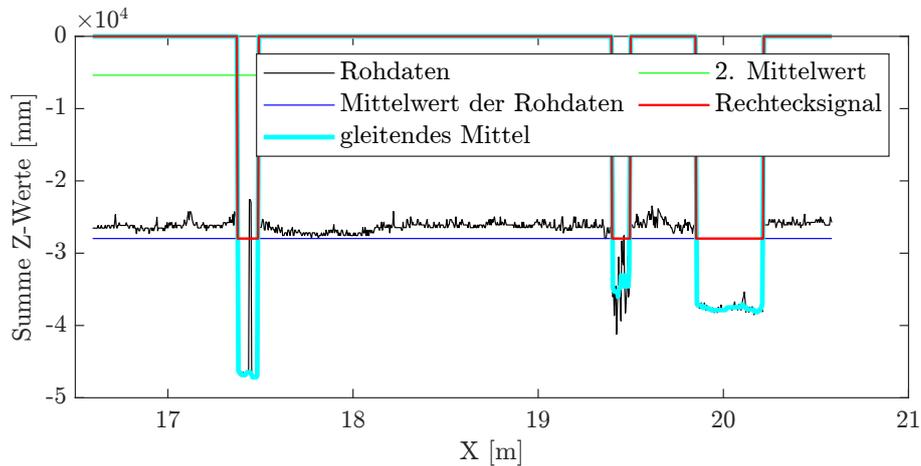


Abbildung 6.10: Umwandlung der Rohdaten in ein Rechtecksignal.

vorigen Schritt. Im nächsten Schritt wird ein 2. Mittelwert gebildet. Alle Daten die kleiner als dieser 2. Mittelwert sind, werden gleich dem 1. Mittelwert gesetzt. Das Ergebnis ist ein Rechtecksignal in dem sehr einfach negative und positive Flanken gefunden werden können, die für Anfang und Ende z. B. der Schienenbefestigung stehen.

Im gewählten Beispiel wurden im Bereich des Schienenfußes an folgenden Positionen Objekte, hier Schienenbefestigungen, mit entsprechenden Längsmaßen erkannt:

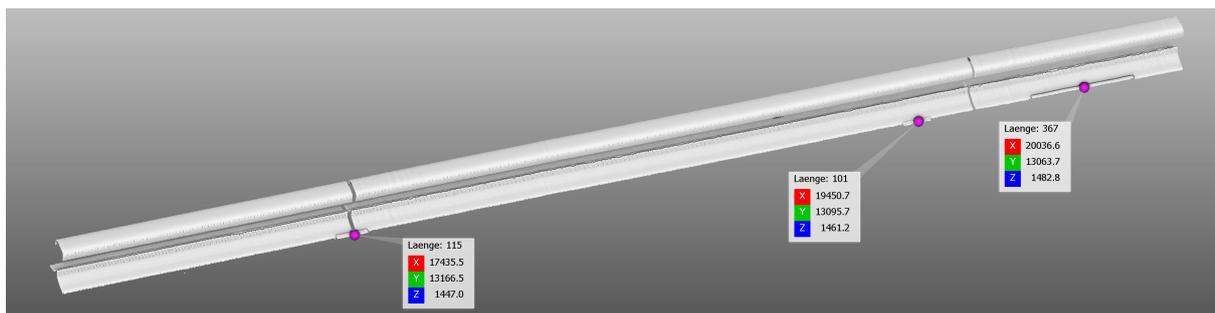


Abbildung 6.11: Erkannte Schienenbefestigungen: Position und Länge.

Das beschriebene Vorgehen ist einfach und schnell. Andere Abläufe sind denkbar. Im Prinzip können nach ähnlichem Schema nach weiteren geometrischen Objekten oder Eigenschaften, wie z. B. Abnutzungen, Schienenstöße, etc. gesucht werden.

6.3.3 Zusammenfassung

Auf einer Strecke von 3 x 2,2m wurde das PVS auf seine Funktion sowie die erzeugten Messdaten überprüft. Das Fahrzeug ist dreimal hin und dreimal zurück über die zwei Schienenstöße gefahren. Dass die Stöße eine Breite von über 10 mm haben, war eine bewusst gewählte Herausforderung. In der Praxis kommt das nur noch äußerst selten vor. In der Regel sind Schienen verschweißt oder liegen Stoß an Stoß. In diesem Versuch sollte geprüft werden, wie der Wagen sich verhält und wie die Ergebnisse aussehen. Erwartungsgemäß hat die Überfahrt zu Bewegungen des Wagens geführt, die durch die zum Zeitpunkt verbaute Sensorik bzw. das Filter nicht vollständig in der Auswertung abgebildet werden konnten. Für die gegebene Situation sind die erreichten Ergebnisse sehr gut. Vor allem konnte gezeigt werden:

- das System fährt auf Schienen mit balligem Kopf (im Profil konvex) und kippt nicht herunter.
- die Fahrten sind reproduzierbar (Abbildung 6.2).
- das Synchronisierungs- und Kalibrierungskonzept funktioniert.

- der Datenfluss funktioniert.
- die referenzierten Profile liefern reproduzierbare Ergebnisse (Abschnitt 6.3.1).
- aus den Daten lassen sich die gewünschten Informationen, wie z. B. Anzahl, Position und geometrische Eigenschaften von Objekten extrahieren (Abschnitt 6.3.2).

Es ist festzustellen, dass das Konzept auf der 3 x 2,2 m langen Teststrecke im Labor funktioniert hat. Die ermittelte Standardabweichung der Positionsdaten von $\sigma = 0,35$ mm wurde aus allen drei Hin- und Rückfahrten ermittelt. Hierbei wurden jeweils die Hin- und Rückfahrten der Übersicht halber gemeinsam ausgewertet. In der Praxis werden die Schienen einmal Hin und einmal zurück befahren. Es ist zu erwarten, dass die Standardabweichungen der Positionsdaten in der Praxis günstiger sind.

6.4 Messkampagne II: Messung unter realen Bedingungen

Das entwickelte Multisensorsystem sollte in einer 2. Messkampagne unter realen Bedingungen (vgl. Abschnitt 6.4.1) validiert werden. Ein hochgenaues, lokales Netz, basierend auf ausgeglichenen Referenzpunkten (vgl. Abschnitte 6.4.2 und 6.4.3), ist essentielle Grundlage für die Beobachtungen von den einzelnen Standorten.

6.4.1 Messumgebung

Es wurde eine für die Aufgabenstellung optimale Gleisanlage gewählt. Sie befindet sich in dem Mittelschiff einer Stahlbauhalle der Dimension $100 \times 100 \times 10$ m³. Auf der 55 m langen Schienenanlage fahren drei CNC gesteuerte Brenntische, die für das Plasmaschneiden von Stahlblechen eingesetzt werden.



Abbildung 6.12: Halle mit Gleis und Brenntischen.

Für ein präzises Anfahren der Bleche in Längsrichtung ist an den verlegten Schienen im Steg eine Zahnstange befestigt. Die Schienen vom Typ 54E4 sind mit Klemmen auf einem Stahlträger fixiert. Die Besonderheit der verbauten Schiene liegt darin, dass der Kopf bearbeitet wurde. So wurden die Seiten des Kopfes parallel und die ballige Fahrfläche flach gefräst. Links und rechts des Kopfes wurden Fasen gefräst. Die Schienenenden sind rechtwinklig und nicht verschweißt. Sie liegen ohne Spalt Stoß an Stoß (Abbildung 6.13).

Das Gleis ist optimal von allen Seiten und ohne besondere Sicherung oder Arbeitsbühne zugänglich, da es sich nur ca. 60 cm über dem Hallenboden befindet. Die Kampagne fand im Spätherbst, nachts und bei geschlossenen Hallentoren statt. Folglich waren stabile meteorologische Bedingungen gegeben. Aufgrund der Durchführung außerhalb der Betriebszeit gab es keine Erschütterungen.

6.4.2 Messkonzept und Netzplanung

Messungen in langgestreckten Netzen sind aufgrund schleifender Schnitte sorgfältig zu planen und durchzuführen. Die für die Validierung des Messsystems notwendige bestmögliche Referenz zieht



Abbildung 6.13: Schiene mit rechteckig gefrästem Kopf, Fasen, Zahnstange im Steg, rechtwinkligem Stoß und Schienenbefestigung.

besonders hohe Erwartungen an eine geringe Unsicherheit des Netzes nach sich. Zur Reduzierung der Fehlerellipse können Beobachtungen aus zueinander möglichst rechtwinkligen Richtungen beitragen.

Am Beispiel des Lasertrackers AT960 ist die Unsicherheit der Winkelmessung höher als die der Streckenmessung. Folglich ist die Achse der Fehlerellipse quer zur Visur größer. Nach der Netzausgleichung hat der mehrfach gemessene Punkt eine geringere Standardabweichung, als wenn er von einem Standort aus beobachtet worden wäre.

Für die Planung des Netzes mit den dafür notwendigen Standorten wurde das Hallenschiff vorab gescannt und die relevanten Objekte modelliert. Diese Vorarbeit machte es möglich die Messung in der Software SpatialAnalyzer zu simulieren und zu optimieren. Der Simulation liegt eine Monte-Carlo-Simulation zu Grunde (Arent et al., 2015, S. 340).

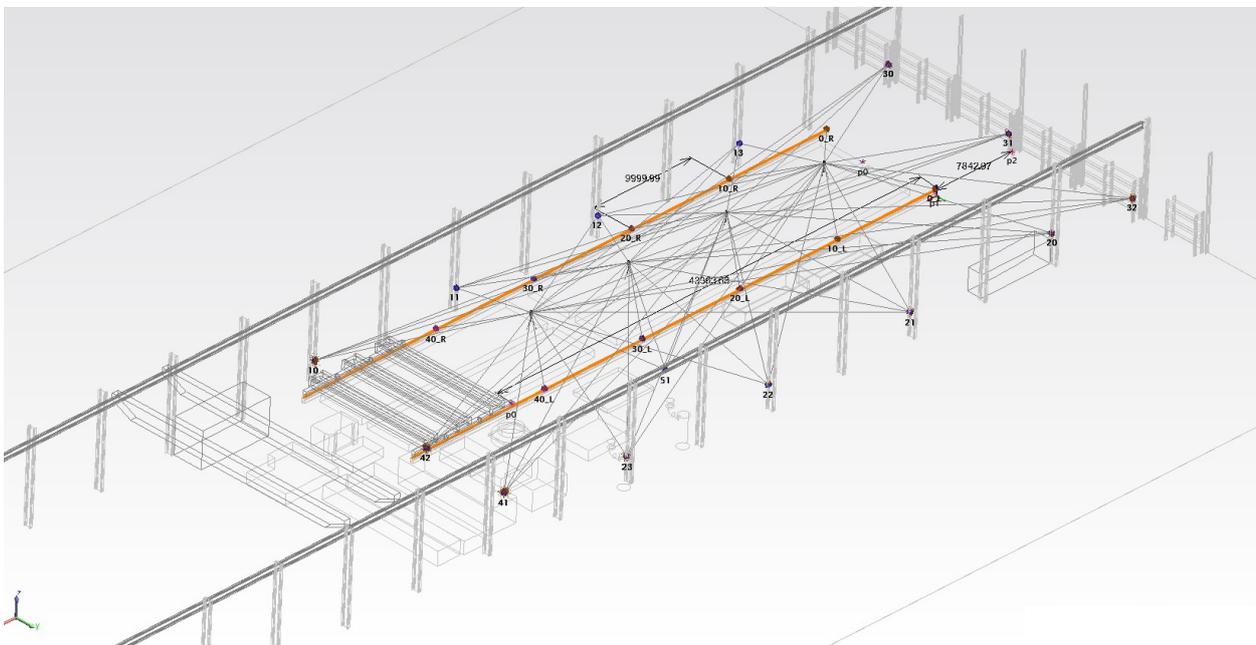


Abbildung 6.14: Netzkonfiguration als Grundlage für die Netzsimulation.

Abbildung 6.15 zeigt die Anordnung der Objekte in der Halle sowie Standorte und Anschlüsse. Für die Durchführung der Arbeiten wurden vier Standorte vorgesehen. Jeweils zwei für die Beobachtung des Wagens (Nr. 0 und 1). Sie sind vor Kopf der Schienen angeordnet. Damit soll eine lange Visur und eine Situation, wie in Abschnitt 4.4 simuliert, ermöglicht werden. Jeweils zwei Standorte sind

in den Viertelpunkten des messbaren Gleisabschnittes für ein stabiles Netz und die Messung aller Nester sowie den Referenzscan von Abschnitten des Gleises (Nr. 2 und 3) vorgesehen. Die für die Netzausgleichung und die Stationierungen notwendigen Anschlusspunkte wurden gleichmäßig um das Gleis und die Standorte herum verteilt (Nr. 1x und 2x für die Längsseite, 3x und 4x für die Punkte vor Kopf des Gleises). Bis auf einen Punkt befanden sich alle anderen ca. 2 m über dem Boden. Zur Stabilisierung des Netzes wurde ein Punkt als Bodenpunkt (Nr. 51) gewählt. Er befand sich folglich ca. zwei Meter niedriger zu den übrigen Anschlüssen.

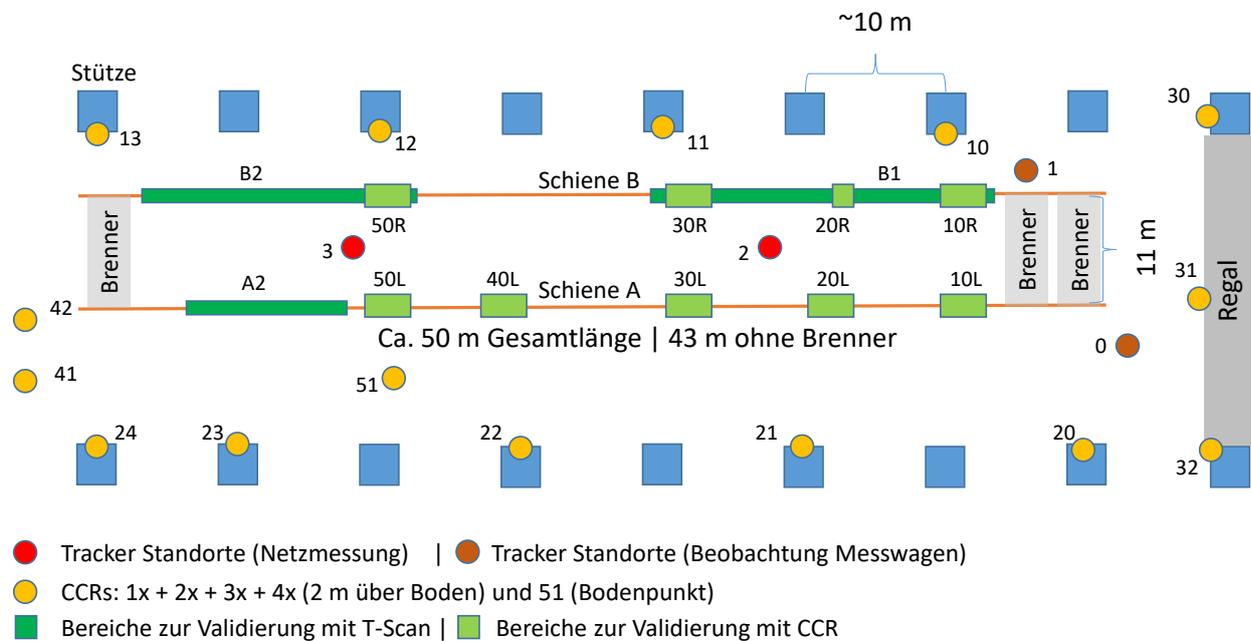


Abbildung 6.15: Netzplanung.

Die Netzmessung wurde mit einem Leica Tracker AT960 (vgl. Abschnitt 4.2.1) auf schwerem Leica Stativ MST27 und der Industrievermessungssoftware Spatial Analyzer durchgeführt. Die Messungen erfolgten an jedem Standort mit horizontiertem Instrument unter Verwendung des integrierten Kompensators. Die Kompensatorablesungen werden in der Auswertung berücksichtigt. Die Ziele wurden mit einem CCR, der in Präzisionsdriftnestern lag, signalisiert und in beiden Lagen gemessen. Für die Messungen von den einzelnen Standorten wurden anschließend in einer Netzausgleichung (vgl. Abschnitt 6.4.3) die Transformationsparameter ermittelt. Diese Parameter ermöglichen die Transformation aller Beobachtungen in ein übergeordnetes Netz. Der Vergleich der Ergebnisse, die mit dem Messwagen erfasst wurden, ist nun mit der Referenz, die mit einem CCR, bzw. einer T-Scan bestimmt wurden, möglich.

6.4.3 Ergebnisse und Bewertung der Netzmessung

Die Messergebnisse wurden in SpatialAnalyzer mit dem Modul Unified Spatial Metrology Network (USMN) ausgewertet. Das Konzept dieses Moduls basiert auf verketteten Transformationen, auch Bündelausgleichung genannt (Arent et al., 2015, S. 340). Das Ergebnis der Netzausgleichung wird nachfolgend dargestellt und diskutiert. Tabelle 6.6 zeigt die Unsicherheiten der Standorte.

Heraus sticht Standort 1, von dem aus die Fahrt des Messwagens auf Schiene B beobachtet wurde, mit einer 3D Punktunsicherheit von 0,11 mm. Mit Blick auf den Einfluss der einzelnen Achsen, ist die Z-Komponente in diesem Fall maßgeblich. Die anderen drei Standorte haben eine halbe 3D Unsicherheit (0,04-0,065 mm).

Tabelle 6.7 zeigt die Unsicherheiten der Anschlüsse. Das Ranking in Prozent gibt an, wie viel Prozent der erwarteten 3-Sigma-Hüllkurve durch das maximale Residuum der Messung belegt sind. 100% sollten nicht überschritten werden.

Tabelle 6.6: *Unsicherheiten der Standorte. Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k=2$ ergibt.*

Standort	Samples	U _x	U _y	U _z	UMag
-	St.	mm			
0	300	0,030	0,033	0,047	0,065
1	300	0,035	0,043	0,044	0,071
2	300	0,022	0,025	0,033	0,046
3	300	0,019	0,017	0,030	0,040

Tabelle 6.7: *Unsicherheiten der Anschlüsse (2σ).*

Weight	Point	Max Err	Ranking	U _{mag}	Meas
-	Nr.	mm	%	mm	-
1	10	0,099	49,0	0,155	__ 2 3
1	11	0,047	51,0	0,127	__ 2 3
1	12	0,076	60,3	0,121	__ 2 3
1	13	0,200	84,7	0,153	0 1 2 3
1	20	0,226	84,3	0,315	__ 2 3
1	21	0,109	94,5	0,180	0 1 2 3
1	22	0,079	57,5	0,196	__ 2 3
1	23	0,094	80,7	0,244	__ 2 3
1	24	0,202	84,5	0,226	0 1 2 3
1	30	0,228	77,8	0,161	0 1 2 3
1	31	0,183	62,5	0,144	0 _ 2 3
1	32	0,165	81,6	0,152	0 1 2 3
1	41	0,092	47,6	0,248	__ 2 3
1	42	0,099	42,1	0,199	__ 2 3
1	51	0,131	91,7	0,147	__ 2 3

Die Ergebnisse der Netzausgleichung liegen mit einer 2σ Unsicherheit von 0,1-0,25 mm für die Anschlüsse unter Berücksichtigung der Messdistanzen im erwartbaren Bereich. Die Transformationsparameter des Lasertrackers können auf die vom Wagen erfassten Messdaten angewendet werden.

6.5 Qualitätsaussagen zu dem Profilvermessungssystem

6.5.1 Bewertung der Kalibrierparameter

Vor und nach jeder Fahrt mit dem Messwagen auf den Schienen A und B (vgl. Abbildung 6.15) wurden die PLS mittels des Kalibrierkörpers kalibriert. Im Idealfall stimmen die Kalibrierparameter vor und nach einer Fahrt überein und dokumentieren damit, dass die PLS während der Fahrt keine Translationen oder Rotationen erfahren haben. Wie die Überprüfung des Vorgehens unter Laborbedingungen in Abschnitt 4.6.2 gezeigt hat, ist ein Vergleich mit der aktuell verbauten Zentriervorrichtung möglich. Es wurde eine Präzision ermittelt, gegen die die Werte aus den in situ Kalibrierungen verglichen werden können.

Bei der Montage des Kalibrierkörpers müssen auf folgende Details geachtet werden, um reprodu-

zierbare Kalibrierparameter zu erreichen:

1. Die Scanner dürfen nicht versehentlich berührt und dadurch verstellt werden.
2. Der Zentrierstifte des Kalibrierkörpers müssen vollständig in die Zentrierbuchsen des Fahrzeugs eingesetzt sein.

Aufgrund der ermittelten Präzision unter Laborbedingungen (Abschnitt 4.6.2) und deren Vergleich mit den nachfolgend aufgeführten Kalibrierparametern für die Schiene A, kann eine Veränderung der Pose der PLS weitestgehend ausgeschlossen werden.

Simultan zu den Tabellen 4.7 und 4.8 aus Abschnitt 4.6.2 zeigen die Tabellen 6.8 und 6.9 die vier Sätze der Kalibrierparameter sowie die zugehörigen Standardabweichungen vor und nach jeder der jeweils drei Hin- und Rückfahrten auf der Schiene A. Gezeigt werden die ermittelten Parameter für den linken und rechten PLS. Unterhalb der ermittelten Standardabweichungen der Kalibrierparameter sind deren Durchschnittswerte aufgeführt. In der letzten Zeile sind die Standardabweichungen der Kalibrierparameter dargestellt.

Wie zu erkennen ist, sind die Standardabweichungen aus der jeweils letzten Zeile bis auf t_y und t_z alle kleiner als die Durchschnittswerte der Standardabweichungen der Kalibrierparameter. Da auch der Wert der dritten Kalibrierung für die Z-Komponente auffällig ist, wird die Ursache sein, dass einer oder mehrere der drei Zentrierstifte des Kalibrierkörpers nicht vollständig in den Zentrierbuchsen eingesteckt gewesen ist. Das sich die PLS bewegt haben, ist eine zweite Möglichkeit. Gegen diese Möglichkeit spricht, dass kein Trend bei den 6DoF Parametern erkennbar ist.

Tabelle 6.8: *Ergebnisse der vier Kalibrierungen vor und nach den Fahrten auf der Schiene A für den linken PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle vier Kalibrierungen und die arithmetrischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt.*

Nr.	tx	σ_{tx}	ty [mm]	σ_{ty}	tz	σ_{tz}	ω	σ_{ω}	ϕ [Grad]	σ_{ϕ}	κ	σ_{κ}
1.	687,74	0,16	-109,43	0,11	76,58	0,03	3,42	0,00	-0,01	0,01	1,56	0,01
2.	687,98	0,16	-109,57	0,11	76,49	0,03	3,42	0,00	-0,01	0,01	1,56	0,01
3.	688,10	0,16	-110,02	0,11	76,11	0,03	3,42	0,00	-0,01	0,01	1,56	0,01
4.	687,76	0,15	-109,56	0,111	76,48	0,03	3,42	0,00	-0,01	0,01	1,56	0,01
		$\varnothing 0,16$		$\varnothing 0,11$		$\varnothing 0,03$		$\varnothing 0,00$		$\varnothing 0,01$		$\varnothing 0,01$
σ der 6DoF Parameter												
1.-4.	0,15		0,23		0,18		0,00		0,00		0,00	

Tabelle 6.9: *Ergebnisse der vier Kalibrierungen vor und nach den Fahrten auf der Schiene A für den rechten PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle vier Kalibrierungen und die arithmetrischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt.*

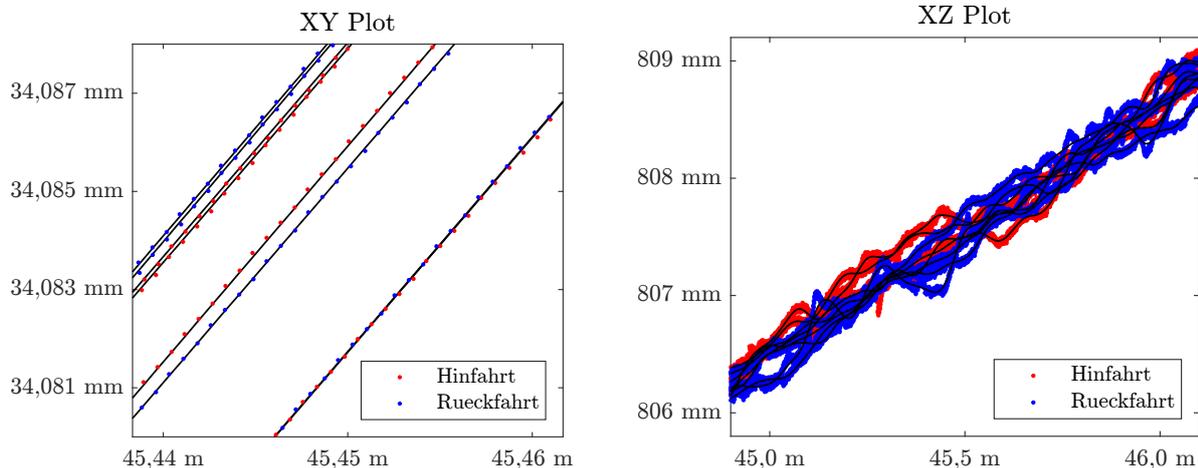
Nr.	tx	σ_{tx}	ty [mm]	σ_{ty}	tz	σ_{tz}	ω	σ_{ω}	ϕ [Grad]	σ_{ϕ}	κ	σ_{κ}
1.	688,36	0,16	102,68	0,11	78,83	0,03	2,79	0,00	-0,015	0,01	1,56	0,00
2.	688,34	0,16	102,48	0,11	78,95	0,03	2,80	0,00	-0,01	0,01	1,56	0,00
3.	688,25	0,16	101,98	0,11	79,31	0,03	2,80	0,00	-0,01	0,01	1,56	0,00
4.	688,25	0,17	102,48	0,11	78,97	0,03	2,80	0,00	-0,01	0,01	1,56	0,00
		$\varnothing 0,16$		$\varnothing 0,11$		$\varnothing 0,03$		$\varnothing 0,00$		$\varnothing 0,01$		$\varnothing 0,00$
σ der 6DoF Parameter												
1.-4.	0,05		0,26		0,18		0,00		0,00		0,00	

Da der Vergleich der Kalibrierparameter von Schiene B vergleichbare Ergebnisse liefert, wird auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet. Es kann festgestellt werden, dass die Standardabweichungen der Kalibrierparameter aus der Labormessung und der Messkampagne II die gleiche Größenordnung haben. Das spricht für die Stabilität des Systems und damit für eine Reproduzierbarkeit der Kalibrierparameter. Allerdings ist die Standardabweichung über die einzelnen 6DoF Parameter relativ groß, bzw. können mit einer modifizierten Arretierung mit großer Wahrscheinlichkeit bessere Ergebnisse erreicht werden. Für die Translationen erscheint ein σ_{trans} in der Größenordnung von 0,05 – 0,1 mm und bei den Rotationen ein σ_{rot} in der Größenordnung von 0,0001 – 0,0002 Grad erreichbar.

6.5.2 Einordnung der Ergebnisse der referenzierten Scanprofile

Innerhalb einer Hin- und Rückfahrt sind die Querabstände der Scans zueinander weniger als einen halben Millimeter groß. Das entspricht dem Wert, der in der Messkampagne I ermittelt wurde. Nach entfernen, Kalibrierung der Scanner und wieder auf die Schiene setzen sowie anziehen der Schwingen, hat der getrackte CCR jedoch eine um wenige Millimeter andere Position. Sehr wahrscheinlich für dieses Auftreten ist, dass die Lage des Wagens sich auf der Schiene quer zur Fahrtrichtung nach Lösen und Anziehen um 1-2 mm verändert. Das kann mit einer unterschiedlichen Anziehungskraft der Schwingen erklärt werden. Das beschriebene Phänomen ist in einem Ausschnitt eines XY-Plots (Abbildung 6.16a) der Rohdaten des getrackten CCR Reflektors zu sehen.

Zunächst wurde erwartet, dass der Effekt in den referenzierten Scans der Fahrten nicht erkennbar sein würde, denn die Scanner sind fest mit dem Wagen verbunden und die Pose sollte aus der Filterung zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Leider ist dem nicht so. Da die Schwingen von der Reflektorachse entkoppelt sind, sind auftretende Spannungen, die für eine nicht mehr zur Plattform lotrechten Verkipfung der Reflektorhalterachse sorgen, unwahrscheinlich. Ebenso unwahrscheinlich ist ein Verziehen der Scannerhalterung durch Spannungen der Konstruktion. Als wahrscheinlichste Ursache wird ein leicht verändertes Anziehverhalten der vorderen und hinteren Schwingen beim Anziehen an die Schiene vermutet. Das führt dazu, dass eine nicht parallele und nach einer Kalibrierung eine Veränderung des Winkels zwischen Wagenlängs- und Schienenkopfachse erfolgt.



(a) Ausschnitt eines XY-Plots aller gemessenen Punkte auf den CCR. Dicht beieinander befinden sich die jeweils zueinander gehörende Hin- und Rückfahrt.

(b) Ausschnitt eines XZ-Plots aller gemessenen Punkte auf den CCR.

Abbildung 6.16: Ausschnitte aller gemessenen Punkte auf den CCR für alle Hin- (rot) und Rückfahrten (blau). Die schwarzen Linien sind die gefilterten Ergebnisse.

Abbildung 6.16b zeigt einen Ausschnitt der Z-Werte in einer Entfernung von 45 m vom Lasertracker. Die Differenzen bewegen sich im Bereich von wenigen Zehntelmillimetern. Die Hin- und Rückfahrten

sind farblich voneinander getrennt dargestellt. Wie zuvor beschrieben, wurden Hin- und Rückfahrten in zwei verschiedenen Lagen gemessen. Es ist gut sichtbar, dass es keine eindeutigen Unterschiede gibt, der Höhenindexfehler also vernachlässigbar ist. Die gleiche Erkenntnis trifft bei Betrachtung der XY-Werte (Lage, Abbildung 6.16a) also den Ziel- und Kippachsfehler zu.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Beobachtungen sind wichtig, um mögliche Einsätze des Messwagensystems sinnvoll planen und durchführen zu können:

- der Lasertracker muss vor der Messung gemäß den internen Kalibrierprogrammen kalibriert sein, um einlagige Messungen durchführen zu können.
- Die Schwingen des Wagens sollten vor Abschluss der Messung auf einer Schiene nicht gelöst und wieder angezogen werden. Sollte dies nicht vermeidbar sein, dann muss eine Referenz am Schienenkopf gemessen werden - im einfachsten Fall mit Hilfe eines CCRs. In einer Weiterentwicklung kann z. B. die automatische Abschaltung nach Erreichen einer bestimmten Spannung optimiert werden, sodass dieses Phänomen nicht mehr auftritt.

Eine Weiterverarbeitung der Daten ist für diese Messkampagne möglich, da 1. der abweichende Winkel zwischen Wagen- und Schienenkopfachse ein konstanter Faktor ist und 2. aufgrund der Messung mit der T-Scan eine Referenz vorhanden ist. Durch Anbringen eines konstanten Offsetwinkels ($\arctan(\text{Querabweichung}/[\text{Abstand der Führungsrollen in Wagenlängsrichtung}])$) um die Vertikalachse, kann die konstante Querabweichung korrigiert werden.

Mit dieser Einordnung der Messergebnisse kann eine Auswertung ähnlich wie sie schon im Abschnitt 6.3.1 durchgeführt wurde, gemacht werden. Hierauf geht der nachfolgende Abschnitt ein.

6.5.3 Validierung der referenzierten Profile

Simultan zu Abschnitt 6.3.1 wurden alle referenzierten Scans von Schiene A jeweils zu der 1. Messfahrt verglichen. Hierdurch ist eine Aussage zu der Präzision möglich. Tabelle 6.10 stellt die Ergebnisse dar.

Tabelle 6.10: *Tabellarische Darstellung für die Messkampagne II: Punktwolke zu Mesh Vergleich aller Fahrten zur 1. Fahrt. Im Gegensatz zu Tabelle 6.5 bezieht sich der Vergleich in diesem Fall auf eine Länge von 35 m*

Vergleich	Mittlere Distanz	Standardabweichung
	[mm] Kopf	[mm] Kopf
1. Rück- zu 1. Hinfahrt	0,36	0,40
2. Hin- zu 1. Hinfahrt	0,27	0,38
2. Rück- zu 1. Hinfahrt	0,10	0,38
3. Hin- zu 1. Hinfahrt	0,06	0,38
3. Rück- zu 1. Hinfahrt	0,14	0,43

Des Weiteren wurden alle Messfahrten einzeln sowie zusammen zu der mit der T-Scan gemessenen Referenz verglichen, wodurch eine Angabe zur Genauigkeit des Systems möglich ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.11 zusammengefasst und für die 1. Messfahrt in Abbildung 6.17 exemplarisch dargestellt.

Im Vergleich zu der gemessenen Strecke der Messkampagne I fallen bei der Strecke der Messkampagne II bei den Ergebnissen der Auswertung keine unerklärlichen Unterschiede auf. Zunächst ist festzustellen, dass der Abschnitt der Kampagne I ca. 6 m lang ist (Messdistanz 2 m bis 8 m). Der Abschnitt der Kampagne II ist ca. 10 m lang (Messdistanz 40 m bis 50 m). Der gemessene Abschnitt der Kampagne I enthält zwei nicht verschweißte Schienenstöße, die jeweils einen Spalt von

Tabelle 6.11: *Tabellarische Darstellung: Punktwolke zu Mesh Vergleich aller Fahrten zur Referenz, die mit der T-Scan gemessen wurde.*

Vergleich	Mittlere Distanz	Standardabweichung
	[mm] Kopf	[mm] Kopf
1. Hinfahrt zur Referenz	0,05	0,40
1. Rückfahrt zur Referenz	0,49	0,44
2. Hinfahrt zur Referenz	0,29	0,49
2. Rückfahrt zur Referenz	0,14	0,38
3. Hinfahrt zur Referenz	0,07	0,42
3. Rückfahrt zur Referenz	0,37	0,38
	∅0,10	∅0,42
1. bis 6. Fahrt zur Referenz	0,08	0,44

über 10 mm haben. Der gemessene Abschnitt von Kampagne II hat ebenfalls zwei unverschweißte, ebenfalls 90° Schienenstöße, die jedoch Stoß an Stoß liegen. Dieser Unterschied führt zu einem anderen Fahrverhalten, das sich in den Messdaten zeigt. Bei den Fahrten der Messkampagne I gibt es mehr Abweichungen quer zur Schiene, die aufgrund der Überfahrten bei den Schienenstößen herrühren.

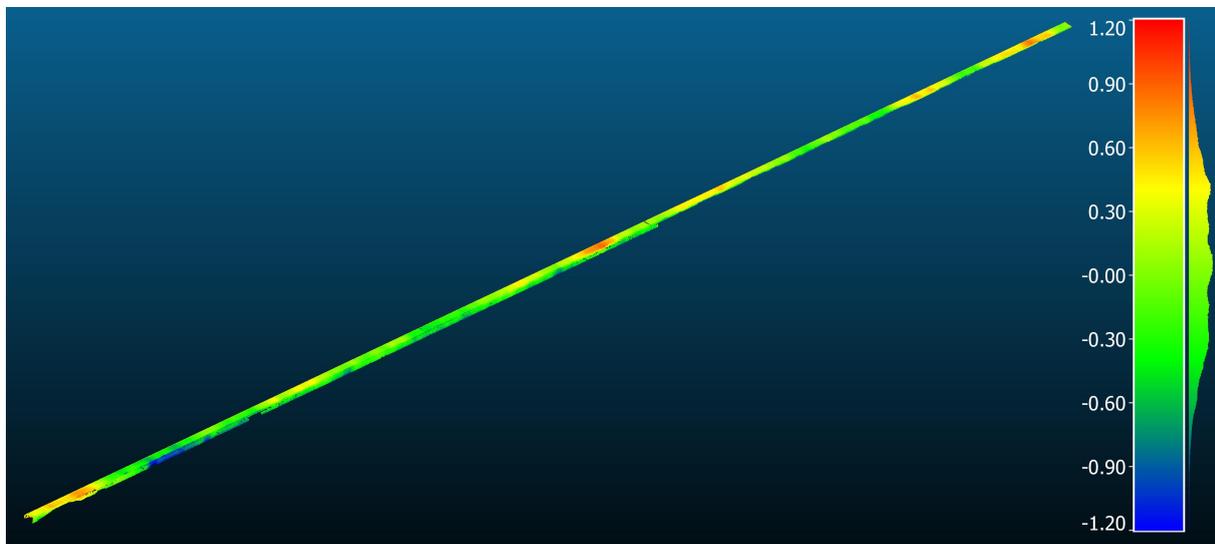


Abbildung 6.17: *Validierung durch Vergleich von Punktwolken, aus referenzierten Scans der 1. Messfahrt und einem erzeugten Mesh, welches aus einem Scan des Schienenkopfes mit einer T-Scan entstanden ist.*

Im Vergleich zu den Standardabweichungen in Tabelle 6.5 von Messkampagne I sind die Standardabweichungen in Tabelle 6.10 von Kampagne II vergleichbar groß. An den Sensoren sind während der Fahrten von Messkampagne II sowohl in der Abbildung 6.17, als auch in den mittleren Distanzen und Standardabweichungen in Tabelle 6.11, die auf dem Vergleich der Punktwolken zu dem Mesh aus der Referenz mit der T-Scan basieren, keine Translationen oder Rotationen wiederzufinden. Die Geschwindigkeit lag bei beiden Messkampagnen jeweils bei ca. 0,4 m/s.

6.5.4 Extraktion der praktischen Schienenachspunkte aus den 3D Punktwolken

Nachdem die Qualität der referenzierten 3D Punktwolke validiert wurde, soll anhand der gescannten Punktwolke die praktische Schienenkopfachse, bzw. der Punkt der sich aus der Schienenoberkante und der senkrechten Achse durch die Schienenkopfmittle ergibt, ermittelt werden (vgl. Abbildung 6.18). Die berechneten Achspunkte entlang des Verlaufs der Schiene sind Grundlage für die Bestimmung der Zustandsparameter für Richtlinien wie z. B. der VDI 3576.

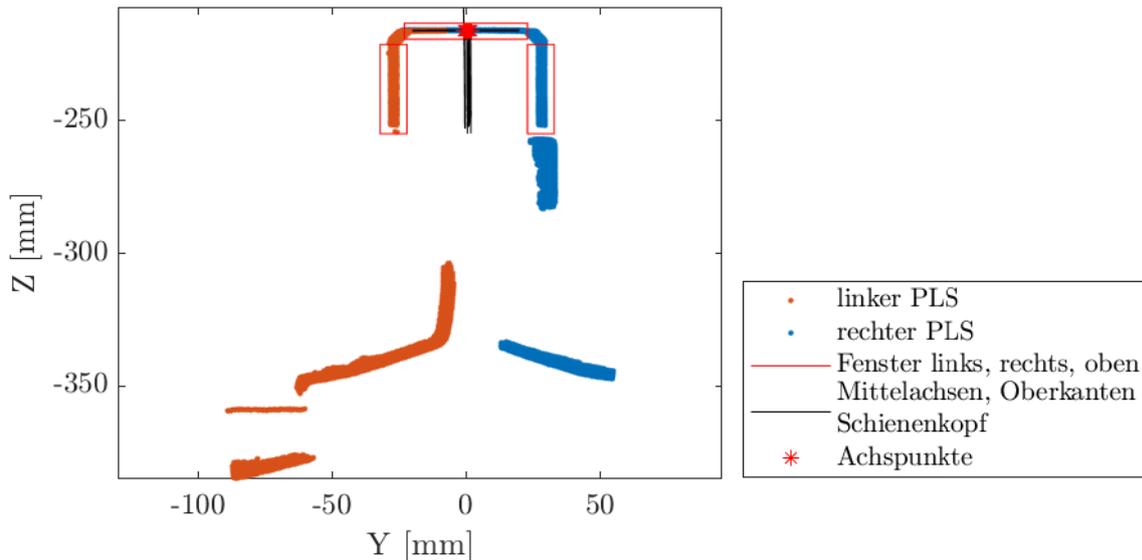


Abbildung 6.18: Alle Profile der einzelnen Stationen von Schiene A übereinander gelegt. Am Schienenkopf sind die Bereiche für die Bestimmung der Achsen sowie die Schnittpunkte zu sehen.

Für die Bestimmung der Schienenachspunkte wurde der nachfolgend beschriebene, einfache Ansatz gewählt: Die Zeitstempel der Stationen, die sich in einem Meter Abstand entlang der Schiene befinden, wurden durch lineares Interpolieren zwischen den davor und darauf folgenden Profillaserscanner Messpunkten ermittelt. Die Koordinaten der Stationen konnten daraufhin z. B. durch das Unscented Kalman Filter berechnet werden. Die Zeitstempel der Stationen ermöglichen es nach dem jeweils zeitlich davor und danach gemessenen Profils캔 zu suchen. Bei einer Abtastrate der PLS von 100 Hz und einer Geschwindigkeit des Messwagens von maximal einem Meter pro Sekunde ergibt sich ein Abstand der Profile entlang der Schienenkopfachse von maximal 10 mm zueinander. Zwei Vorgehensweisen sind für die Bestimmung der Schienenachspunkte denkbar:

1. Zum einen die Verwendung der Scanpunkte beider Profile und damit eine größere Punktzahl oder
2. die Berechnung eines Mittels, in einer festzulegenden Art, zwischen den beiden Profilen.

Zur Reduzierung des Rechenaufwands und aufgrund der gering zu erwartenden geometrischen Unterschiede im Profilquerschnitt, wurde sich für die erste Vorgehensweise und somit eine größere verwendbare 3D Punktzahl pro Station entschieden.

Die in das Wagenkoordinatensystem transformierten 3D Punktwolken der einzelnen Stationen wurden stationsweise in drei Bereiche segmentiert. Diese drei Bereiche sind die linke und rechte Seite sowie die Oberseite des Schienenkopfes (siehe auch Abbildung 6.18). Aus den Punkten der linken und rechten Seite wurden die mittig dazwischen liegenden Punkte berechnet. Im Idealfall decken sich diese Punkte mit der theoretischen Schienenkopfachse. Mit Hilfe eines Polynoms ersten Grades wurde mit Hilfe dieser Punkte eine Gerade bestimmt. Auf identische Weise wurde eine weitere Gerade auf Grundlage der Punkte der Oberseite des Schienenkopfes berechnet. Der Schnittpunkt der beiden Geraden stellt den Achspunkt am Schienenkopf dar. Der Schnittpunkt zweier Polynome

lässt sich durch Gleichsetzen der Funktionen und auflösen nach der unbekannt Variablen „x“ lösen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass zwei Geraden bei gleicher Steigung keinen Schnittpunkt haben, da sie echt parallel oder identisch sind. Die bestimmten Achspunkte können nun mit Hilfe der z. B. im Filter bestimmten Parameter der Pose in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert und weiter verarbeitet werden.

Der bereits festgestellte Querversatz der Trajektorien (vgl. Abschnitt 6.5.2, Abbildung 6.16a) ist auch in den übereinandergelegten Scans, bzw. in den berechneten Achspunkten nachzuvollziehen. Hierfür wurden in Tabelle 6.12 die Standardabweichungen für alle Achspunkte und getrennt nach den drei Hin- und Rückfahrten aufgeführt. Ebenfalls gut zu sehen ist die Stabilität des Aufbaus, insbesondere im Z-Wert. Eine Größe zur Einschätzung der Qualität ist das Mittel und die Standardabweichung der 3D Punktwolke an der Oberkante des Schienenkopfes. Mit einer Dimension, die sich jeweils im mittleren hundertstel Millimeterbereich bewegt, sind die Ergebnisse sehr gut. Die konkreten Werte für Schiene A und B stehen in der letzten Zeile von Tabelle 6.12.

Tabelle 6.12: Standardabweichungen von Achs- und Scanpunkten der Schienen A und B im Wagenkoordinatensystem.

	Schiene A [mm]		Schiene B [mm]	
	\varnothing	σ	\varnothing	σ
Alle Achspunkte	0,72	0,43	0,26	0,13
Achspunkte 1. Hin- und Rückfahrt	0,08	0,03	0,09	0,07
Achspunkte 2. Hin- und Rückfahrt	0,07	0,05	0,08	0,06
Achspunkte 3. Hin- und Rückfahrt	0,09	0,13	0,06	0,03
Scannpunkte an der Oberseite des Schienenkopfes	0,07	0,05	0,08	0,07

Zusammenfassung Die Punktwolke im Bereich des Schienenkopfes wurde in die drei Abschnitte linker, rechter und oberer Teil segmentiert. Es wurden Achsen und Schnittpunkte für die Ermittlung des Achspunktes berechnet. Aufgrund der Geometrie und des Zustands des Schienenprofils funktioniert der gewählte Auswertansatz anhand dieses Beispiels sehr zuverlässig. Falls die Praxis es erforderlich macht, kann durch Weiterentwicklung der Algorithmus auf andere Profile und Abnutzungszustände angepasst werden. Dass die Scanpunkte an der Oberseite des Schienenkopfes Mittelwerte und Standardabweichungen im mittleren hundertstel Millimeterbereich haben, dokumentiert die Stabilität des gesamten PVS-Fahrzeugs.

6.5.5 Zustandsgrößen nach der VDI 3576:2011-03

Nachdem in dem vorigen Abschnitt das PVS validiert wurde, folgt der Nachweis der Anwendungstauglichkeit, also die Eignung der Messwerte für den regelkonformen Nachweis des geometrischen Zustands einer Schienenanlage. Bei den z. B. in der VDI 3576 definierten Toleranzen für Kranbahnen geht es vor allem um die geometrische Lage der Schiene im Raum. Diese wird bei anderen Messungen regelmäßig aus einzelnen Messpunkten ermittelt, deren Bezugspunkt nicht immer eindeutig ist, der gemäß den geltenden Richtlinien, wie z. B. der VDI 3576 jedoch den Schienenachspunkten entsprechen soll. Darüber hinaus ermöglicht das PVS die Erfassung und Auswertung vieler weiterer Parameter einer Kranbahn, die in eine neue Version der VDI 3576 einfließen sollen.

Die in dem vorigen Unterabschnitt 6.5.4 ermittelten Schienenachspunkte der praktischen Schienenachse werden nun, z. .B. mit den aus dem UKF Filter ermittelten 6DoF Parametern, aus dem Wagenkoordinaten- in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert. Abbildung 6.19 stellt die Abweichungen aller jeweils sechs Fahrten in Lage (Abbildungen links) und Z-Wert (Abbildungen

rechts) zwischen praktischem Schienenachspunkt und Sollachsen für die Schienen A und B graphisch dar. Die Sollachsen sind parallel zueinander und liegen in einer Ebene. Bereits in dieser Darstellung ist ersichtlich, dass die Schienen in der Lage einen parallelen Verlauf haben. Den Darstellungen des Verlaufs im Z-Wert ist zu entnehmen, dass Schiene B ca. 15 mm höher liegt als Schiene A. Zum Ende hin steigt die Schiene B an.

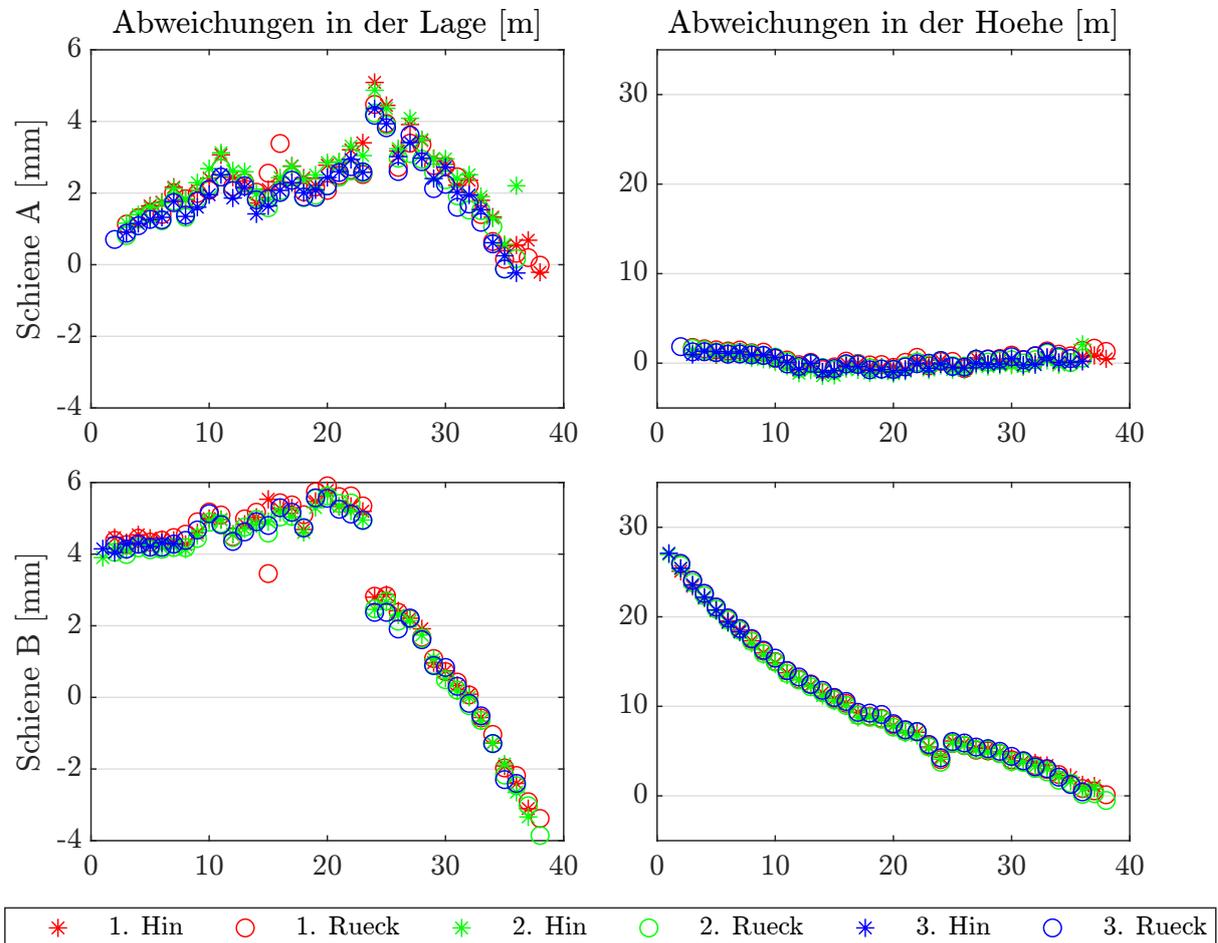


Abbildung 6.19: Dargestellt werden die Abweichungen aller jeweils sechs Fahrten in Lage (Abbildungen links) und Z-Wert (Abbildungen rechts) zwischen praktischem Schienenachspunkt und Sollachse für die Schienen A und B. Der Sprung bei Station 25 erklärt sich durch Schienenstöße bei Schiene A und B.

Um die Präzision des PVS für die einzelnen Achspunkte bewerten zu können, wurden die Standardabweichungen der jeweils sechs Achspunkte für jede fünfte Station berechnet und in Tabelle 6.13 dargestellt:

Tabelle 6.13: Präzision für die Lage exemplarisch für jede fünfte Station entlang der Schiene A.

Station [m]	5	10	15	20	25	30	35	38
σ [mm]	0,17	0,23	0,33	0,33	0,25	0,29	0,26	0,14

Ähnlich wie bereits im Abschnitt 6.3.1 sind die Standardabweichungen in diesem Fall ein Maß für die Präzision des Systems. Sie bestätigen die vorigen Ergebnisse und entsprechen den Anforderungen an das System von der Genauigkeit im Submillimeterbereich.

Durch die Verwendung der referenzierten Achspunkten ist nun eine Auswertung gemäß der

Richtlinie VDI 3576 möglich. In Abbildung 6.20 werden die Abweichungen von der Sollachse in der Lage für das Maß B im oberen und unteren drittel dargestellt. Überschreiten die Abweichungen das Toleranzmaß, dann ist der Wert in roter Schriftfarbe dargestellt. Das mittlere Drittel der Abbildung zeigt das Spurmaß S für jede Station sowie die Abweichung von der Sollachse und ggf. das konkrete Maß der Überschreitung an. Das Spurmaß ergibt sich aus den Abweichungen beider Sollachsen.

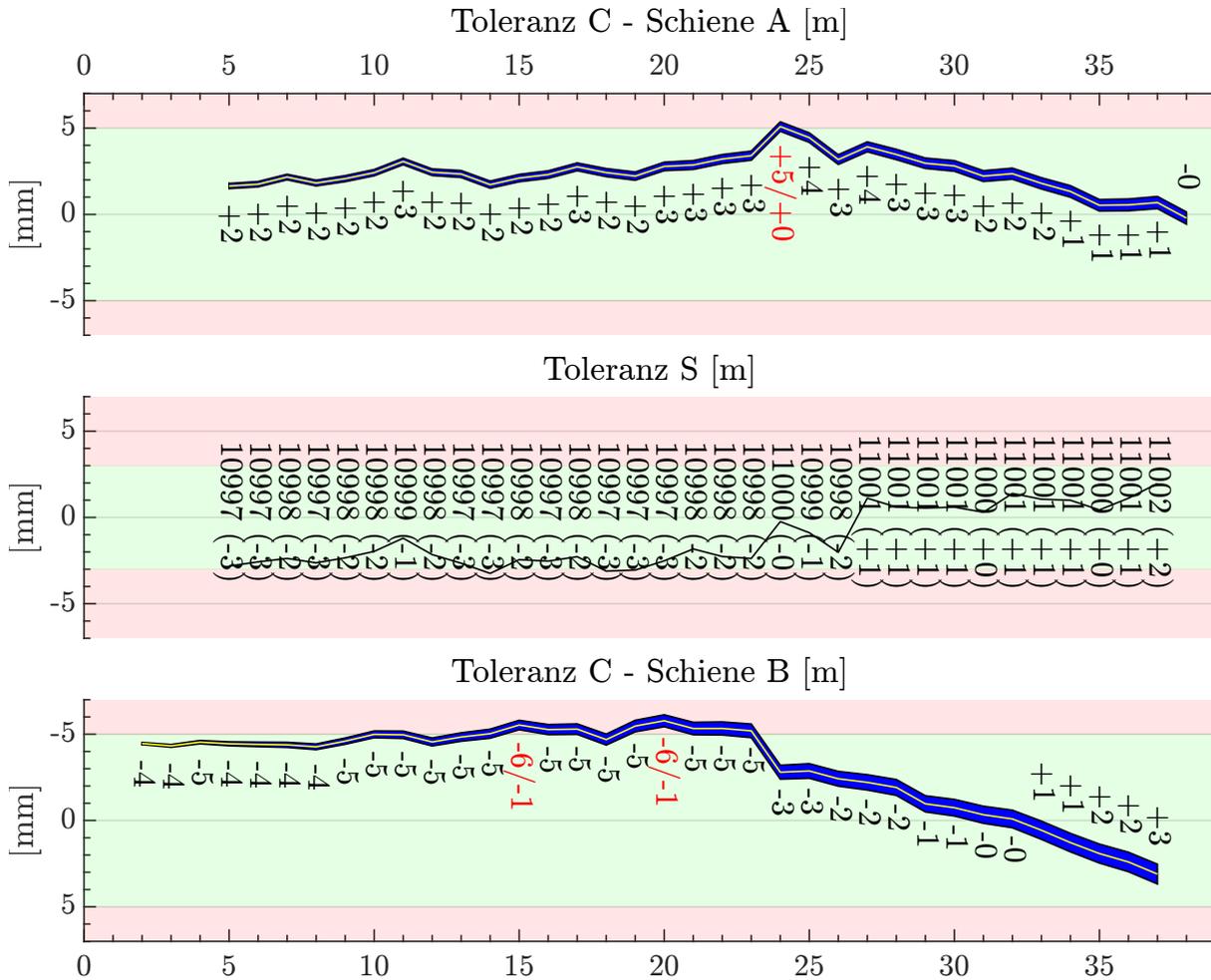


Abbildung 6.20: Die obere und untere Abbildung zeigen jeweils die Abweichungen des praktischen Schienenachspunktes von der Soll-Achse in der Lage. Außerdem wird blau der 200-fach überhöhte Unsicherheitsbereich Mitte CCR dargestellt, der in der Filterung errechnet wurde. Die mittlere Abbildung stellt die Abweichungen des Spurmittensmaßes von der Soll-Achse dar. Allen drei Abbildungen ist die Einhaltung der Toleranzen (grüner Bereich) oder deren Überschreitung (roter Bereich) zu entnehmen.

Auf einer Darstellung der Ergebnisse für die übrigen Zustandsgrößen gemäß der VDI 3576 wird an dieser Stelle verzichtet, da sie für die Erkenntnisse dieser Arbeit keinen Mehrwert bedeuten.

6.5.6 Kameraaufnahmen

Der Messwagen ist, wie in Unterkapitel 4.2 beschrieben und in Abbildung 4.9 zu sehen, mit zwei Kameras ausgestattet. Diese können in Verbindung mit den PLS so verschoben und gedreht werden, dass verschiedene Perspektiven auf das Profil und die nahe Umgebung möglich sind. Mit der durchgeführten Kalibrierung vor einer Messfahrt (Abschnitt 4.6.2) und der Referenzierung jedes Bildes durch den Filter ergeben sich vielfältige Möglichkeiten der Weiterverarbeitung sowie der Ableitung von Zustandsgrößen für Richtlinien wie der VDI 3576.

Abbildung 6.21 zeigt drei aufeinanderfolgende, beschnittene Aufnahmen der jeweils linken und

rechten Kamera. Die Aufnahmen wurden ROS Bags entnommen und manuell nachbearbeitet (Helligkeit, Kontrast). Sichtbar ist eine Bewegungsunschärfe, die zukünftig mit veränderter Beleuchtung und Verschlusszeiten oder Filtern korrigiert werden kann.

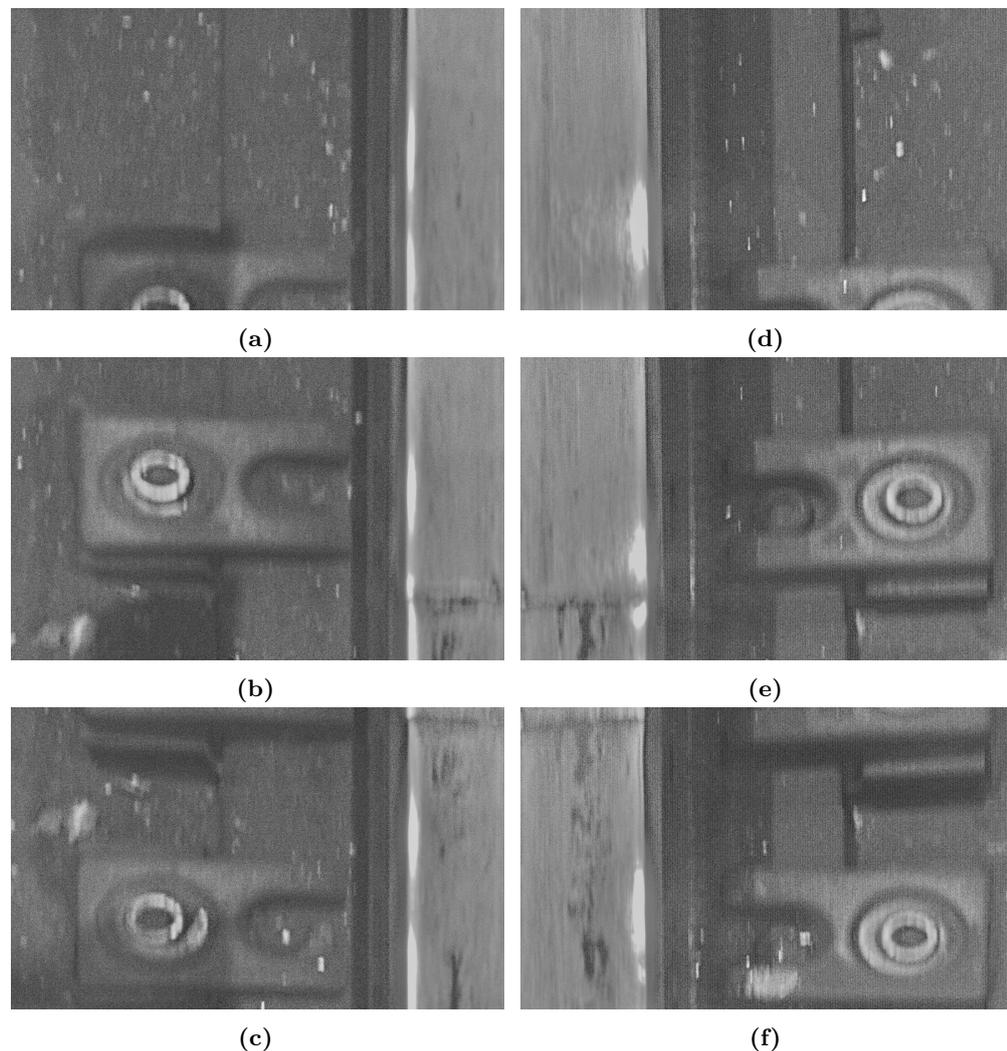


Abbildung 6.21: *Aufeinanderfolge Kamerabilder der linken und rechten Kamera. Für einen besseren Eindruck der Aufnahmesituation wurden die Bilder beschnitten.*

Für die sich überlappenden Bereiche, die als Stereoaufnahmen entstanden sind, können mit den Parametern der Kalibrierung Orthofotos berechnet sowie 3D Punktwolken abgeleitet werden. Bereits jetzt sind viele Informationen, wie Schiene, Verschleißbild, Schienenstoß, Schienenbefestigung, Verschmutzung, etc., aus den Bildern entnehmbar. Mit geeigneten Auswerteverfahren können Zustandsparameter automatisiert abgeleitet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein modular einsetzbarer Messwagen vorgestellt und untersucht, der als kinematische Multisensorplattform in Verbindung mit einem Lasertracker oder Tachymeter zur hochgenauen, geometrischen Erfassung von bis zu mehreren hundert Metern langen Profilen und deren Umfeld entwickelt wurde. Aus den Messdaten werden Zustandsgrößen abgeleitet, die in Normen oder Richtlinien definiert sind. Lange Profile können Rohre, Stahlträger, Schienen o. ä. sein, an die das Profilvermessungssystem ggf. adaptiert werden muss. Als konkreten Anwendungsfall wurde das Umfeld von Kranbahnen gewählt.

Für die Erfassung des unmittelbaren Umfelds werden zusätzliche Sensoren eingesetzt, die auf dem Messwagen montiert sind und das Profil sowie z. B. Befestigungen während der Messfahrt erfassen. Die 6DoF Parameter, also die 3D Position und die drei Rotationswinkel des Messsystems werden bestimmt, um im nächsten Schritt aus den Daten der georeferenzierten Sensoren die Informationen für die gewünschten Zustandsgrößen der Kranbahn ableiten zu können. Ein möglicher Ansatz wurde dafür beschrieben und an Beispielen untersucht: Die Filterung im Zustandsraum mit einem UKF in Verbindung mit einem URTSS, der die zur Verfügung stehende Sensorik nutzt, um die Kinematik des Messwagens zu beschreiben.

Aufgrund der Allgemeingültigkeit des Ansatzes können die Algorithmen auf andere Aufgabenstellungen übertragen werden.

Nach der Einführung der mathematischen Grundlagen wurden die möglichen Zustandsgrößen zur Dokumentation des Zustands von Kranbahnen definiert, die diejenigen der VDI 3576 zukünftig ergänzen sollen. Auf diesen Stand aufbauend wurden Sensoren ausgewählt, die für die Berechnung der Pose und die Bestimmung der Zustandsgrößen bestmöglich geeignet sind. In Verbindung mit den Anforderungen, die sich aus den verschiedenen Perspektiven der Anwendung ergeben, ist eine stabile Fahrzeugplattform entstanden, auf der alle Sensoren auf einer Vielzahl unterschiedlicher Profile transportiert werden können. Alle Sensoren (Laserscanner, Kameras, Inklinometer, Drehvorrichtung für das Prisma) sind zu einem funktionierenden Gesamtsystem integriert worden. Die Plattform ermöglicht einen modularen Einsatz:

1. Die bisher bekannte Verwendung, indem seine Position von einem Tachymeter oder Lasertracker erfasst wird.
2. Zusätzlich ausgerüstet mit PLS und Kameras.
3. Ohne georeferenzierenden Sensor auf dem Profil fahrend und die Umgebung mit den PLS und Kameras erfassend. Die Stationierung (1D) ergibt sich dabei aus den Daten der Odometer.

Es wurden die erzielbaren Unsicherheiten nach GUM untersucht, um sicherzustellen, dass mit der ausgewählten Sensorik die entsprechenden Zustandsgrößen im Submillimeterbereich bestimmt werden können und die Ergebnisse den Anforderungen der Richtlinien entsprechen. Im Vergleich zu den bisher bekannten Systemen spielt das PVS-Messsystem seine Stärke gerade dadurch aus, dass die praktische, also die der Realität entsprechende Profillachse bestimmt werden kann.

Das umgesetzte Synchronisierungskonzept wurde getestet und es ermöglicht, die Daten der Sensoren in den Auswertelgorithmen zu verarbeiten und verwendbare Zustandsgrößen abzuleiten. Durch die Zusammenführung der Daten mit Hilfe des ROS und der Speicherung in ROS Bags wird eine reproduzierbare Auswertung ermöglicht. Die anspruchsvolle Sensorik erfordert ein geeignetes Kalibrierkonzept, das die Einzelkomponenten zu einem Multisensorsystem zusammenführt.

7.2 Beurteilung

In zwei Messkampagnen wurde das PVS in mehrfacher Hinsicht erprobt. In der ersten Kampagne unter Laborbedingungen ging es vor allem darum, Erfahrungen mit den Funktionen des Fahrzeugs, die Sensorik, die Synchronisierung, die Kalibrierung und den Datenfluss zu sammeln. Eine Erkenntnis ist, dass der Wagen sehr zuverlässig funktioniert und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Eine weitere Erkenntnis mechanischer Art ist gewesen, dass das Fahrzeug in Abhängigkeit der Fahrtrichtung um wenige Zehntel Grad kippt. Für das mit PLS ausgestattete PVS ist das weniger relevant. Für Systeme, die diese Ausstattung nicht haben, ist jedoch zu überprüfen, ob dieses Verhalten dort auch auftritt. Das zweite aufgefallene, mechanisch bedingte Verhalten, ist die sich ändernde Zentrierung des Prismas, sobald die Position der Führungsrollen verändert wird. Das tritt sowohl bei aktiver Veränderung durch den Bediener, als auch bei sich ändernder Profildbreite während der Fahrt auf. Für das mit PLS ausgestattete PVS ist auch dieses Verhalten unkritisch.

Aus den PLS Daten konnten die Anzahl und Positionen von Schienenbefestigungen automatisiert erkannt werden. Da die Detektion unter Laborbedingungen mit geringer Verschmutzung stattfand, wird vermutet, dass der einfache Ansatz für den Praxiseinsatz erweitert werden muss.

In der zweiten Messkampagne konnte das PVS unter realen Bedingungen seine Praxistauglichkeit zeigen, real insofern, als dass das 40 m lange Gleis tatsächlich täglich genutzt wird. Außerdem stand es aus betrieblichen Gründen nur für einen begrenzten Zeitraum zur Verfügung, sodass auch die Vermessung nur in diesem Zeitfenster durchgeführt werden konnte. Da es sich um ein Gleis, also zwei Schienenstränge, handelt, war eine Auswertung nach Richtlinien wie der VDI 3576 geboten.

Durch mehrfache Befahrung jedes Schienenstrangs konnte die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse untersucht und nachgewiesen werden. Durch Referenzmessungen mit einer Leica T-Scan wurde die Genauigkeit des PVS validiert. Es stehen qualitative Aussagen zu dem System, bestehend aus Multisensorplattform und Auswertelgorithmen, zur Verfügung. Es wurde ein Konzept umgesetzt, das es ermöglicht mit einem Messsystem eine Schiene und deren unmittelbare Umgebung (z. B. Schienenbefestigungen, Schienenstöße) objektiv und reproduzierbar erfasst werden können. In mehreren Messfahrten wurde die Funktion und Eignung des PVS nachgewiesen.

7.3 Ausblick

Mit dem PVS wurde ein neuer Meilenstein in der Entwicklung der Kranbahnvermessung erreicht. Nachfolgend werden Verbesserungen für die Bereiche Auswertung, Mechanik und Sensorik aufgeführt.

Viele Möglichkeiten bieten sich in der Verarbeitung der referenzierten Daten. Mit der Nutzung der PLS Daten für die Detektion der Schienenbefestigung wurde ein erster Ansatz beschrieben. Dieser sollte weiter untersucht und für schwierige, z. B. verschmutzte Umgebungen, verbessert werden. Auch für die Suche nach weiteren Zustandsgrößen kann die referenzierte Punktwolke Verwendung finden. Ebenso bieten die Kameradaten viele Informationen, die nicht nur zu Dokumentationszwecken verwendet werden können. So können z. B. Risse, Position der Schienenstöße, etc. automatisiert abgeleitet werden. Ebenfalls ist es denkbar, die Kameradaten im Sinne der visuellen Odometrie für die Positionierung zu verarbeiten.

Die Mechanik des Wagens hat sich in den Einsätzen sehr gut bewährt. Wie bereits erwähnt, sollten die Zentrierstifte zur Fixierung des Kalibrierkörpers sowie die Halterung für die Scanner und Kameras durch eine Lösung ersetzt werden, die einerseits eine schnelle, andererseits eine reproduzierbare Befestigung sicherstellt. Weitere Anwendungsfelder für das PVS, in denen langgezogene Profile verbaut oder produziert werden, sollten untersucht und mögliche Adaptionen der Mechanik betrachtet werden.

Die eingesetzte Sensorik ist für die Positionierung und auf die Erfassung des unmittelbaren Umfelds ausgelegt. Informationen über die Einhaltung von Lichtraumprofilen ist für die DGUV von Interesse. Aufgrund von baulichen Veränderungen stimmen vorhandene Unterlagen bekanntermaßen nicht immer mit dem Ist-Zustand von Gebäuden überein. Eine Erweiterung des PVS durch z. B. LiDAR

Sensoren würde Möglichkeiten eröffnen, das weitere Umfeld zu erfassen und die Dokumentation dadurch zu erweitern.

Das ursprüngliche Konzept hat vorgesehen, eine Low-Cost IMU zu verwenden, deren Messdaten als Ergänzung zu denen der übrigen Sensoren zu sehen ist. Zur Qualitätsverbesserung kann die IMU durch Hardware mit einem Triggereingang ausgetauscht werden. Insbesondere bei Verwendung des PVS ohne Lasertracker könnte sich diese Investition in der Qualität der Trajektorie wirken.

A Ergänzendes Material

A.1 Soll-Ist Vergleich von dem 3D CAD Modell des Kalibrierkörpers und dem mit der Leica T-Scan gescannten 3D Druck

Durch heuristisches Testen wurde eine Anordnung und Anzahl von Flächen gefunden, die bei Sichtbarkeit von mindestens drei Flächen eine Kalibrierung der Laserscanner in beliebiger Ausrichtung und Position auf der Befestigungsschiene ermöglicht. Im Anschluss wurde ein 3D Druck des Körpers erstellt, der nach Fertigstellung zur Qualitätssicherung mit einer Leica T-Scan gescannt wurde. In der Software GOM Inspect der Firma GOM GmbH, Braunschweig, wurde anschließend ein Soll-Ist Vergleich gemacht. Das Ergebnis ist in Abbildung A.1 zu sehen. Einerseits ist das Ergebnis des Drucks in Bereichen des Körpers mit Abweichungen von 0,08 mm eindrucksvoll, andererseits sind in anderen Bereichen die Abweichungen von 0,38 mm nicht akzeptabel. Folgerichtig wurden die Ebenenparameter aus der gescannten 3D Punktwolke abgeleitet und für den Kalibrierungsprozess verwendet. Für die Kalibrierung kommen somit die Parameter der realen Ebenen des Kalibrierkörpers zur Anwendung und nicht die aus der Simulation.

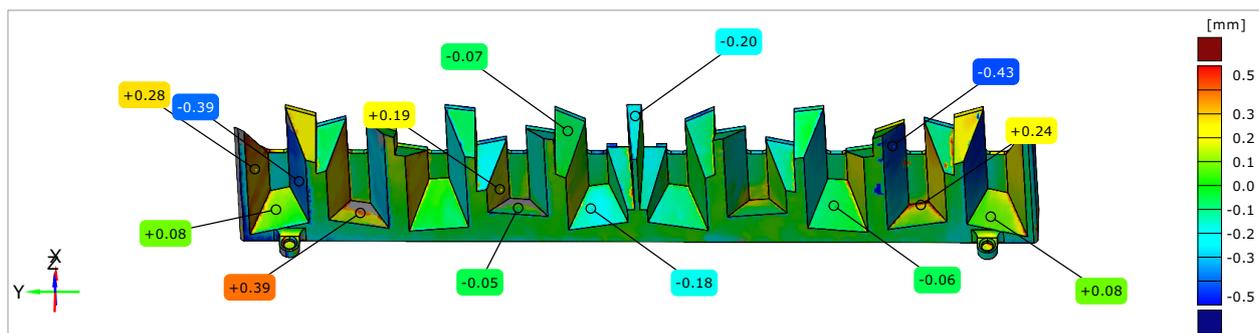


Abbildung A.1: Ergebnis des Soll-Ist Vergleichs mit GOM Inspect V 7.5 SR2. Die Werte sind in mm angegeben.

A.2 Abtastrate der Sensoren

Abbildung A.2 zeigt für jeden Sensor in einem eigenen Histogramm die Abtastrate und die Standardabweichung der jeweiligen Sensoren von ihren Mittelwerten. Es ist gut zu erkennen, dass die getriggerten Sensoren eine deutlich niedrigere Standardabweichung haben als die Sensoren, deren Messwerte einen Zeitstempel erhalten sobald auf der zentrale Recheneinheit abgespeichert werden.

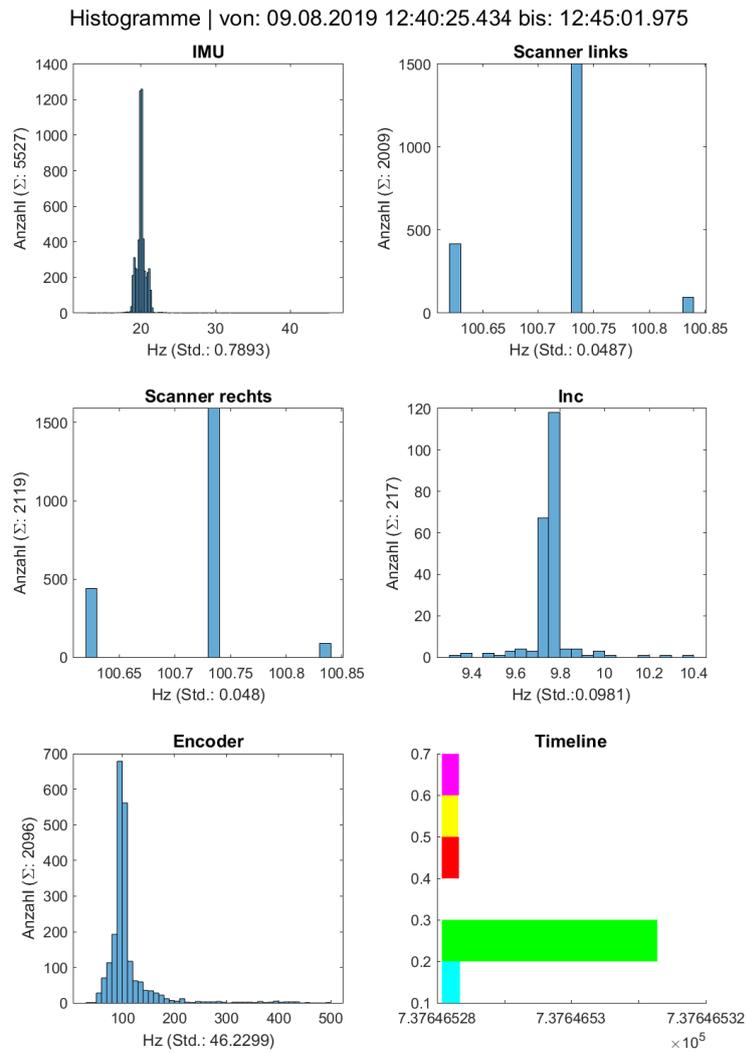


Abbildung A.2: Abtastrate der Sensoren. Dargestellt in Histogrammen.

A.3 Ablaufschema für eine Messung mit dem kinematischen Profilvermessungssystem Messsystem

Die Messungen während der Messkampagnen I und II erfolgten mit dem PVS gemäß dem folgenden geplanten Ablaufschema:

1. Messung

- Alle Driftnester in zwei Lagen messen
- Abstand der Wagen-Führungsrollen in Längsrichtung bestimmen
- Kalibrierkörper anbringen und mit den Profilsclannern messen
- Kalibrierung der Kameras mit der Kalibriertafel
- 3 x 2-Lagen Messung des Inklinometers. Der Wagen muss dafür vollflächig aufliegen.
- Zeit-Synchronisierung von Lasertracker und Wagen
- Tracken des Wagens auf der Hinfahrt in Lage I
- Messkampagne I: Tracken des Wagens auf der Rückfahrt in Lage I
- Messkampagne II: Tracken des Wagens auf der Rückfahrt in Lage II
- Kalibrierkörper messen
- Zeit-Synchronisierung von Lasertracker und Wagen

2. Messung

- Zur Standortkontrolle vier Nester in zwei Lagen messen
- Tracken des Wagens auf der Hinfahrt in Lage I
- Messkampagne I: Tracken des Wagens auf der Rückfahrt in Lage I
- Messkampagne II: Tracken des Wagens auf der Rückfahrt in Lage II
- Kalibrierkörper anbringen und mit den Profilsclannern messen
- Zeit-Synchronisierung von Lasertracker und Wagen

3. Messung

- Zur Standortkontrolle vier Nester in zwei Lagen messen
- Tracken des Wagens auf der Hinfahrt in Lage I
- Messkampagne I: Tracken des Wagens auf der Rückfahrt in Lage I
- Messkampagne II: Tracken des Wagens auf der Rückfahrt in Lage II
- Kalibrierkörper anbringen und mit den Profilsclannern messen
- Zeit-Synchronisierung von Lasertracker und Wagen
- Abschließend alle Driftnester in zwei Lagen messen.

A.4 Ergebnisse der Filterung aller Sensordaten. Messkampagne I, 1. Messfahrt (Labor)

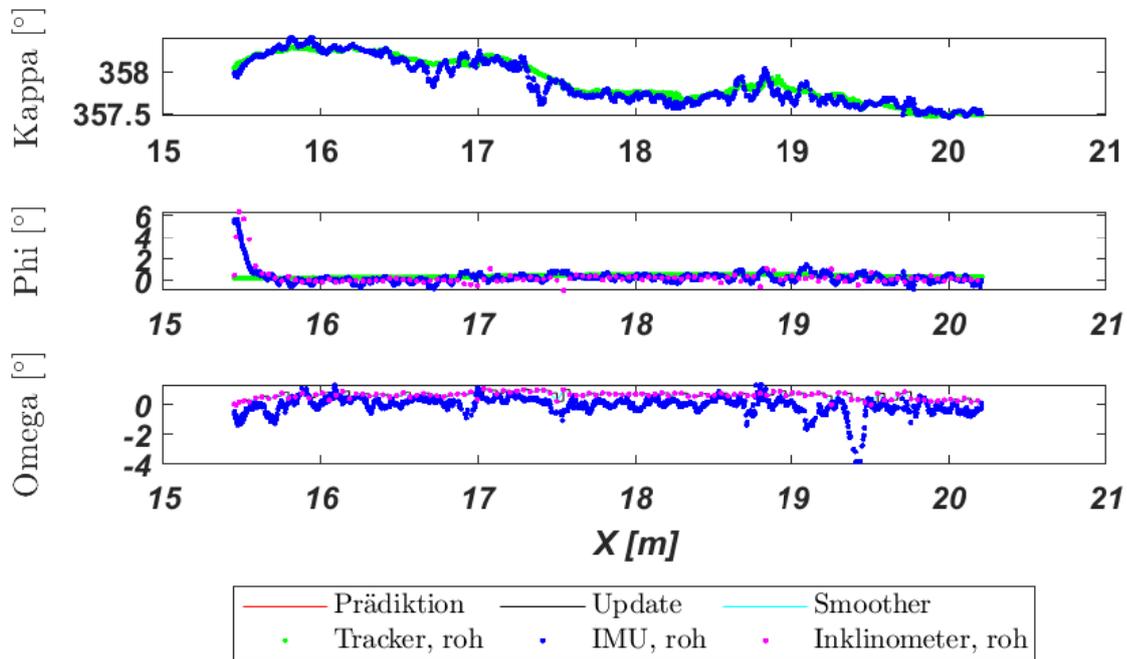


Abbildung A.3: Eulerwinkel.

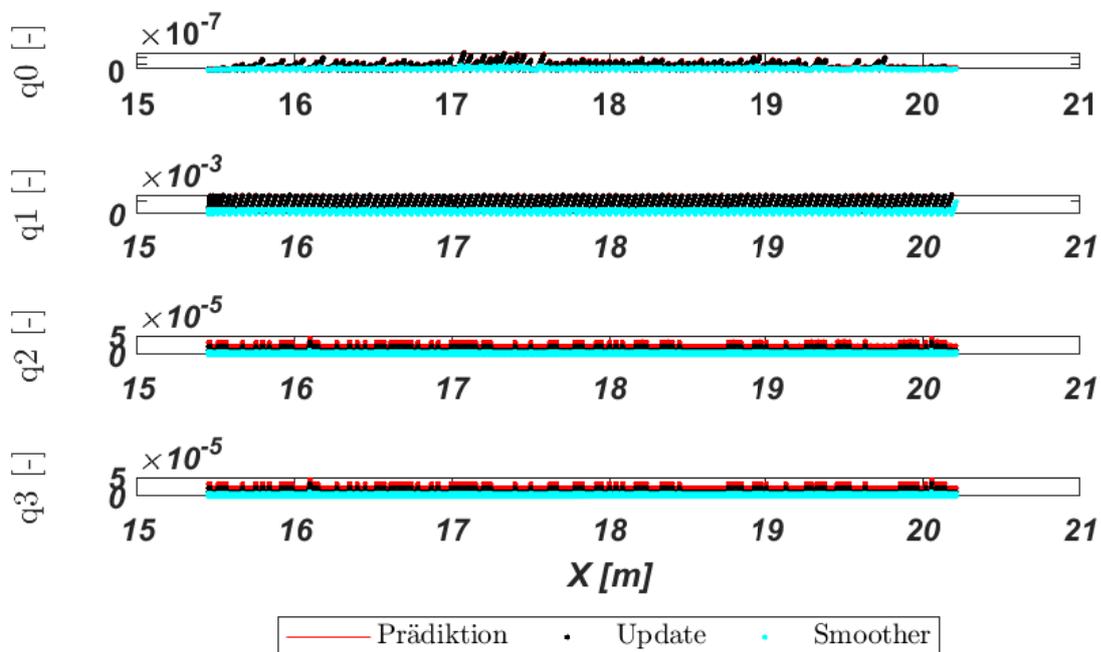


Abbildung A.4: Kovarianzen der Komponenten der Quaternionen.

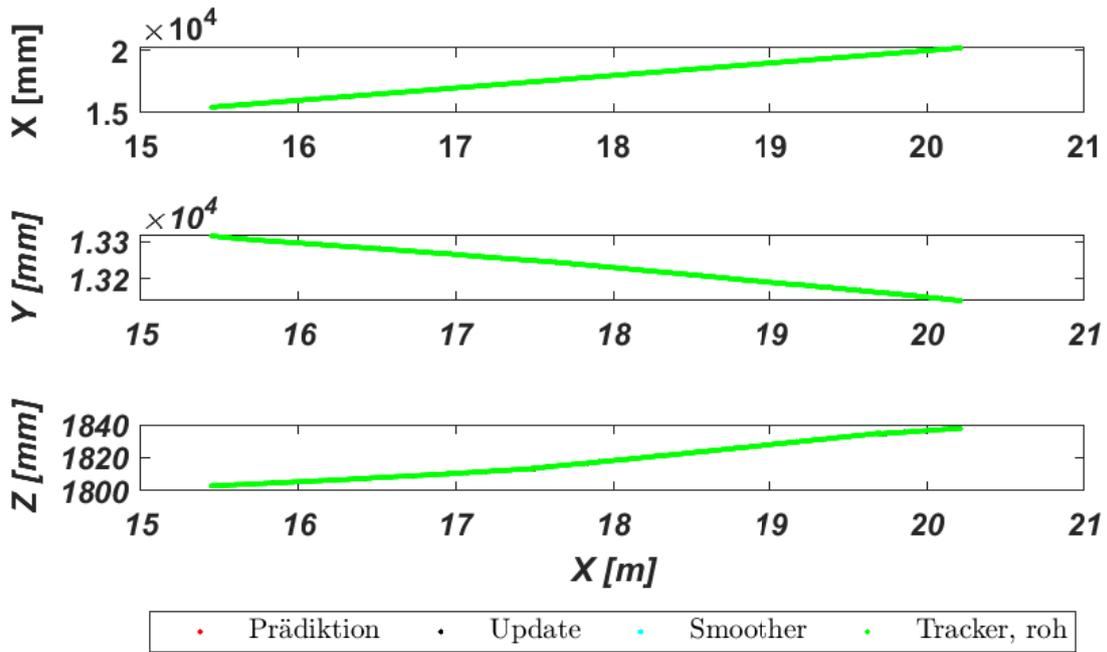


Abbildung A.5: Positionen.

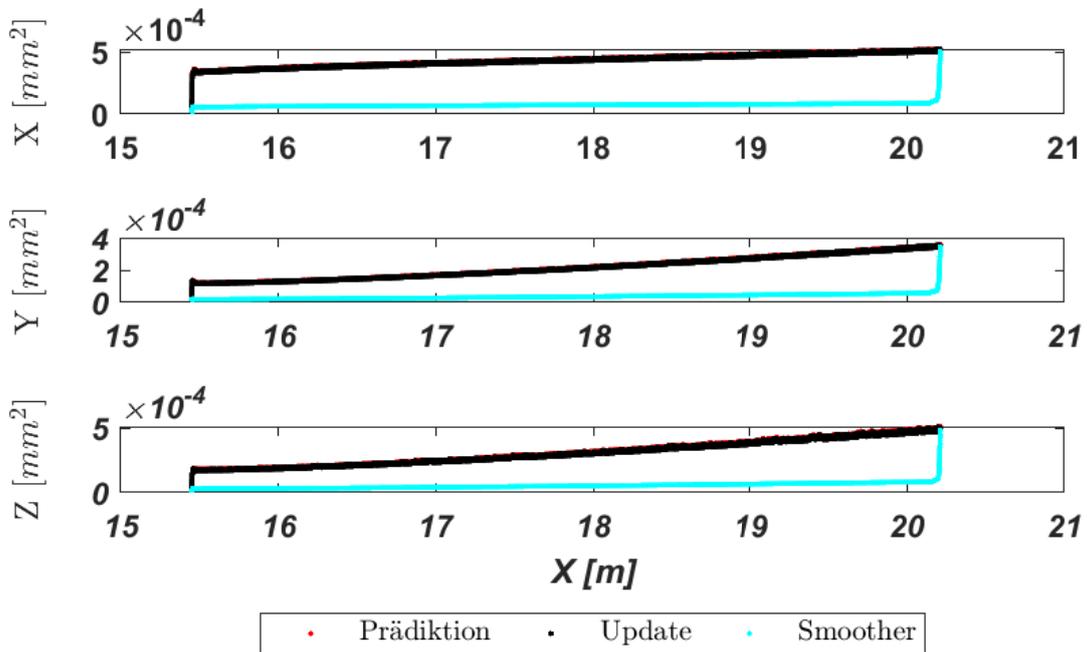


Abbildung A.6: Kovarianzen der Positionen.

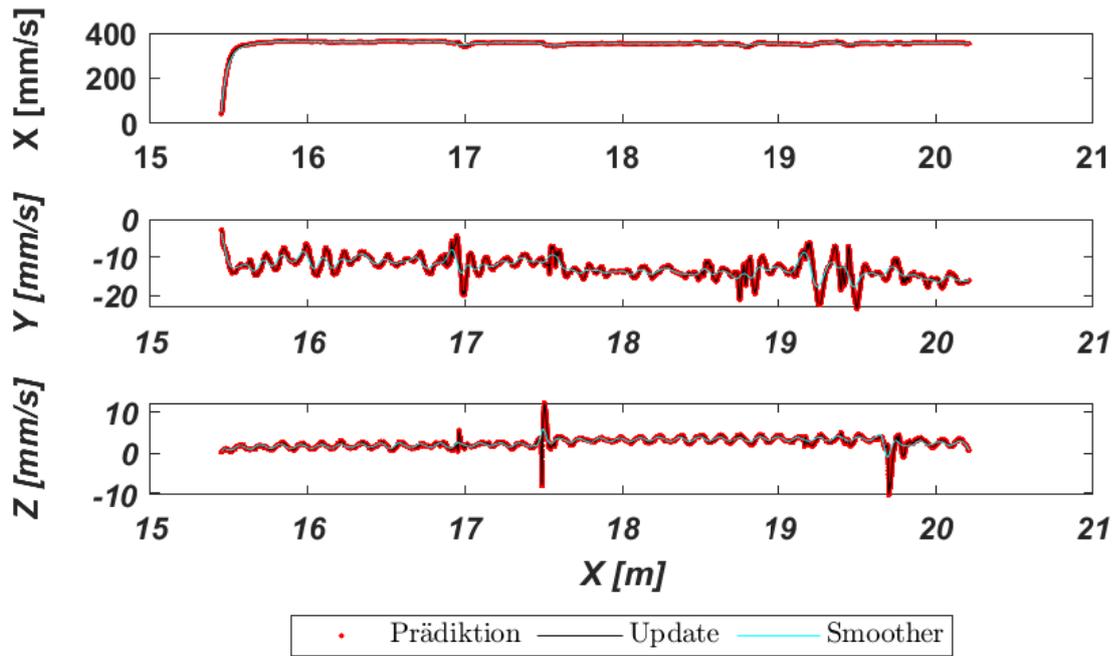


Abbildung A.7: Geschwindigkeiten.

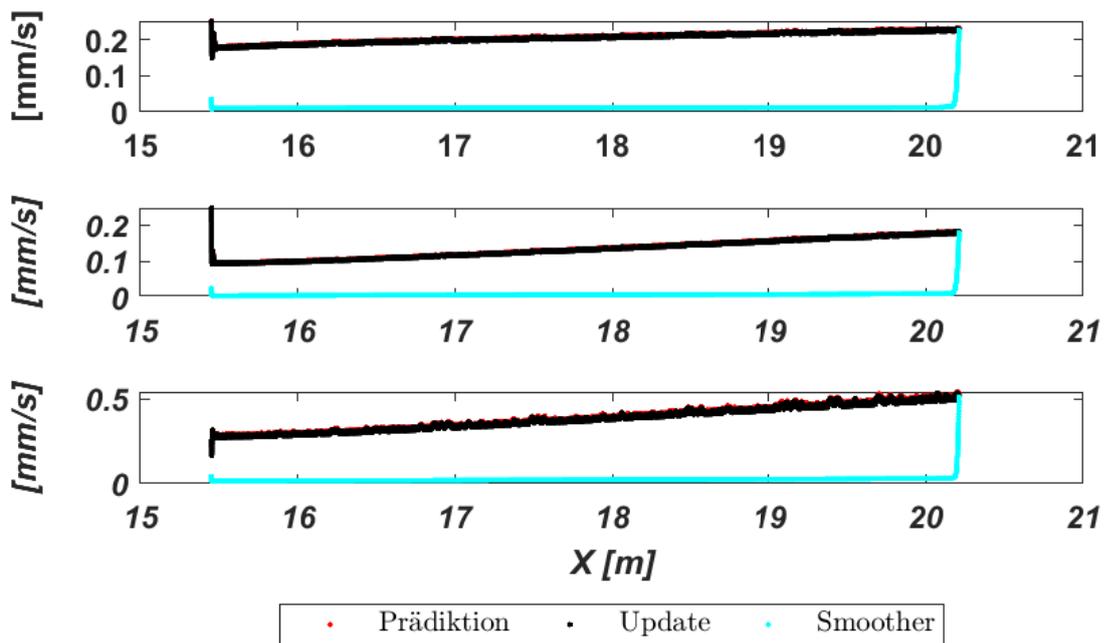


Abbildung A.8: Kovarianzen der Geschwindigkeiten.

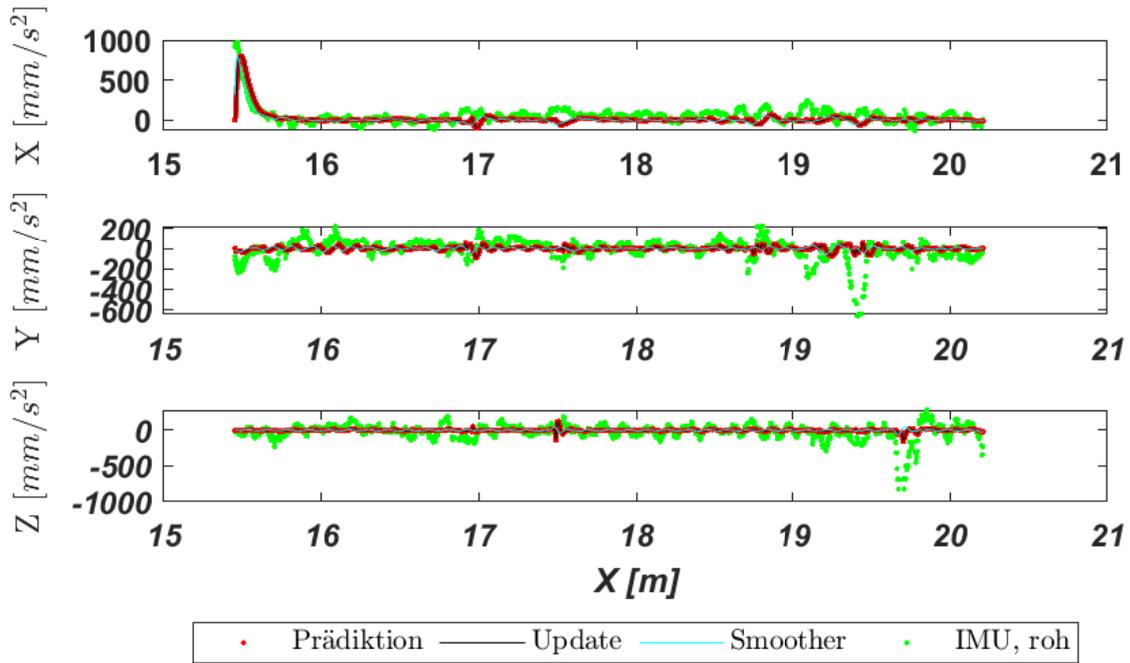


Abbildung A.9: Beschleunigungen.

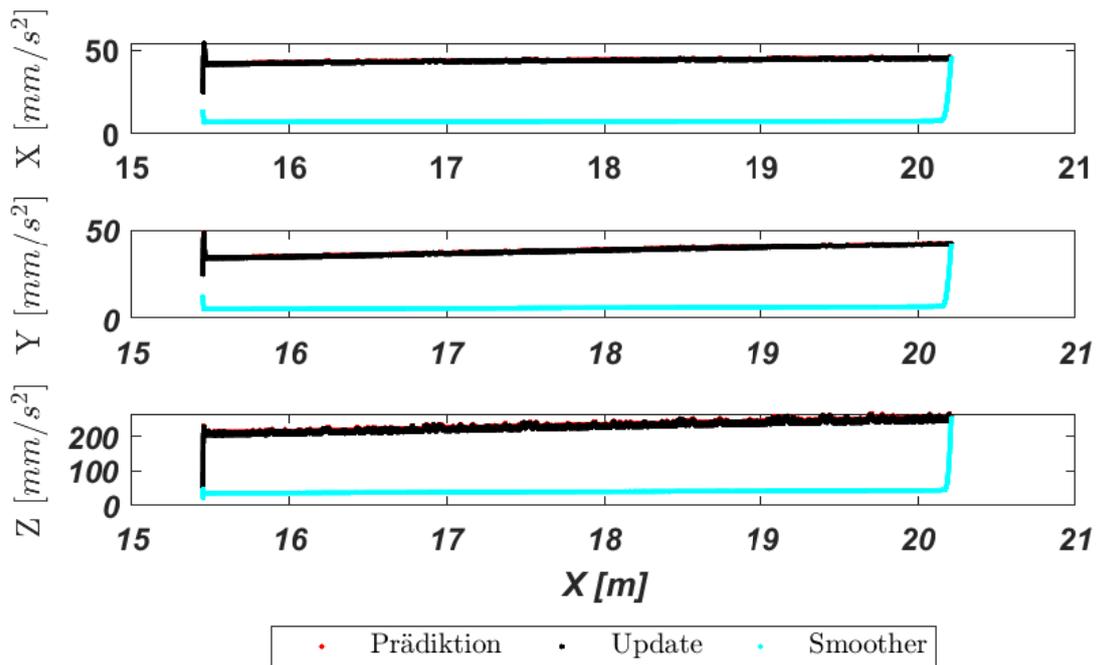


Abbildung A.10: Kovarianzen der Beschleunigungen.

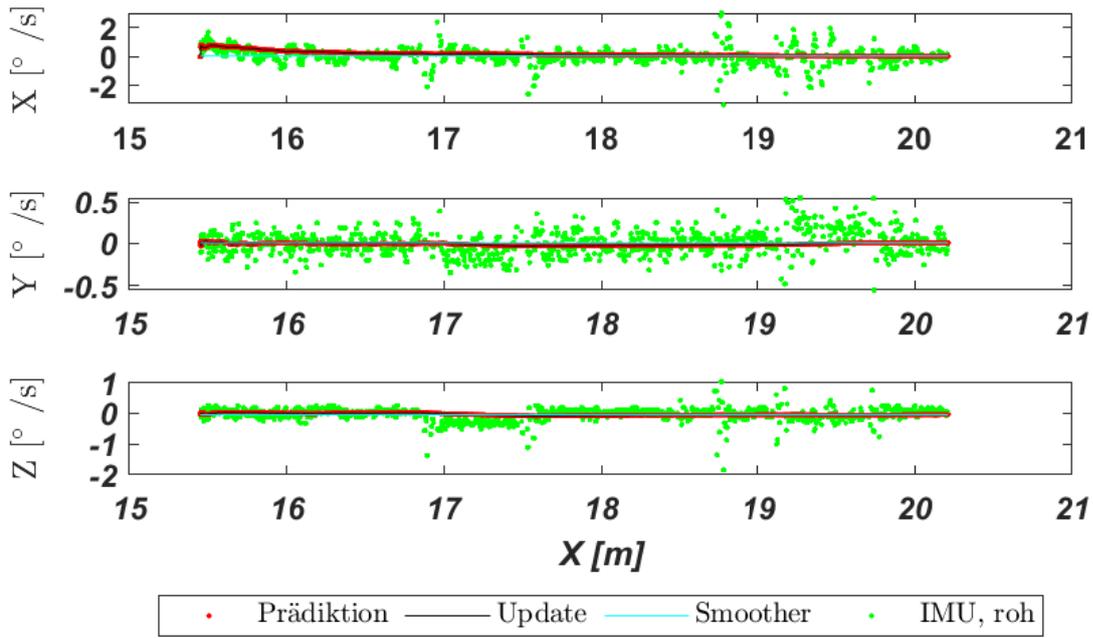


Abbildung A.11: Drehraten.

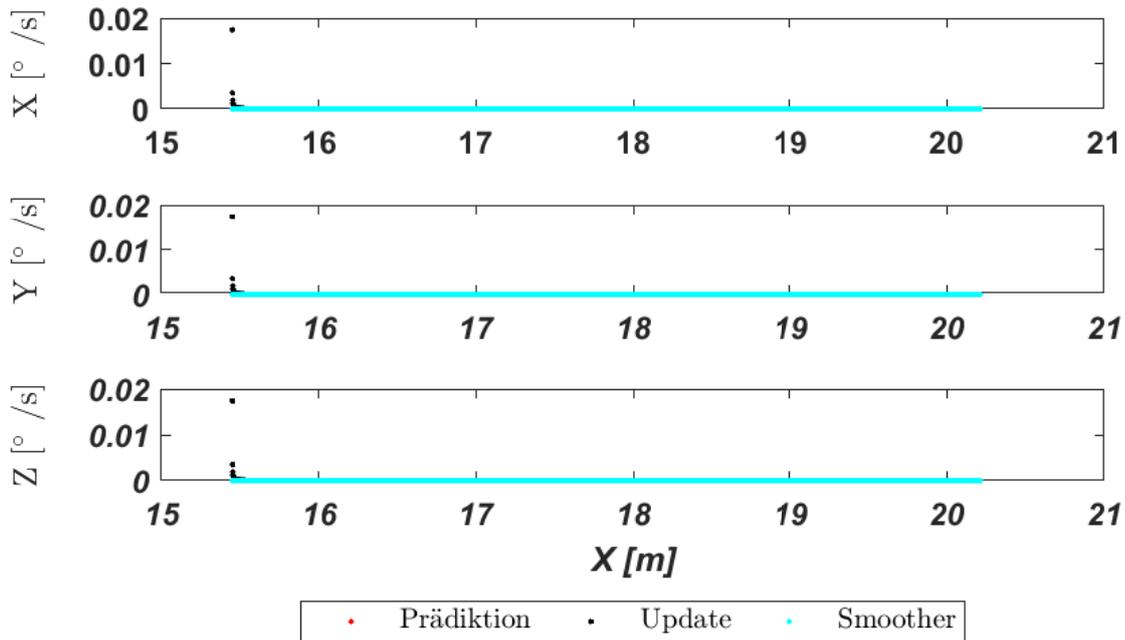


Abbildung A.12: Kovarianzen der Drehraten.

A.5 Innovationen nach Sensor getrennt. Messkampagne I, 1. Messfahrt (Labor)

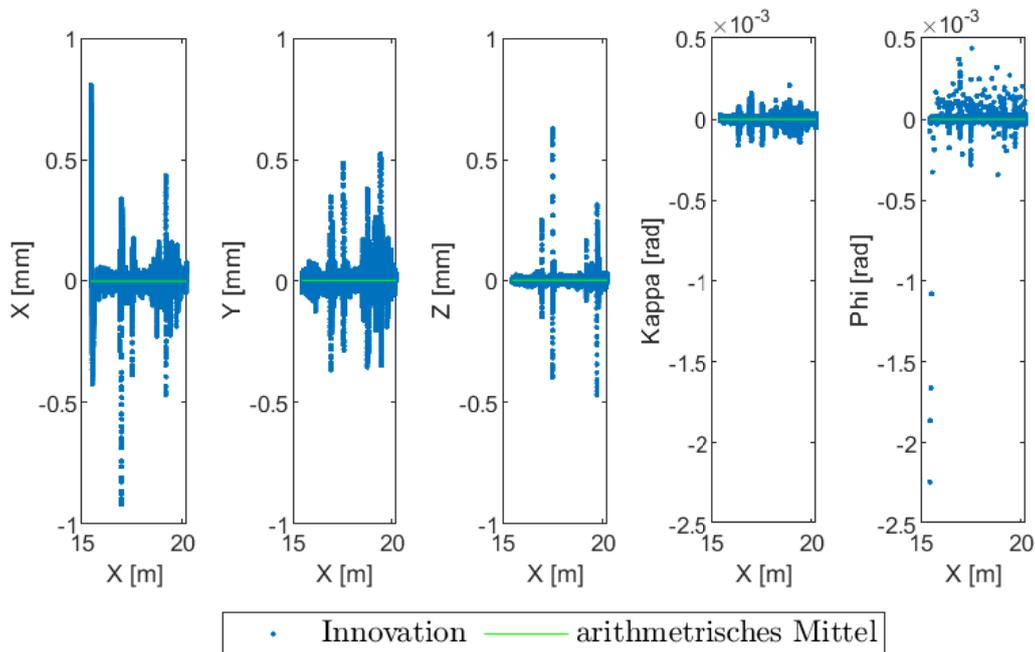


Abbildung A.13: Innovationen für die gemessenen und abgeleiteten Größen des Lasertrackers.

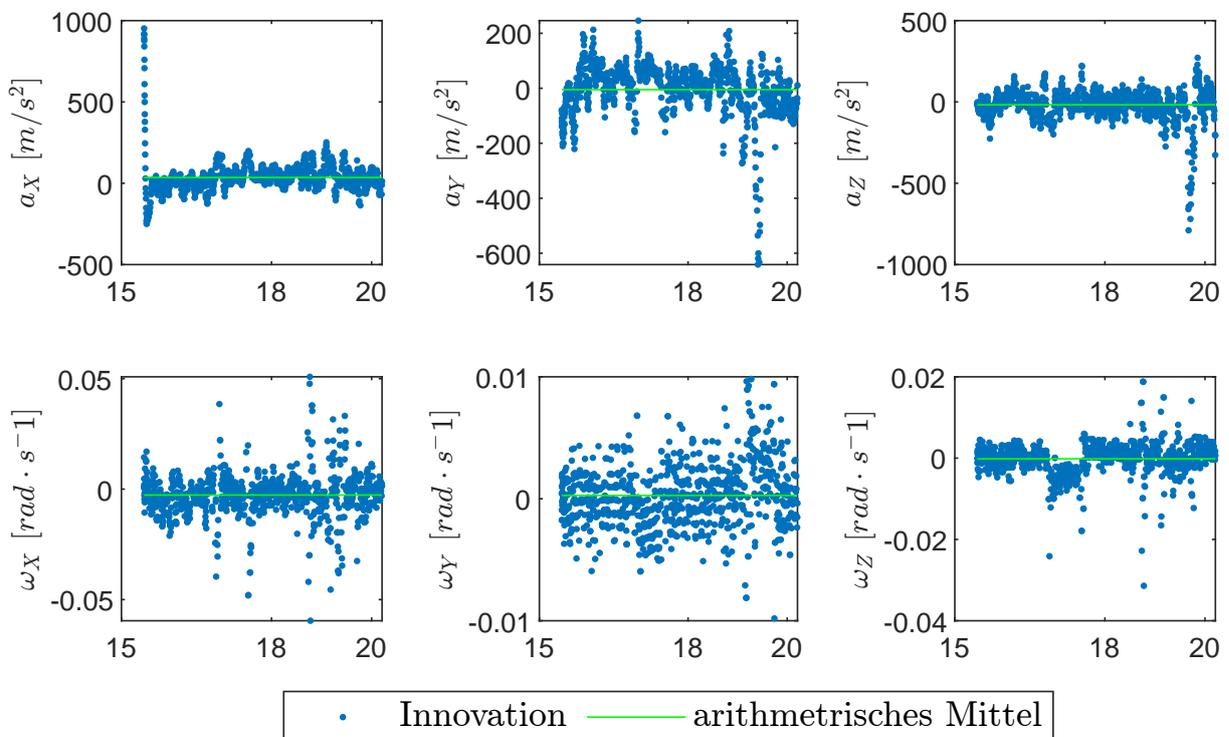


Abbildung A.14: Innovationen für die gemessenen Größen der inertialen Messeinheit.

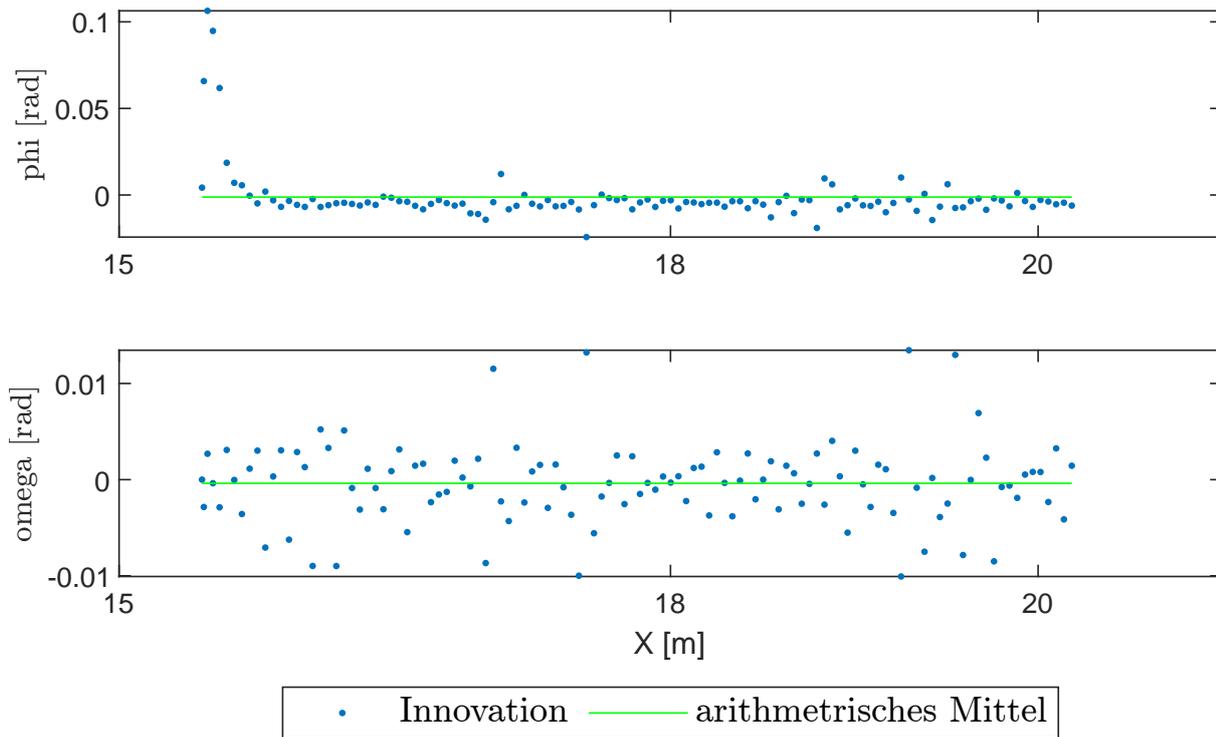


Abbildung A.15: Innovationen für die gemessenen Größen des Inclinometers.

Literaturverzeichnis

- ABUS Kransysteme GmbH (2017a). *Deckenlaufkran*. URL: <https://www.abus-kransysteme.de/krane/laufkrane/deckenlaufkrane> (besucht am 16.03.2017).
- (2017b). *Wandlaufkrane*. URL: <https://www.abus-kransysteme.de/krane-hebezeuge/laufkrane/wandlaufkrane> (besucht am 15.03.2017).
- (2017c). *Zweiträgerlaufkrane*. URL: <https://www.abus-kransysteme.de/krane-hebezeuge/laufkrane/zweitraegerlaufkrane> (besucht am 16.03.2017).
- Aggarwal, Priyanka; Syed, Zainab F.; Niu, X. und El-Sheimy, Naser (2008). „A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units“. In: *The Journal of Navigation* 61.2, S. 323–336. ISSN: 0373-4633. URL: <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/E74EOCE76FB3B267F2E5115E4E3603EE/S0373463307004560a.pdf/div-class-title-a-standard-testing-and-calibration-procedure-for-low-cost-mems-inertial-sensors-and-units-div.pdf> (besucht am 31.10.2017).
- Apel, Peter (1983). „Automatisches Kranbahnschienen-Meßsystem“. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie* 71.3, S. 146–148.
- Arent, Philipp; Bretscher, Raphael und Schlüter, Martin (2015). „Netzmessungen mit dem Leica Absolute Tracker AT402 zur Bestimmung geodätischer Prüfstrecken“. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* 11-12, S. 334–341.
- Artese, Giuseppe und Trecroci, Athos (2008). „Calibration of a low cost MEMS INS sensor for an integrated navigation system“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Part B5.Vol. XXXVII, S. 877–882.
- Auer, Florian (2014). „Berührungslos arbeitende Gleismessfahrzeuge und Auswertung der Messdaten“. In: *EIK - Eisenbahningenieurkalender*, S. 53–66.
- Baarda, Willem (1967). *Statistical concepts in geodesy*. Bd. N.S. 2,4. Publications on geodesy. Delft. ISBN: 90-6132-208-1.
- Bar-Shalom, Yaakov; Li, Xiao-Rung und Kirubarajan, Thiagalingam (2001). *Estimation, tracking and navigation: Theory, algorithms and software*. Electronic and electrical engineering. New York und Chichester: Wiley. ISBN: 0-471-41655-X.
- Bargstädt, Hans-Joachim und Steinmetzger, Rolf (2008). *Grundlagen des Baubetriebswesens: Skriptum zur Vorlesung*. URL: <http://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/1365> (besucht am 17.12.2016).
- BGHM (2022). *Krane und Hebezeuge*. URL: <https://www.bghm.de/arbeitschuetzer/bibliothek/krane-und-hebezeuge/> (besucht am 02.09.2022).
- BHB Vermessung Dresden (2017). *Abgeschlossene Projekte | BHB Vermessung Dresden*. URL: <http://www.bhb-vermessung.de/Vermessung-Dresden-Projekte/Abgeschlossene-Vermessungs-Projekte/Kranbahn-Thyssen-Krupp.html> (besucht am 20.05.2017).
- Blanco, Jose-Luis (2010). „A tutorial on SE (3) transformation parameterizations and on-manifold optimization“. Technical Report. University of Malaga.
- Boor, Carl de (1972). „On calculating with B-splines“. In: *Journal of Approximation Theory* 6.1, S. 50–62. ISSN: 00219045.
- Bosch, Hrsg. (2016). *BNO055: Intelligent 9-axis absolute orientation sensor*.
- Brieden, Phillip (2007). „Semiautomatisierte Geometrieüberwachung von Kranbahnschienen behandelt am Beispiel des Containerterminals Burchardkai (Hamburg)“. Studienarbeit. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

- Brinkmann, Burghart (2012). *Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*. 4. Aufl. Beuth Wissen. Berlin: Beuth Verlag GmbH. ISBN: 978-3-410-22472-3.
- Bundesregierung (2015). *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln: Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV*. URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/betr_sich_v_2015/gesamt.pdf (besucht am 13.02.2017).
- Bureick, Johannes; Neuner, Hans-Berndt; Harmening, Corinna und Neumann, Ingo (2016). „Curve and Surface Approximation of 3D Point Clouds“. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* 123.11-12, S. 315–327.
- Cabrera, Antonio (2009). „Gleisgeometriemessung in New York City“. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 12, S. 712–715.
- Caspary, Wilhelm und Wichmann, Klaus (2007). *Auswertung von Messdaten: Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften*. München: Oldenbourg. ISBN: 978-3-486-58351-9.
- Chambers, Andrew; Scherer, Sebastian; Yoder, Luke; Jain, Sezal; Nuske, Stephen und Singh, Sanjiv (2014). „Robust multi-sensor fusion for micro aerial vehicle navigation in GPS-degraded/denied environments“. In: *American Control Conference (ACC), 2014*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1892–1899. ISBN: 978-1-4799-3274-0.
- Costantino, D.; Pepe, M.; Alfio, V. und Carrieri, M. (2019). „Gomatic Techniques for Monitoring and Verifying of the Wear Condition of the Runways of the Bridge Cranes“. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W18*, S. 23–30.
- Cox, M. G. (1972). „The Numerical Evaluation of B-Splines“. In: *IMA Journal of Applied Mathematics* 10.2, S. 134–149. ISSN: 0272-4960.
- Cyrklaff, G. (1981). „Zur Anwendung des Laserfluchtungsgerätes LFG 1 bei Kontrollmessungen an Portalkranbahnen“. In: *Vermessungstechnik* 29.11, S. 379–381.
- Czajka, Piotr; Garbacz, Piotr; Giesko, Tomasz; Mazurkiewicz, Adam; Mezyk, Jordan und Mizak, Wojciech (2018). „Inspection of Crane Rails with Use of Monorail Mobile Platform“. In: *Automation 2018*. Hrsg. von Szewczyk, Roman; Zieliński, Cezary und Kaliczyńska, Małgorzata. [S.l.]: SPRINGER INTERNATIONAL PU, S. 655–664. ISBN: 978-3-319-77178-6.
- Dennig, Dirk; Bureick, Johannes und Neumann, Ingo (2017). „Hochpräzise 3D Vermessung von (Kranschienen-)profilen und Befestigungen“. In: *25. Internationale Kranfachtagung Magdeburg*. Hrsg. von Katterfeld, André; Richter, Klaus; Krause, Friedrich; Pfeiffer, Dagmar und Gerecke, Arnhold. Logisch GmbH, S. 157–171. ISBN: 978-3-930385-98-0.
- Dennig, Dirk und Neumann, Ingo (2008). „Präziser Soll-Ist-Vergleich: Kranbahnvermessungssystem „Railcontrol““. In: *Hebezeuge Fördermittel, Huss Medien GmbH* 48.3, S. 120–121.
- Deutsche Bahn AG, Hrsg. (2017). *DUSS-Terminal Göttingen | Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße mbH*. URL: http://www1.deutschebahn.com/ecm2-duss/start/terminals_uebersicht/1631798/terminal_goettingen.html?start=0 (besucht am 16.03.2017).
- DGUV Grundsatz 309-001 (2012). *Prüfung von Kranen*. URL: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/g-905.pdf> (besucht am 13.02.2017).
- DGUV Vorschrift 52 (2001). *Unfallverhütungsvorschrift Krane mit Durchführungsanweisungen*. URL: <https://www.bg-verkehr.de/medien/medienkatalog/unfallverhuetungsvorschriften/d6-krane> (besucht am 14.02.2017).
- DGUV Vorschrift 53 (2001). *Unfallverhütungsvorschrift Krane mit Durchführungsanweisungen*. URL: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/vorschrift53.pdf> (besucht am 14.02.2017).
- Dichelle, Jana (2010). *Am Puls der Zeit. Von den Anfängen der Jenaer Lasergeschichte bis heute*. URL: http://www.dichelle.com/files/focus_1-2010-beilage_laser.pdf (besucht am 15.05.2017).
- DIN 15001-1 (1973-11). *Krane; Begriffe, Einteilung nach der Bauart*.

- DIN 18709-4 (2010-09). *Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen in der Geodäsie - Teil 4: Ausgleichsrechnung und Statistik.*
- DIN 18710-1 (2010). *Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.*
- DIN 4132 (1981-02). *Kranbahnen; Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung.*
- DIN 536-1 (1991-09). *Kranschienen - Maße, statische Werte, Stahlsorten für Kranschienen mit Fußflansch Form A.*
- DIN 536-2 (1974-12). *Kranschienen - Form F (flach) - Maße, statische Werte, Stahlsorten.*
- DIN 5902 (1995-11). *Laschen für rillenlose Breitfußschienen - Maße und Stahlsorten.*
- DIN 874-1 (2003-11). *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Lineale - Teil 1: Flachlineale aus Stahl; Maße, Technische Lieferbedingungen.*
- DIN EN 10034 (1994-03). *I- und H-Profile aus Baustahl; Grenzabmaße und Formtoleranzen.*
- DIN EN 10058 (2004-02). *Warmgewalzte Flachstäbe aus Stahl für allgemeine Verwendung - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße.*
- DIN EN 13674-1 (2011-04). *Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen - Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m.*
- DIN EN 13674-4 (2010-04). *Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen - Teil 4: Vignolschienen mit einer längenbezogenen Masse zwischen 27 kg/m und unter 46 kg/m;*
- DIN EN 14730-2 (2006-10). *Bahnanwendungen – Oberbau – Aluminothermisches Schweißen von Schienen – Teil 2: Qualifizierung aluminothermischer Schweißer, Zertifizierung von Betrieben und Abnahme von Schweißungen; Deutsche Fassung EN 14730-2:2006.*
- DIN EN 15011 (2014-09). *Krane - Brücken- und Portalkrane.*
- DIN EN ISO 13857 (2008). *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen.*
- DIN ISO 3534-1 (2009-10). *Statistik - Begriffe und Formelzeichen - Teil 1: Wahrscheinlichkeit und allgemeine statistische Begriffe.*
- DIY Drones, Hrsg. (2013). *Accelerometer sensor gravity compensation.* URL: <https://diydrone.com/forum/topics/accelerometer-sensor-gravity-compensation> (besucht am 27.09.2019).
- Drake, J. (1957). „Erfahrungen bei der Aufnahme von Kranbahnen in Werkhallen“. In: *Vermessungstechnik* 5.3, S. 61–64.
- (1965). „Genauigkeit von Kranbahnmontagen“. In: *Vermessungstechnik* 13.7, S. 261–263.
- Dupuis, Jan und Kuhlmann, Heiner (2014). „High-Precision Surface Inspection: Uncertainty Evaluation within an Accuracy Range of 15 μm with Triangulation-based Laser Line Scanners“. In: *Journal of Applied Geodesy* 8.2. ISSN: 1862-9024.
- Dürkop, Lars (2016). *Automatische Konfiguration von Echtzeit-Ethernet.* Bd. Band 5. Technologien für die intelligente Automation. ISBN: 9783662541258.
- EBO (1967). *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO).* URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/ebo/index.html> (besucht am 09.07.2017).
- Eckey, Hans-Friedrich; Kosfeld, Reinhold und Dreger, Christian (2002). *Statistik: Grundlagen - Methoden - Beispiele.* 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag und Imprint. ISBN: 978-3-663-11496-3.
- Edel, Karl-Otto, Hrsg. (2000). *Internationales Symposium „Schienenfehler“.*
- Eidam, Ch. (1977). „Simultane Messung der Spannweiten und Fluchtabweichungen an Kranbahnen“. In: *Vermessungstechnik* 25.4, S. 127–129.
- Eisenmann, Josef (2004). „Die Schiene als Tragbalken“. In: *EI - Eisenbahningenieur* 55.5, S. 22–25.
- EN 1993-6 (2007). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 6: Crane supporting structures.*
- FEM 9.831 (1995). *Regalbediengeräte. Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte. Toleranzen, Verformungen und Freimaße im Hochregallager.*
- Forschungsinitiative Ko-FAS, Hrsg. (2011). *Präzise Zeitstempelung und zeitliche Synchronisierung in der Sensordatenfusion.* URL: http://ko-fas.de/files/2011-09-29_ko-fas_zp_ko-per_poster_ag_fahrzeuge_zeitstempelung.pdf (besucht am 03.12.2019).

- Gálvez, Akemi; Iglesias, Andrés; Avila, Andreina; Otero, César; Arias, Rubén und Manchado, Cristina (2015). „Elitist clonal selection algorithm for optimal choice of free knots in B-spline data fitting“. In: *Applied Soft Computing* 26, S. 90–106. ISSN: 15684946.
- Gantrex GmbH (2016). *GANTREX - Kranbahnvermessungen*. URL: http://www.gantrex.de/cms/front_content.php?idcat=61 (besucht am 15. 11. 2017).
- Gantry Railing Limited, Hrsg. (2017). *Crane Rail Pads - Gantry Rail*. URL: <http://www.gantrail.com/products/crane-rail-pads/> (besucht am 22. 03. 2017).
- Gelb, Arthur (1974). *Applied optimal estimation*. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press. ISBN: 978-0-26257-048-0.
- Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V., Hrsg. (2015). *Kranbahnmesswagen KBMW-III: Präzise Laservermessung von Kranschienenbahnen*. URL: https://www.gfai.de/files/d_bvia_kranbahn_20110131.pdf (besucht am 14. 03. 2017).
- Ghassoun, Yahya; Gerke, Markus; Khedar, Yogesh; Backhaus, Jan; Bobbe, Markus; Meissner, Henry; Tiwary, Prashant Kumar und Heyen, Ralf (2021). „Implementation and Validation of a High Accuracy UAV-Photogrammetry Based Rail Track Inspection System“. In: *Remote Sensing* 13.3, S. 384.
- Gläser, Andreas und Schollmeyer, Ralf (2004). „Messwerterfassung und Synchronisation in Multi-sensorsystemen“. In: *Kinematische Messmethoden - Vermessung in Bewegung*. Beiträge zum 58. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004 in Stuttgart. Augsburg: Wißner Verlag, S. 35–58.
- Glaus, Ralph (2006). „Kinematic Track Surveying by Means of a Multi-Sensor Platform“. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich. URL: <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-005168061> (besucht am 05. 06. 2014).
- GOECKE GmbH & Co KG, Hrsg. (2017). *Magnetische Gleismesswinkel*. URL: <http://goecke.de/Produkte/Gleisvermessung/Prismensysteme-fuer-die-Gleisvermessung/Magnetische-Gleismesswinkel.html> (besucht am 01. 03. 2017).
- Goller, Volker E. (2019). *Looking Inside Real-Time Ethernet*. Hrsg. von Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-1/looking-inside-real-time-ethernet.pdf> (besucht am 03. 12. 2019).
- Golnik, Daniel (2016). „Bayessche Schätzung von B-Spline-Kurven“. Masterarbeit. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Guntermann, Klaus (2006). *pp4extensions*. Hamburg.
- Hánek, Pavel und Buršíková, Olga (1993). „Messung von Kranbahnen mit Totalstationen: Měření jeřábových drah totálními stanicemi“. In: *Geodetický a kartografický* 39.1, S. 8–11. URL: <http://archivnimapy.cuzk.cz/zemvest/texty/Rok1993.pdf> (besucht am 26. 06. 2015).
- Hannover, Hans-Otto (1980). „Vermessen von Krananlagen mit Hilfe von Lasermeßeinrichtungen“. In: *Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts*. Bd. 28. Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts, S. 35–54.
- Hartikainen, Jouni; Solin, Arno und Särkkä, Simo (2011). *Optimal filtering with Kalman filters and smoothers: a Manual for the Matlab toolbox EKF/UKF: Version 1.3*. URL: <http://becs.aalto.fi/en/research/bayes/ekfukf/documentation.pdf> (besucht am 21. 04. 2018).
- Hartmann, Jens; Paffenholz, Jens-André; Strübing, Thorsten und Neumann, Ingo (2017). „Determination of Position and Orientation of LiDAR Sensors on Multisensor Platforms“. In: *Journal of Surveying Engineering* 143.4, S. 1–11.
- Haykin, Simon S., Hrsg. (2001). *Kalman filtering and neural networks*. Adaptive and learning systems for signal processing, communications, and control. New York: Wiley. ISBN: 978-0471369981.
- Hecht, Jeff (2010). „A short history of laser development“. In: *Applied Optics* 49.25.
- Henderson, D. M. (1977). *Euler angles, quaternions, and transformation matrices: Working Relationships: NASA TM-74839 Shuttle Program*. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770024290.pdf> (besucht am 06. 02. 2019).
- Hennecke, Fritz; Müller, Gerhard und Werner, Hans (1989). *Handbuch Ingenieurvermessung: Hochbau und Überwachungsmessung*. 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen. ISBN: 3-345-00252-3.

- Hennecke, Fritz und Werner, Hans (1982). *Ingenieur-Geodäsie. Anwendung im Bauwesen und Maschinenbau*. 1. Aufl. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Hennes, Maria (2010). „Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik“. In: *Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren*. DVW Schriftenreihe. Wißner Verlag, S. 239–252. ISBN: 978-3-89639-742-3.
- Hennes, Maria und Ingensand, Hilmar (2000). „Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung“. In: *Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying, 13.-17.03.2000, München*. Hrsg. von Schnädelbach, Klaus und Schilcher, Matthäus. Stuttgart: Wittwer Verlag Stuttgart, S. 166–177. URL: <https://www.gik.kit.edu/downloads/stamp.pdf> (besucht am 19.09.2017).
- Herrmann, Christoph (2016). „Entwicklung eines trackingfähigen optischen Messsystems zur Posenbestimmung“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Heunecke, Otto; Kuhlmann, Heiner; Welsch, Walter; Eichhorn, Andreas und Neuner, Hans-Berndt (2013). *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin [u.a.]: Wichmann. ISBN: 978-3-87907-467-9.
- Heunecke, Otto; Wehner, Andreas; Liebl, Wolfgang; Strübing, Thorsten und Wbra, P. (2015). „Zielführung beim Lasertracking via aktivem Corner Cube.“ In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* 122.11-12, S. 342–350.
- Hexagon Metrology, Hrsg. (2014). *Leica Absolute Tracker AT960*.
- Höpcke, Walter (1980). *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*. Walter de Gruyter.
- Horst, Sebastian und von Gösseln, Ilka (2013). „Active Prism for Total Station Measurements: Aktives Prisma für tachymetrische Netzmessungen“. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* 120.4, S. 129–136.
- HPM Vermessung (2013). *Kranbahnvermessung RailRob (R)*. URL: <http://www.hpm-vermessung.de/fileadmin/PDF/Kranbahnvermessung.pdf> (besucht am 02.02.2014).
- Igelbrink, Matthias; Höh, Axel; Linz, Andreas und Ruckelshausen, Arno (2017). „Raspberry Pi / ROS-basiertes Low-Cost-Multikamerasystem zum mobilen Einsatz im Feldversuchswesen“. In: *23. Workshop Computerbildanalyse in der Landwirtschaft*. Hrsg. von Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. Bornimer Agrartechnische Berichte, S. 279–287. URL: https://www.atb-potsdam.de/fileadmin/docs/Publikationen/Heft_93_kl.pdf (besucht am 23.08.2017).
- ISO 12488-1 (2012). *Cranes - Tolerances for wheels and travel and traversing tracks - Part 1: General*.
- Janusz, Wojciech (1966). „Geodätische Untersuchung der Ursachen einer unregelmäßigen Fahrt von Brückenkränen (poln.)“ In: *Praca - Instytut Geodezji i Kartografii* 29.2, S. 182–224.
- JCGM 100 (2008). *Guide to the expression of uncertainty in measurement - JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections - Evaluation of measurement data)*.
- Jenoptik Jena GmbH, Hrsg. (1979). *Laserfluchtungsgeräte LF 1 und LFG 1*.
- Julier, Simon Justin (1998). „Reduced Sigma Point Filters for the Propagation of Means and Covariances Through Nonlinear Transformations“. In: *Elsevier*. (Besucht am 03.05.2018).
- (2002). „The scaled unscented transformation“. In: *On optimal controls for a general mathematical model for chemotherapy of HIV*. Hrsg. von Ledzewicz, Urszula und Schättler, Heinz M. [Dayton, Ohio]: AACC, 4555–4559 vol.6. ISBN: 0-7803-7298-0. (Besucht am 03.05.2018).
- Julier, Simon Justin und Uhlmann, Jeffrey K. (1996). „A General Method for Approximating Nonlinear Transformations of Probability Distributions“. In:
- (1997). „A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems“. In: *Conference on Photonic Quantum Computing*. Hrsg. von Kadar, Ivan. SPIE Proceedings. SPIE, S. 182.
- (2002). „Reduced sigma point filters for the propagation of means and covariances through nonlinear transformations“. In: *On optimal controls for a general mathematical model for chemotherapy of HIV*. Hrsg. von Ledzewicz, Urszula und Schättler, Heinz M. [Dayton, Ohio]: AACC, 887–892 vol.2. ISBN: 0-7803-7298-0.

- Julier, Simon Justin und Uhlmann, Jeffrey K. (2004). „Unscented Filtering and Nonlinear Estimation“. In: *Proceedings of the IEEE* 92.3, S. 401–422. ISSN: 0018-9219.
- Julier, Simon Justin; Uhlmann, Jeffrey K. und Durrant-Whyte, H. F. (1995). „A new approach for filtering nonlinear systems“. In: *1995 American Control Conference*. [Place of publication not identified]: IEEE, S. 1628–1632. ISBN: 0-7803-2445-5.
- Kahmen, Heribert (2005). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. 20., völlig neu bearb. Aufl. De-Gruyter-Lehrbuch. Berlin und New York: De Gruyter. ISBN: 978-3110184648.
- Kálmán, Rudolph Emil (1960). „A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems“. In: *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering* 82.Series D, S. 35–45.
- Kemkes, Eva (2016). „Eignungsprüfung mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) für die Integration in ein Geosensornetzwerk zur automatisierten Überwachung schwingender Bauwerke“. Masterarbeit. Hannover.
- Klewin, U. (1965). „Ein Beitrag zu Kranbahnkontrollmessungen“. In: *Vermessungstechnik* 13.3, S. 90–92.
- Kok, Manon; Hol, Jeroen D. und Schön, Thomas B. (2017). *Using inertial sensors for position and orientation estimation*. Bd. 11,1/2. Foundations and trends in signal processing. Hanover, Mass.: Now Publishers. ISBN: 978-1-680-83356-0.
- Koop, Jürgen und Hesse, Wilhelm (2010). *Sicherheit bei Kranen*. 10. Aufl. Springer. ISBN: 978-3-642-12793-9.
- Köstermann, Heinrich; Meißner, Klaus und Sladek, Herbert, Hrsg. (2008). *Handbuch der Schienentechnik: Werkstoffe, Herstellung und Bearbeitung, Qualitätssicherung*. Bd. Bd. 152. Fachbuchreihe Schweißtechnik. Düsseldorf: Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., DVS-Verlag. ISBN: 978-3-87155-218-2.
- Kraft, Edgar (2003). „A quaternion-based unscented Kalman filter for orientation tracking“. In: *Proceedings of the Sixth International Conference of Information Fusion*. [Fairborn, Ohio]: International Society of Information Fusion, S. 47–54. ISBN: 0-9721844-4-9.
- Kraus, Karl (2004). *Photogrammetrie*. 7., vollst. bearb. u. erw. Aufl. De-Gruyter-Lehrbuch. Berlin: De Gruyter. ISBN: 3-11-017708-0.
- Lackner, Stefan und Lienhart, Werner (2016). „Impact of Prism Type and Prism Orientation on the Accuracy of Automated Total Station Measurements“. In: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring Vienna 2016*. URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdms_pdf/nonreviewed/JISDM_2016_submission_24.pdf (besucht am 06.03.2017).
- Leica Geosystems AG, Hrsg. (2013). *Leica T-Scan - Leica T-Scan TS50-A high-speed hand scanner - Leica Geosystems - Metrology*. URL: http://metrology.leica-geosystems.com/de/Leica-T-Scan_1836.htm (besucht am 08.11.2017).
- Lichtberger, Bernhard (2009). „EM-SAT – von der Vormessung zur kompletten ingenieurmäßigen Vorbereitung der Gleisstandhaltung“. In: *EIK - Eisenbahningenieurkalender*, S. 185–194.
- Lietmann GmbH & CO. KG, Hrsg. (2013). *Kranbahnen*. URL: <http://www.lietmann.de/41-0-Kranbahnen.html> (besucht am 21.03.2017).
- Mallick, Satya (2016). *Head Pose Estimation using OpenCV and Dlib | Learn OpenCV*. URL: <https://www.learnopencv.com/head-pose-estimation-using-opencv-and-dlib/> (besucht am 20.11.2017).
- Mao, Junyu und Nindl, Daniel (2009). *Vermessungsreflektoren - White Paper: Merkmale und Einflüsse*. Hrsg. von Leica Geosystems. URL: https://accessories.leica-geosystems.com/downloads123/zz/accessory/accessories/white-tech-paper/White%20Paper%20Surveying%20Reflectors_en.pdf (besucht am 18.01.2017).
- Marchthaler, Reiner und Dingler, Sebastian (2017). *Kalman-Filter: Einführung in die Zustandsschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme*. 1. Auflage 2017. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-16728-8.

- Marjetič, Aleš; Kregar, Klemen; Ambrožič, Tomaž und Kogoj, Dušan (2012). „An Alternative Approach to Control Measurements of Crane Rails“. In: *Sensors* 12.5, S. 5906–5918.
- Marx Ingenieurgesellschaft mbH (2014). *Kranbahnmesssystem*. URL: <http://www.marx-ig.de/de/projektliste/82/kranbahnmesssystem.html> (besucht am 26.06.2015).
- (2017). *Kranbahnvermessung*. URL: <http://www.marx-ig.de/de/messtechnologien/kranbahnvermessung.html> (besucht am 18.06.2017).
- Mauer, Thomas (2017). *Zykluszeiten von 4 μ s: Motion Control in neuen Dimensionen*. URL: <https://www.elektroniknet.de/markt-technik/automation/motion-control-in-neuen-dimensionen-147320-Seite-2.html> (besucht am 03.12.2019).
- Maurer, Markus; Gerdes, J. Christian; Lenz, Barbara und Winner, Hermann (2015). *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-45853-2.
- MEAS Deutschland GmbH (2012). *D-Series Inclinator: Datenblatt*. Hrsg. von Measurement Specialties. Dortmund.
- Meister, Oliver (2010). „Entwurf und Realisierung einer Aufklärungsplattform auf Basis eines unbemannten Minihelikopters mit autonomen Flugfähigkeiten“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie. URL: <https://books.google.de/books?id=CoDAqCrc5N0C> (besucht am 15.07.2018).
- Menegaz, Henrique M.T. und Ishihara, João Y. (2018). „Unscented and square-root unscented Kalman filters for quaternionic systems“. In: *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 26.4, S. 536. ISSN: 10498923.
- MHE Demag S Pte Ltd., Hrsg. (2017). *MHE-Demag*. URL: <http://www.mhe-demag.com/PageDisplay.aspx?aid=644FA8DE-094C-4DDA-99E5-98DBDF7CE211&action>ShowItemDetail&lang=&tid=0&oid=0&id=52a58bd7-88b7-41e9-acdd-3f6eb6353aa8&rid=AE8D9C1D-6C5D-4BD6-9CE9-5289B799A7B6> (besucht am 21.03.2017).
- Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, Hrsg. (2013). *scanCONTROL: 2D/3D laser scanner (laser profile sensors)*.
- Molčan, Vladimír (2014). „Deformation surveying of crane track: Určení Prostorových Vztahů Jeřábové Dráhy“. Master thesis. Brno, University of technology. URL: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=92525 (besucht am 17.12.2016).
- Mönch, W (1954). „Richten der Stützenköpfe von Kranbahnen“. In: *Vermessungstechnik* 2.5, S. 89.
- Muders, Lothar (2004). „Laser statt Schablone: Die Lasermesstechnik optimiert die Herstellung von Schienen“. In: *Laser Technik Journal* 2, S. 55–59.
- N.N. (1972). „Verkantungsmessungen an Kränen“. In: *Stahl und Eisen* 92.7, S. 319.
- Neumann, Ingo und Dennig, Dirk (2009). „Crane rail survey keep the wheels turning“. In: *WorldCargo News* 07, S. 20–21.
- (2011). „Development of the kinematic Crane-Track-Surveying-System „RailControl“ – Reducing Operational Interruption of Crane Tracks: Entwicklung des kinematischen Kranbahnvermessungssystems „RailControl“ – Reduzierung von Stillstandszeiten bei Kranbahnsystemen“. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* 05, S. 162–169.
- Niemeier, Wolfgang (2008). *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*. 2., überarb. und erw. Aufl. De Gruyter Lehrbuch. Berlin [u.a.]: De Gruyter. ISBN: 978-3110190557.
- Nistler, Jonathan R. und Seleka, Majura F. (2011). „Gravity compensation in accelerometer measurements for robot navigation on inclined surfaces“. In: *Procedia Computer Science* 6, S. 413–418. ISSN: 18770509.
- Oberländer, Mario (2011). *Visio-PWB encoders Data Sheet ME22_PU_Rev. 2*. Hrsg. von PWB encoders GmbH. Eisenach. URL: http://www.pwb-encoders.com/documents/78562/102763/PWB+encoders+Data+Sheet+ME22_PU_Rev.+2_eng1_08062011.pdf/8322b51c-baea-4a3f-8753-a5a80418544d (besucht am 26.07.2017).
- Ódor, Károly (1984). „Planung geodätischer Messungen bei der Rekonstruktion einer Kranbahn“. In: *Periodica Polytechnica*.

- OpenCV dev team, Hrsg. (2014). *Camera Calibration and 3D Reconstruction*. URL: https://docs.opencv.org/3.0-beta/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html (besucht am 21.11.2017).
- Osann, Bernhard (2013). *Lehrbuch der Eisen- und Stahlgiesserei: Für den Gebrauch beim Unterricht, beim Selbststudium und in der Praxis*. UNIKUM. ISBN: 978-3845702131. URL: <https://books.google.de/books?id=wrjAgAAQBAJ> (besucht am 13.03.2017).
- Paffenholz, Jens-André (2012). „Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors“. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Park, Hyungjun und Leeb, Joo-Haeng (2007). „B-spline curve fitting based on adaptive curve refinement using dominant points“. In: *Computer-Aided Design* 39.6, S. 439–451. ISSN: 0010-4485. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448507000024/pdf?md5=ca66ac924e103ef1b2233fc87057133c&pid=1-s2.0-S0010448507000024-main.pdf> (besucht am 22.03.2018).
- Pavlov, I. M. und Cernikov, V. F. (1971). „Erfahrungen bei der Anwendung eines Gaslasers für die automatische Kontrolle von Kranbahnen (tschech.)“. In: *Geodet. a Kartogr. Obz., Praha* 17.11, S. 272–275.
- Pennec, Xavier (1998). „Computing the Mean of Geometric Features Application to the Mean Rotation“. In: *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA) Rapport de recherche no 3371*. URL: <https://hal.inria.fr/inria-00073318/en/> (besucht am 13.06.2018).
- Piegl, Les A. und Tiller, Wayne (1997). *The NURBS book*. 2nd ed. Monographs in visual communications. Berlin und New York: Springer. ISBN: 978-3-642-97385-7.
- Quigley, Morgan; Gerkey, Brian; Conley, Ken; Faust, Josh; Foote, Tully; Leibs, Jeremy; Berger, Eric; Wheeler, Rob und Ng, Andrew (2009). „ROS: an open-source Robot Operating System“. In: *ICRA Workshop on Open Source Software*. Bd. 3. URL: <http://www.willowgarage.com/sites/default/files/icraoss09-ROS.pdf> (besucht am 05.09.2017).
- Reinmuth, Uwe (2013). *Stangenpuffer | Gleise | Platte und Nagel?* URL: <http://www.stangenpuffer.de/01-Gleise/Inlandsbanan/inlandsbanan.htm> (besucht am 22.03.2017).
- Repalov, I. M. (1970). „Automatisierung der Messvorgänge bei der geodätischen Kontrolle des Zustands von Kranbahnen (russ.)“. In: *Vopr. inz. geod. Volgograd*, S. 133–146.
- Rosenberg, Harald von (2006). „Sensorfusion zur Navigation eines Fahrzeugs mit low-cost Inertialsensorik“. Diplomarbeit. Stuttgart: Universität Stuttgart. (Besucht am 21.04.2018).
- Sahawneh, Laith Rasmi und Al Jarrah, Mohammad Amin (2008). „Development and calibration of low cost MEMS IMU for UAV applications“. In: *2008 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications*. Hrsg. von Staff, IEEE. [Place of publication not identified]: I E E E, S. 1–9. ISBN: 978-1-4244-2033-9.
- Särkkä, Simo (2006). „Recursive Bayesian inference on stochastic differential equations“. Dissertation. Espoo: Helsinki University of Technology. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/2690> (besucht am 24.05.2018).
- (2008). „Unscented Rauch–Tung–Striebel Smoother“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 53.3, S. 845–849. ISSN: 0018-9286.
- Scheffler, Martin; Feyrer, Klaus und Matthias, Karl (1998). *Fördermaschinen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-663-16319-0.
- SM-Schienentechnik GmbH (2017). *Gummipuffer | SM-Schienentechnik GmbH*. URL: <http://www.sm-schienentechnik.de/sm-kran-gummi-puffer-4/> (besucht am 21.03.2017).
- Schubert, Robin; Richter, Eric und Wanielik, Gerd (2008). „Comparison and Evaluation of Advanced Motion Models for Vehicle Tracking“. In: *Fusion 2008*. Hrsg. von IEEE. IEEE, S. 730–735. ISBN: 978-3-00-024883-2. (Besucht am 17.09.2018).
- Schulz, Wolfgang (1974). „Messung der Schräglage von Kränen“. In: *Stahl und Eisen* 22, S. 1063.

- Schulze, Malte Jan (2009). „Optimale Auswertung von kinematischen Neigungsmessungen mit simultaner tachymetrischer Positionsbestimmung bei einem kinematischen Gleissmesssystem“. Diplomarbeit. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Schuster, Otmar (1976). „Ein neues Verfahren zur Kranbahnvermessung“. In: *BDVI Forum*, S. 378–387.
- Seeßelberg, Christoph (2005). *Zum Entwurf von Kranbahnträgern für Laufkrane*. Hrsg. von FRILO Software GmbH. Stuttgart. URL: http://frilo.com/tl_files/frilo/pdf/de/artikel/frilomagazin/seesselberg_2005_Kranbahntraeger.pdf (besucht am 03.05.2015).
- Service, Industrial News (2017). *Advanced Diagnostics Services from Konecranes increase accuracy, safety, and efficiency of crane operations*. URL: <https://www.ins-news.com/en/100/832/2143/Advanced-Diagnostics-Services-from-Konecranes-increase-accuracy-safety-and-efficiency-of-crane-operations.htm> (besucht am 19.06.2017).
- Shin, Eun-Hwan und El-Sheimy, Naser (2002). „A New Calibration Method for strapdown Inertial Navigation Systems“. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)* 127.1, S. 41–50.
- Silva, Clarence W. de (2017). *Sensor systems: Fundamentals and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis CRC Press. ISBN: 978-1-498-71624-6.
- Simon, Dan (2006). *Optimal state estimation: Kalman, H_∞, and nonlinear approaches*. New Jersey: John Wiley. ISBN: 978-0-471-70858-2.
- Sinner Stahl- und Industriebauten GmbH (2013). *Sinner Stahl- und Industriebauten GmbH / ThyssenKrupp Rasselstein GmbH, Andernach: 48 m lange Kranbahn mit Bodenfahrschienen für 20 to Halb-Portalkran*. URL: <http://www.sinner-stahlbau.de/2013/04/18/thyssenkrupp-rasselstein-gmbh-andernach-48-m-lange-kranbahn-mit-bodenfahrschienen-fuer-20-to-halb-portalkran/> (besucht am 21.03.2017).
- Sipos, Brian J. (2008). „Application of the manifold-constrained unscented Kalman filter“. In: *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2008*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 30–43. ISBN: 978-1-4244-1536-6.
- Skog, Isaac und Händel, Peter (2006). „Calibration of A MEMS inertial measurement unit“. In: *XVII IMEKO World Congress*.
- Solin, Arno; Cortes, Santiago; Rahtu, Esa und Kannala, Juho (2018). „Inertial Odometry on Handheld Smartphones“. In: *2018 21st International Conference on Information Fusion (FUSION)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–5. ISBN: 978-0-9964527-6-2.
- Steiner, René (2014). *Grundkurs Relationale Datenbanken: Einführung in die Praxis der Datenbankentwicklung für Ausbildung, Studium und IT-Beruf*. 8., erw. u. überarb. Aufl. 2014. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-04287-5.
- Stempfhuber, Werner und Sukale, Jens (2017). „Kinematische Leistungsfähigkeit der MultiStation Leica MS60“. In: *Géomatique Suisse*, S. 67–70. URL: <https://www.geomatik.ch/cms/upload/imgfile110.pdf> (besucht am 21.11.2019).
- Sticha, Jonas (2014). „Validating the Real-Time Capabilities of the ROS Communication Middleware“. Bachelorarbeit. München: Technische Universität München. URL: <https://www.bmw-carit.de/downloads/publications/ValidatingTheRealTimeCapabilitiesOfTheROSCommunicationMiddleware.pdf> (besucht am 11.09.2017).
- Strübing, Thorsten (2015). „Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multi-sensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II“. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.
- Strübing, Thorsten und Neumann, Ingo (2013). „Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen“. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)* 3, S. 210–221.
- Strukton Rail Benelux (2022). *CBOT1*. URL: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=8302076443143256&set=a.247495018601479> (besucht am 17.09.2022).

- TE Connectivity Sensors Germany GmbH, Hrsg. (2017a). *D-Series Inclinometer: Specifications*. URL: http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=D_Series&DocType=DS&DocLang=English (besucht am 25.07.2017).
- Hrsg. (2017b). *Instruction Manual D-Series Inclinometer*. URL: http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Specification+Or+Standard%7FD-Series_Instruction_Manual%7FA1%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_SS_D-Series_Instruction_Manual_A1.pdf%7FCAT-TSI0012 (besucht am 25.07.2017).
- The Imaging Source, Hrsg. (2008). *Using Trigger and Digital I/Os - Part 2*. URL: <https://www.theimagingsource.com/media/blog/archive/20080603/> (besucht am 05.12.2019).
- The Imaging Source Europe GmbH, Hrsg. (2014). *Product Catalog*.
- Thiele, Albrecht und Lohse, Wolfram (1997). *Stahlbau*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-663-05670-6.
- Thrun, Sebastian; Burgard, Wolfram und Fox, Dieter (2005). *Probabilistic robotics*. [Nachdr.] Intelligent robotics and autonomous agents. Cambridge, Mass.: MIT Press. ISBN: 978-0-262-20162-9.
- ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, Hrsg. (2010). *Oberbauhandbuch*. Essen.
- Hrsg. (2012). *Innovatives Programm. Das System Kranbahn*. Essen.
- Tinkerforge GmbH, Hrsg. (2017a). *Tinkerforge Distance US Bricklet*. URL: https://www.tinkerforge.com/de/doc/Hardware/Bricklets/Distance_US.html (besucht am 26.07.2017).
- Hrsg. (2017b). *Tinkerforge IMU 2.0*. URL: https://www.tinkerforge.com/de/doc/Hardware/Bricks/IMU_V2_Brick.html (besucht am 26.07.2017).
- Titterton, David H. und Weston, John L. (2004). *Strapdown inertial navigation technology*. 2nd edition. Bd. 17. IET Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series. London und Reston: The Institution of Engineering and Technology. ISBN: 978-0-863-41358-2.
- Thustý (1979). „Anwendung von Lasergeräten für die Vermessung von Kranbahnen“. In: *Vermessungstechnik* 27.4, S. 129–130.
- TRIGIS, Hrsg. (2017). *Industrievermessung - TRIGIS*. URL: <http://www.trigis.de/de/industrievermessung.html> (besucht am 26.04.2017).
- Uhlmann, Jeffrey K. (1994). „Simultaneous map building and localization for real time applications“. Technical report. University of Oxford.
- (2012). *First-Hand: The Unscented Transform - ETHW*. URL: http://ethw.org/First-Hand:The_Unscented_Transform (besucht am 08.05.2018).
- VDI 3576 (2011). *Schienen für Krananlagen - Schienenverbindungen, Schienenlagerungen, Schienenbefestigungen, Toleranzen für Kranbahnen*. Berlin.
- VDMA, Hrsg. (2. März 2023). *Intralogistik: Effizienz für den Materialfluss*. URL: <https://www.vdma.org/intralogistik>.
- VEB Metalleichtbaukombinat, Hrsg. (1973). *Kranbahnen - Kranbahnträger aus Stahl: Katalog M 7301 PWV*. URL: <https://www.bbr-server.de/bauarchivddr/archiv/plarchiv/00024-0024/akten-und-mappen-pdf/00024-0024-m7301pwv.pdf> (besucht am 20.03.2017).
- Veit, Peter (2006). „Qualität im Gleis – Luxus oder Notwendigkeit?“. In: *EI - Eisenbahningenieur* 57.12, S. 32–37.
- Verordnung (EU) 2019/1020 (2019). *Verordnung (EU) 2019/1020 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über Marktüberwachung und die Konformität von Produkten sowie zur Änderung der Richtlinie 2004/42/EG und der Verordnungen (EG) Nr. 765/2008 und (EU) Nr. 305/2011 (Text von Bedeutung für den EWR.)* URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32019R1020> (besucht am 13.11.2022).
- Verordnung (EU) 2023/1230 (2023). *Verordnung (EU) 2023/1230 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2023 über Maschinen und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und der Richtlinie 73/361/EWG des Rates (Text von Bedeutung für den EWR)*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1230> (besucht am 02.03.2023).

- Wan, Eric A. und van der Merwe, Rudolph (2000). „The unscented Kalman filter for nonlinear estimation“. In: *IEEE 2000 adaptive systems for signal processing, communications and control symposium*. IEEE, S. 153–158. ISBN: 0-7803-5800-7.
- (2001). „The Unscented Kalman Filter“. In: *Kalman filtering and neural networks*. Hrsg. von Haykin, Simon S. Adaptive and learning systems for signal processing, communications, and control. New York: Wiley, S. 221–280. ISBN: 978-0471369981.
- Wang, Yidi; Sun, Shouming und Li, Li (2014). „Adaptively Robust Unscented Kalman Filter for Tracking a Maneuvering Vehicle“. In: *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 37.5, S. 1696–1701. ISSN: 0731-5090.
- Wegner, Alfred und Damm, Stefan (2015). „Digital Abnahme von Schienenlängsprofilen“. In: *ZEVrail* 139.6-7, S. 252–259.
- Welch, Greg und Bishop, Gary (1995). *An Introduction to the Kalman Filter*. Chapel Hill, NC.
- Wikipedia, Hrsg. (2013). *Broken Rail*. URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Schienenbruch.jpg> (besucht am 12.01.2017).
- Willow Garage, Hrsg. (2010). *Comic: Reinventing the Wheel*. URL: <http://www.willowgarage.com/blog/2010/04/27/reinventing-wheel> (besucht am 08.09.2017).
- Yang, Cheng; Shi, Wenzhong und Chen, Wu (2019). „Robust M–M unscented Kalman filtering for GPS/IMU navigation“. In: *Journal of Geodesy* 17.4, S. 1093–1104. ISSN: 1432-1394.
- Yuan, Xuebing; Yu, Shuai; Zhang, Shengzhi; Wang, Guoping und Liu, Sheng (2015). „Quaternion-based unscented Kalman filter for accurate indoor heading estimation using wearable multi-sensor system“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 15.5, S. 10872–10890. ISSN: 1424-8220.
- Zaayman, Leon (2013). „Gleiszustandsmonitoring und Analyse für eine effiziente Wartungsplanung“. In: *EI - Eisenbahningenieur* 04, S. 36–40.
- Zanetti, Renato; Majji, Manoranjan; Bishop, Robert H. und Mortari, Daniele (2009). „Norm-Constrained Kalman Filtering“. In: *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 32.5, S. 1458–1465. ISSN: 0731-5090.
- Zheng, Binqi; Fu, Pengcheng; Li, Baoqing und Yuan, Xiaobing (2018). „A Robust Adaptive Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation with Uncertain Noise Covariance“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18.3. ISSN: 1424-8220.
- Zogg, Hans-Martin (2008). „Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System“. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einordnung der Vermessung im Rahmen von Arbeiten an Kranen und Kranbahnen.	5
2.2	Resultierende Kräfte bei vier Zuständen der Kranbahn und des Krans: Neue Schienen (1); schlecht ausgerichtete Schienen (2); verschlissene Schienen (3); schlecht justierter Kran (4).	6
2.3	Übliche Schienenprofile gemäß der VDI 3576:2011-03.	7
2.4	Schienenlagerungssysteme auf Beton (ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2010, S. 86, 87).	8
2.5	Schienendurchbiegung und Überhöhung.	8
2.6	Verformungen der Fahrbahn (EN 1993-6:2007, Kap. 8.3)	9
2.7	Befestigungsarten für Kranschienen.	9
2.8	Befestigungen für Kranschienen.	10
2.9	Zwischenlagen für diskontinuierliche und kontinuierliche Schienenlagerung.	11
2.10	Schienenstöße (Thiele und Lohse, 1997, S. 129).	11
2.11	Durch Laschen verbundene Schienen (Reinmuth, 2013).	12
2.12	Abnahmekriterien für Kranschienenstöße (ISO 12488-1:2012-07, S. 16, Tabelle 6).	12
2.13	Durchführung einer geometrischen Abnahmemessung (Köstermann et al., 2008, S. 106).	13
2.14	Toleranz „F“ für die Parallelität der Endanschläge (VDI 3576:2011-03). Die Abbildung zeigt eine Draufsicht.	14
2.15	Verschiedene Kranbahnbegrenzer.	15
2.16	Brückenkran, Portalkran, Kabelkran und Drehkran (Scheffler et al., 1998).	15
2.17	Zweiträgerlaufkran, Portalkran, Wandlaufkran und Deckenlaufkran.	16
2.18	Wortwolke diverser nationaler und internationaler Richtlinien mit Toleranzvorgaben für die Geometrie von schienenengebundenen Anlagen.	17
2.19	Darstellung von Zustandsgrößen (VDI 3576, 2011).	18
2.20	Koordinatensystem eines Zweischienensystems.	19
2.21	Maßstab und Hirtenstab.	22
2.22	Das Reiterverfahren nach Eidam (1977).	23
2.23	Laserbasierte Kranbahnvermessungssysteme.	24
2.24	Kranbahnvermessung mit Tachymeter und Reflektor.	25
2.25	Kranbahnmesswagen RailControl und Einfluss der Neigung auf die Messwerte.	26
2.26	Kranbahnmesswagen RailQ™ und Tachymeter (Service, 2017).	26
2.27	Verschiedene Kranbahnmesswagen mit 360° Prismen.	27
2.28	Verschiedene Kranbahnmesswagen mit Rundprismen.	27
2.29	Kranbahnmesswagen CBOT1 (Strukton Rail Benelux, 2022).	28
3.1	Rekursion von Prädiktion und Korrektion am Beispiel eines BFs.	32
3.2	Drei Arten von Schätzproblemen, nach Gelb (1974, S. 3) modifiziert.	39
3.3	Verhalten von Polynomen verschiedenen Grades.	42
3.4	Darstellung der polynomialen Segmente eines Spline.	44
3.5	Prinzipdarstellung der Intervallaufteilung für das Datasnooping (Schulze, 2009, S. 46).	44
3.6	Beispiel für eine B-Spline Kurve und ihre Einflussparameter (Golnik, 2016).	46
4.1	Hilfsmittel für die direkte (4.1a) und indirekte (4.1b) Bestimmung der Schienenachse. Mit letzterem kann die Schienenkopfkante direkt bestimmt werden.	49

4.2	Querschnitt eines abgenutzten Schienenprofils (blau schraffiert) zur Darstellung der theoretischen (schwarz) und praktischen Schienenachse (blau)	50
4.3	Möglicher Verschleiß von Schienenprofilen	50
4.4	gebrochener Schienenstoß (Wikipedia, 2013)	51
4.5	Kranschiene mit korrekt montierter Schienenbefestigung (ThyssenKrupp GfT Gleis-technik GmbH, 2010)	51
4.6	Vorteil einer höheren Anzahl von Messpunkten: sowohl für den unbelasteten Zustand, als auch bei einer Messung im belasteten Zustand.	52
4.7	Hardware-Architektur des PVS. Abbildung in Anlehnung an Dennig et al. (2017) . .	56
4.8	Anforderungen an das Fahrzeug	57
4.9	PVS mit Kalibrierkörper auf einer Schiene. Aufnahmepunkte für CCRs als Referenzpunkte für das Wagenkoordinatensystem mit alphanumerischer Bezeichnung.	58
4.10	Ansichten einer Antriebseinheit	59
4.11	Starre und gefederte Führungsvorrichtung	59
4.12	Die Abbildungen 4.12a und 4.12b zeigen die minimal und maximal befahrbare Profilbreite des PVS Messwagens	60
4.13	Abnehmbare Halterung für Profillaserscanner und Kameras	61
4.14	Explosionsdarstellung der 2-Achs-Drehvorrichtung	62
4.15	Auswahl von Einflussgrößen für die Berechnung der Messunsicherheit (Dennig et al., 2017).	63
4.16	Zusammenhang zwischen Offset, Drift, Zykluszeit, Laufzeitverzögerung, Jitter und Latenz. Abbildung in Anlehnung an Forschungsinitiative Ko-FAS (2011)	67
4.17	Konzept zur Gewährleistung der definierten Zeitsynchronisierung	68
4.18	Synchronisierung von Lasertracker und PLS	69
4.19	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm zur Darstellung der Synchronisierung über den Objektraum. Von ursprünglich 1000 Hz auf 19 Hz heruntergetaktete Messdaten. Die beiden Details sind in Abbildung 4.20 vergrößert dargestellt.	70
4.20	Details in Ergänzung zu Abbildung 4.19. Oberes Diagramm: Zu erkennen ist, wie die ermittelten Geschwindigkeiten von Lasertracker und Encoder zueinander passen. Unteres Diagramm: Das Augenmerk soll im Detail auf das Ergebnis der geometrischen Synchronisierung gelenkt werden.	70
4.21	Entity-Relationship Diagramm der Messwerte	71
4.22	Kreislauf bestehend aus prüfen, kalibrieren, justieren und messen	73
4.23	Aufwärmphase PLS (Dupuis und Kuhlmann, 2014, S. 113)	74
4.24	Die Abbildungen 4.24a und 4.24b zeigen die Durchführung der Kalibrierung sowie das Ergebnis der Auswertung.	79
5.1	Sehnen-Tangentenwinkelsatz.	86
5.2	Posen des PVS zu drei Epochen auf einem Profil.	86
5.3	Position des Reflektors im Bezug zur Fahrkante. Legende siehe Abbildung 5.2. . . .	87
5.4	Epochen $k + i$, mit $i \in \mathbb{N}$, die auf Grundlage der Beobachtungen eines Lasertrackers oder Tachymeters eine bestimmbare (grün) oder nicht bestimmbare (rot) Orientierung haben.	88
5.5	Korrektur der Längs- und Querablage in Abhängigkeit der eingesetzten Messmittel. .	89
5.6	Visualisierung der Sensorfusion in Anlehnung an Rosenberg (2006, S. 46).	90
6.1	Situation Labormessung.	103

6.2	XY-Plot der gemessenen Einzelpunkte aus den Lasertrackermessungen, getrennt nach den drei Hin- (rote Farbe) und Rückfahrten (blaue Farbe). Die Ergebnisse nach dem UKF Filter und dem anschließenden Rauch-Tung-Striebel Smoother (RTSS) sind als schwarze Linien dargestellt. Die Stationen im Abstand von 500 mm sind zur Verbindungsachse des ersten und letzten Punktes aller Lasertrackermesspunkte versetzt, nummeriert und als * dargestellt, geplottet.	105
6.3	Neigung längs- und quer zur Schiene sowie Geschwindigkeit in X-Richtung. Die oberen beiden Darstellungen zeigen die ungefilterten Messdaten des Inklinometers. Längs zur Schiene sind die auf das flüssigkeitsgelagerte Inklinometer wirkenden Beschleunigungen beim Anfahren und Bremsen in den Neigungsdaten erkennbar. Die untere Darstellung zeigt Geschwindigkeiten, die aus ungefilterten Positionen und Zeit gerechnet wurden.	106
6.4	Ergebnisse des χ^2 -Tests getrennt nach den Sensoren Lasertracker (Abtastrate 1000 Hz), IMU (Abtastrate 100 Hz) und Inklinometer (Abtastrate 10 Hz).	107
6.5	Referenzierte Punktwolke einer Messfahrt.	108
6.6	XZ-Diagramm einer Hinfahrt. Die Bezeichnungen der Stationen (Nr.*) sind für die bessere Übersicht versetzt dargestellt.	108
6.7	Punktwolke zu Mesh Vergleich jeweils aller Fahrten zur 1. Hinfahrt.	109
6.8	3D Scans aller sechs Fahrten sowie Bereich der Schienenstöße im Detail.	110
6.9	Validierung durch Vergleich von Punktwolken, die durch Abfahren des Schienenkopfes mit einem CCR entstanden sind und einem erzeugten Mesh aus der ersten von sechs Messfahrten.	111
6.10	Umwandlung der Rohdaten in ein Rechtecksignal.	112
6.11	Erkannte Schienenbefestigungen: Position und Länge.	112
6.12	Halle mit Gleis und Brenntischen.	113
6.13	Schiene mit rechteckig gefrästem Kopf, Fasen, Zahnstange im Steg, rechtwinkligem Stoß und Schienenbefestigung.	114
6.14	Netzkonfiguration als Grundlage für die Netzsimulation.	114
6.15	Netzplanung.	115
6.16	Ausschnitte aller gemessenen Punkte auf den CCR für alle Hin- (rot) und Rückfahrten (blau). Die schwarzen Linien sind die gefilterten Ergebnisse.	118
6.17	Validierung durch Vergleich von Punktwolken, aus referenzierten Scans der 1. Messfahrt und einem erzeugten Mesh, welches aus einem Scan des Schienenkopfes mit einer T-Scan entstanden ist.	120
6.18	Alle Profile der einzelnen Stationen von Schiene A übereinander gelegt. Am Schienenkopf sind die Bereiche für die Bestimmung der Achsen sowie die Schnittpunkte zu sehen.	121
6.19	Dargestellt werden die Abweichungen aller jeweils sechs Fahrten in Lage (Abbildungen links) und Z-Wert (Abbildungen rechts) zwischen praktischem Schienenachspunkt und Sollachse für die Schienen A und B. Der Sprung bei Station 25 erklärt sich durch Schienenstöße bei Schiene A und B.	123
6.20	Die obere und untere Abbildung zeigen jeweils die Abweichungen des praktischen Schienenachspunktes von der Soll-Achse in der Lage. Außerdem wird blau der 200-fach überhöhte Unsicherheitsbereich Mitte CCR dargestellt, der in der Filterung errechnet wurde. Die mittlere Abbildung stellt die Abweichungen des Spurmittenmaßes von der Soll-Achse dar. Allen drei Abbildungen ist die Einhaltung der Toleranzen (grüner Bereich) oder deren Überschreitung (roter Bereich) zu entnehmen.	124
6.21	Aufeinanderfolge Kamerabilder der linken und rechten Kamera. Für einen besseren Eindruck der Aufnahmesituation wurden die Bilder beschnitten.	125
A.1	Ergebnis des Soll-Ist Vergleichs mit GOM Inspect V 7.5 SR2. Die Werte sind in mm angegeben.	131

A.2	Abtastrate der Sensoren. Dargestellt in Histogrammen.	132
A.3	Eulerwinkel.	134
A.4	Kovarianzen der Komponenten der Quaternionen.	134
A.5	Positionen.	135
A.6	Kovarianzen der Positionen.	135
A.7	Geschwindigkeiten.	136
A.8	Kovarianzen der Geschwindigkeiten.	136
A.9	Beschleunigungen.	137
A.10	Kovarianzen der Beschleunigungen.	137
A.11	Drehraten.	138
A.12	Kovarianzen der Drehraten.	138
A.13	Innovationen für die gemessenen und abgeleiteten Größen des Lasertrackers.	139
A.14	Innovationen für die gemessenen Größen der inertialen Messeinheit.	139
A.15	Innovationen für die gemessenen Größen des Inklinometers.	140

Tabellenverzeichnis

2.1	Gegenüberstellung der Toleranzen ausgewählter Profile.	7
2.2	Geometrische Abnahmekriterien für Schienenverbindungsschweißungen (Wegner und Damm, 2015).	14
2.3	Gegenüberstellung wesentlicher Parameter aktueller Kranbahnvermessungssysteme .	29
4.1	Zustandsgrößen einer Kranbahnvermessung gemäß bekannter Richtlinien (Alt) und mit umfangreicherer Sensorik automatisiert erfassbare zusätzliche (Neu).	52
4.2	Software Architektur des PVS.	56
4.3	Zentrierfehler bei Reflektoren (360° Prismen, Rundprismen, CCR)	62
4.4	Wesentliche Einflussgrößen und Messunsicherheiten für die Bestimmung der Lage (Dennig et al., 2017).	64
4.5	Wesentliche Einflussgrößen und Messunsicherheiten bei der Ermittlung des Grats (Dennig et al., 2017).	65
4.6	Überblick der Koordinatensysteme	76
4.7	Ergebnisse der zehn Kalibrierungen für den linken PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle zehn Kalibrierungen und die arithmetrischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt. Hellgrau unterlegt ist der niedrigste, dunkelgrau unterlegt ist der höchste Wert je Spalte eines Parameters	80
4.8	Ergebnisse der zehn Kalibrierungen für den rechten PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle zehn Kalibrierungen und die arithmetrischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt. Hellgrau unterlegt ist der niedrigste, dunkelgrau unterlegt ist der höchste Wert je Spalte eines Parameters	80
6.1	Kalibrierparameter der Scanner	103
6.2	Zusammenfassende Darstellung von System-, Messrauschen und Abtastrate der einzelnen Sensoren. Für das Systemrauschen werden die Parameter von Position und Winkel entfernungs- und systemabhängig bestimmt.	104
6.3	σ der mit dem UKF und RTS Smoother gefilterten 3D-Positionsdaten im Stationsabstand von 500 mm	105
6.4	Geschätzte Standardabweichung σ der um die Neigung des Wagens korrigierten Positionsdaten im Stationsabstand von 500 mm. Die Positionen und Neigungen resultieren jeweils aus dem Filter.	107
6.5	Tabellarische Darstellung für die Messkampagne I: Punktwolke zu Mesh Vergleich aller Fahrten zur 1. Fahrt.	110
6.6	Unsicherheiten der Standorte. Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k=2$ ergibt.	116
6.7	Unsicherheiten der Anschlüsse (2σ).	116
6.8	Ergebnisse der vier Kalibrierungen vor und nach den Fahrten auf der Schiene A für den linken PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle vier Kalibrierungen und die arithmetrischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt.	117

6.9	Ergebnisse der vier Kalibrierungen vor und nach den Fahrten auf der Schiene A für den rechten PLS. Neben den 6DoF Parametern sind die zugehörigen Standardabweichungen σ , die Standardabweichungen über alle vier Kalibrierungen und die arithmetischen Mittelwerte des Messrauschens aufgeführt.	117
6.10	Tabellarische Darstellung für die Messkampagne II: Punktwolke zu Mesh Vergleich aller Fahrten zur 1. Fahrt. Im Gegensatz zu Tabelle 6.5 bezieht sich der Vergleich in diesem Fall auf eine Länge von 35 m	119
6.11	Tabellarische Darstellung: Punktwolke zu Mesh Vergleich aller Fahrten zur Referenz, die mit der T-Scan gemessen wurde.	120
6.12	Standardabweichungen von Achs- und Scanpunkten der Schienen A und B im Wagenkoordinatensystem.	122
6.13	Präzision für die Lage exemplarisch für jede fünfte Station entlang der Schiene A. . .	123

Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover

(Eine vollständige Liste der Wiss. Arb. ist beim Geodätischen Institut, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover erhältlich.)

- Nr. 368 DARUGNA, Francesco: Improving Smartphone-Based GNSS Positioning Using State Space Augmentation Techniques (Diss. 2021)
- Nr. 369 CHEN, Lin: Deep learning for feature based image matching (Diss. 2021)
- Nr. 370 DBOUK, Hani: Alternative Integrity Measures Based on Interval Analysis and Set Theory (Diss. 2021)
- Nr. 371 CHENG, Hao: Deep Learning of User Behavior in Shared Spaces (Diss. 2021)
- Nr. 372 MUNDT Reinhard Walter: Schätzung von Boden- und Gebäudewertanteilen aus Kaufpreisen bebauter Grundstücke (Diss. 2021)
- Nr. 373 WANG, Xin: Robust and Fast Global Image Orientation (Diss. 2021)
- Nr. 374 REN, Le: GPS-based Precise Absolute and Relative Kinematic Orbit Determination of Swarm Satellites under Challenging Ionospheric Conditions (Diss. 2021)
- Nr. 375 XU, Wei: Automatic Calibration of Finite Element Analysis Based on Geometric Boundary Models from Terrestrial Laser Scanning (Diss. 2021)
- Nr. 376 FENG, Yu: Extraction of Flood and Precipitation Observations from opportunistic Volunteered Geographic Information (Diss. 2021)
- Nr. 377 YANG, Chun: A hierarchical deep learning framework for the verification of geospatial databases (Diss. 2021)
- Nr. 378 MEHLTRETTER, Max: Uncertainty Estimation for Dense Stereo Matching using Bayesian Deep Learning (Diss. 2021)
- Nr. 379 KAZIMI, Bashir: Self Supervised Learning for Detection of Archaeological Monuments in LiDAR Data (Diss. 2021)
- Nr. 380 PETERS, Torben: Learning Multi-View 2D to 3D Label Transfer for Semi-Supervised Semantic Segmentation of Point Clouds (Diss. 2022)
- Nr. 381 WASSINK, Martin: Kommunal- und Regionalentwicklung durch Kooperation und Teilung von Verantwortung in ländlichen Räumen - eine multiperspektivische Untersuchung an Beispielen aus dem Raum Steinwald/Fichtelgebirge (Diss. 2022)
- Nr. 382 GOLDSCHMIDT, Jürgen: Die Berücksichtigung künftiger Entwicklungen bei der Verkehrswertermittlung (Diss. 2022)
- Nr. 383 KRUSE, Christian: Impact maps from bomb craters detected in aerial wartime images using marked point processes (Diss. 2023)
- Nr. 384 ZOURLIDOU, Stefania: Traffic Regulation Recognition from GPS Data (Diss. 2023)
- Nr. 385 SLEDZ, Artuom: Thermal anomaly detection based on information fusion from optical and infrared images (Diss. 2023)
- Nr. 386 WITTICH, Dennis: Deep Domain Adaptation for the Pixel-wise Classification of Aerial and Satellite Images (Diss. 2023)
- Nr. 387 SINGH, Vishwa Vijay: Lunar Laser Ranging - Improved Modelling and Parameter Estimation (Diss. 2023)
- Nr. 388 HARTMANN, Jens: Hochgenaue 3D-Erfassung von Großstrukturen durch kinematisches terrestrisches Laserscanning (Diss. 2023)
- Nr. 389 ZHUGE, Xia: Characterizing slope instability kinematics by integrating multi-sensor satellite remote sensing observations (Diss. 2023)
- Nr. 390 DOROZYNSKI, Mareike Marianne: Image Classification and Retrieval in the Context of Silk Heritage using Deep Learning (Diss. 2023)
- Nr. 391 KNABE, Annike: New Concepts for Gravity Field Recovery using Satellites (Diss. 2023)
- Nr. 392 KALIA, Andre: Landslide activity detection based on nationwide Sentinel-1 PSI datasets (Diss. 2023)
- Nr. 393 BROCKMEYER, Marco: Modellierung von Bodenbewegungen anhand heterogener Messverfahren am Beispiel der niedersächsischen Landesfläche (Diss. 2024)
- Nr. 394 ZHANG, Mingyue: Characteristics and Benefits of Differential Lunar Laser Ranging (Diss. 2023)
- Nr. 395 DENNIG, Dirk: Entwicklung eines kinematischen Profilvermessungssystems am Beispiel Kranbahnvermessung (Diss. 2024)

