



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

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

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.

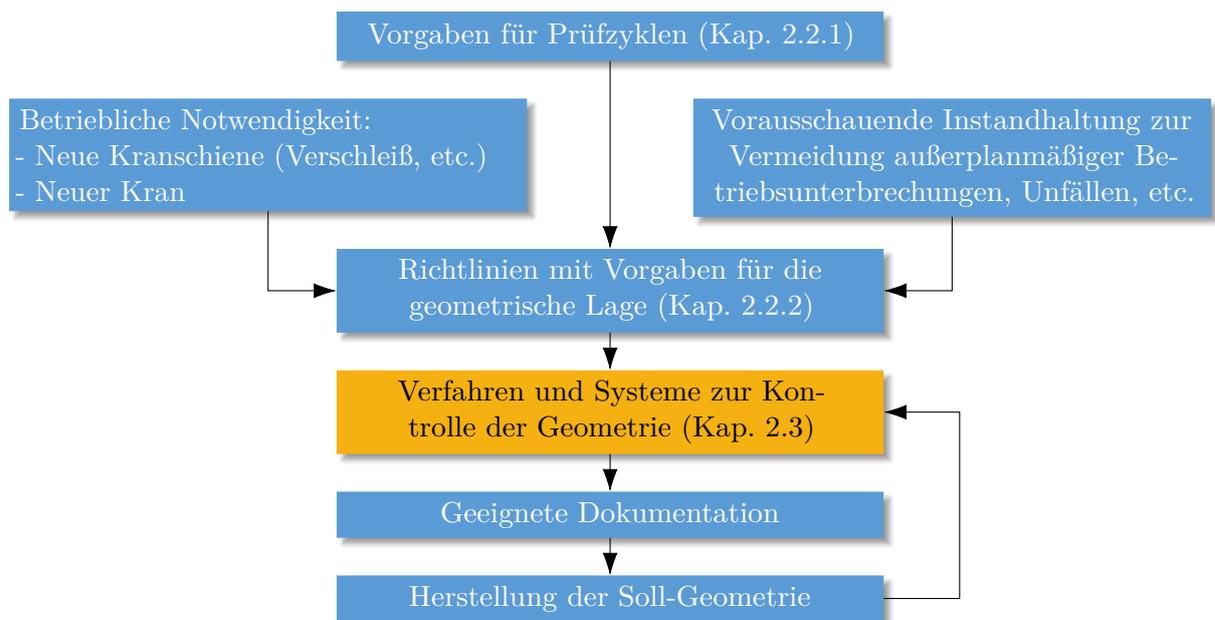


Abbildung 2.1: Einordnung der Vermessung im Rahmen von Arbeiten an Kranen und Kranbahnen.

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.

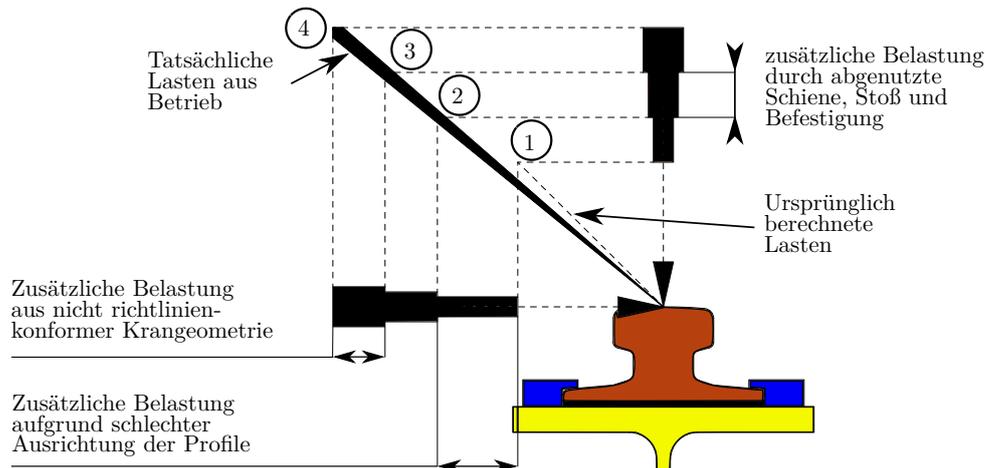


Abbildung 2.2: Resultierende Kräfte bei vier Zuständen der Kranbahn und des Krans: Neue Schienen (1); schlecht ausgerichtete Schienen (2); verschlissene Schienen (3); schlecht justierter Kran (4).

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).

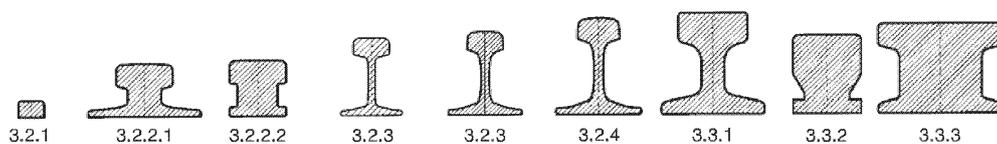


Abbildung 2.3: Übliche Schienenprofile gemäß der VDI 3576:2011-03.

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.

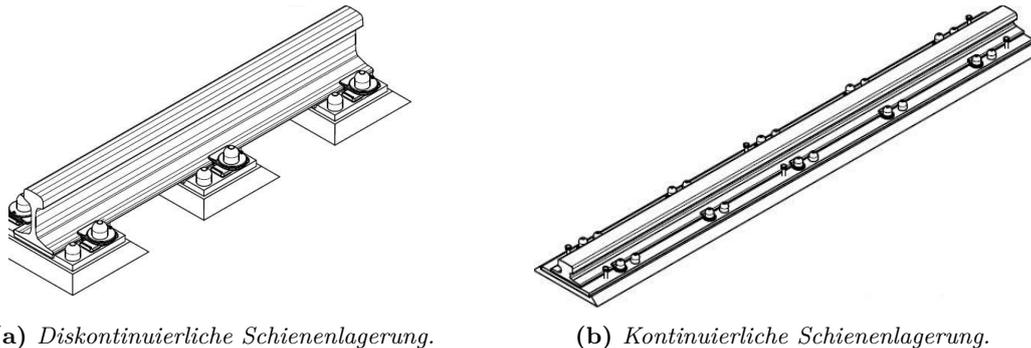
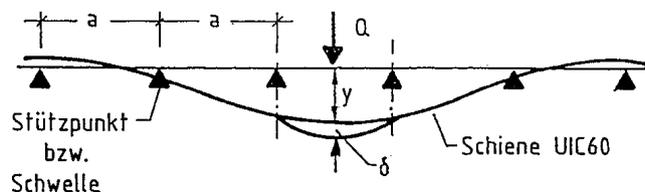


Abbildung 2.4: Schienenlagerungssysteme auf Beton (ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2010, S. 86, 87).

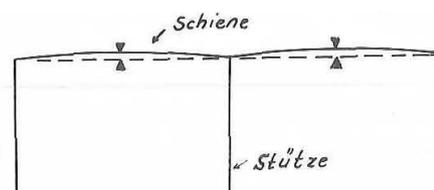
Die Wahl der Schienenlagerung erfolgt nach Art der Beanspruchung und wirtschaftlichen Aspekten. Aus statischer Sicht wird eine kontinuierliche Schienenlagerung geringer beansprucht als eine diskontinuierliche und ist damit langlebiger.

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).



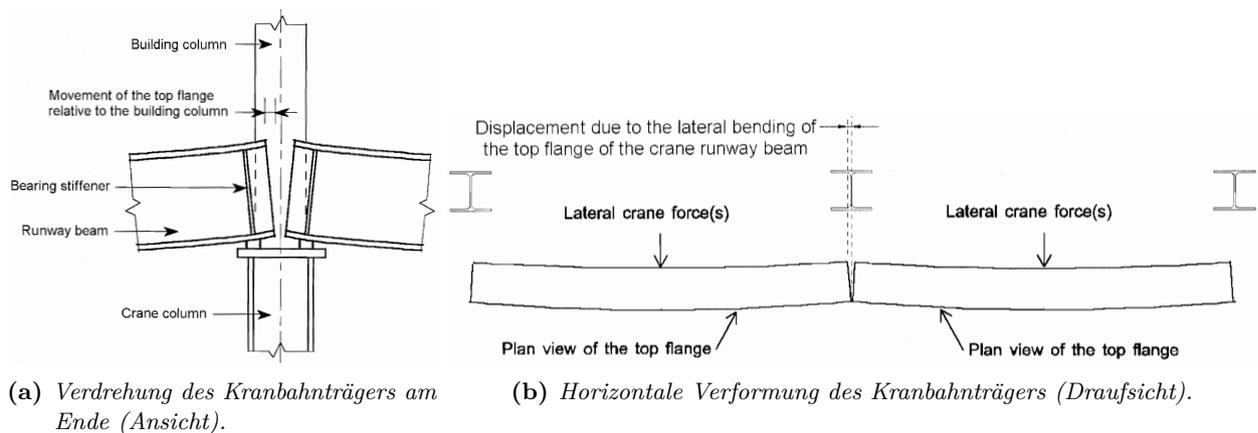
(b) Überhöhung der Schiene nach Schuster (1976, S. 380).

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).



(a) Verdrehung des Kranbahnträgers am Ende (Ansicht).

(b) Horizontale Verformung des Kranbahnträgers (Draufsicht).

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.

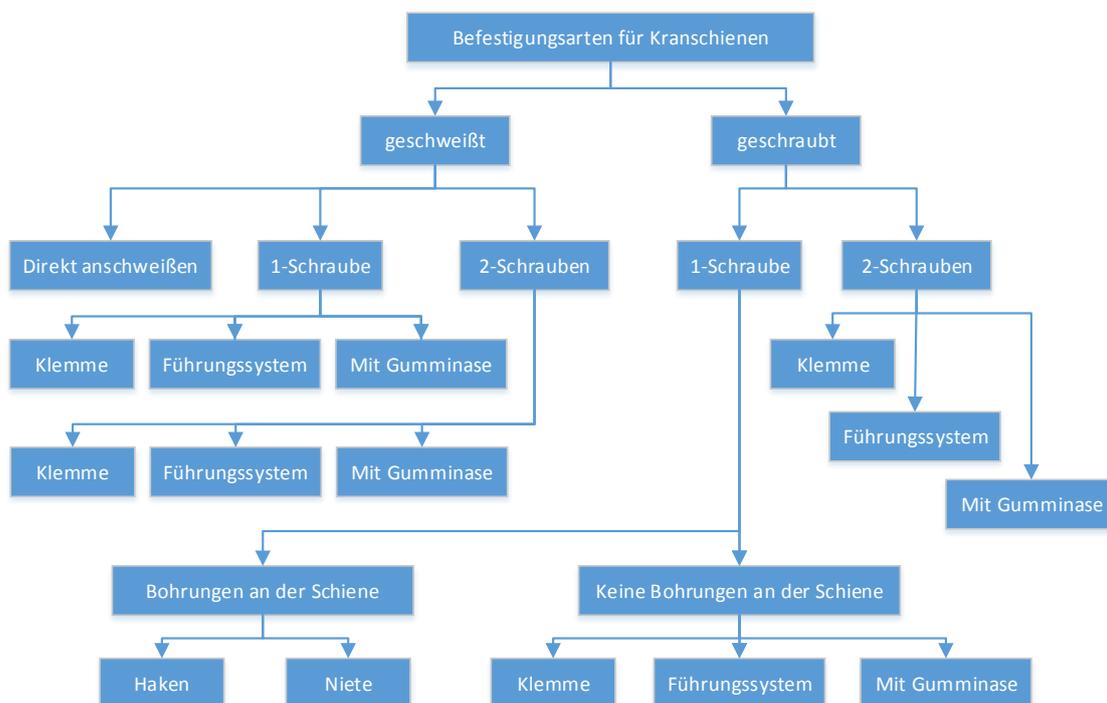
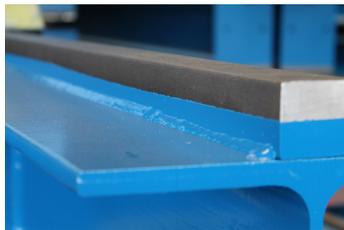


Abbildung 2.7: Befestigungsarten für Kranschienen.

- 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 Aufschiessen (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.

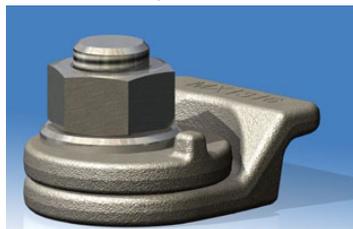
Aufgrund von Anbauten an Kranen, Spurkränzen und/oder seitlichen Führungsrollen, ist eine flache Konstruktion der Schienenbefestigungen notwendig.



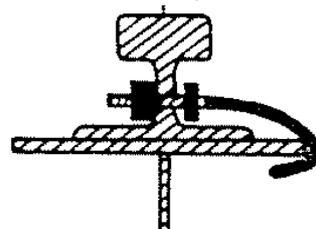
(a) aufgeschweißte Schiene (Lietmann GmbH & CO. KG, 2013).



(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).

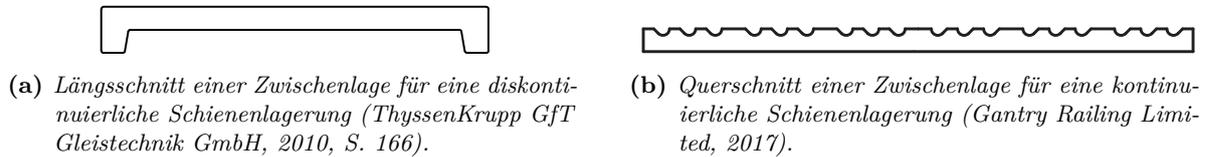


Abbildung 2.9: Zwischenlagen für diskontinuierliche und kontinuierliche Schienenlagerung.

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).

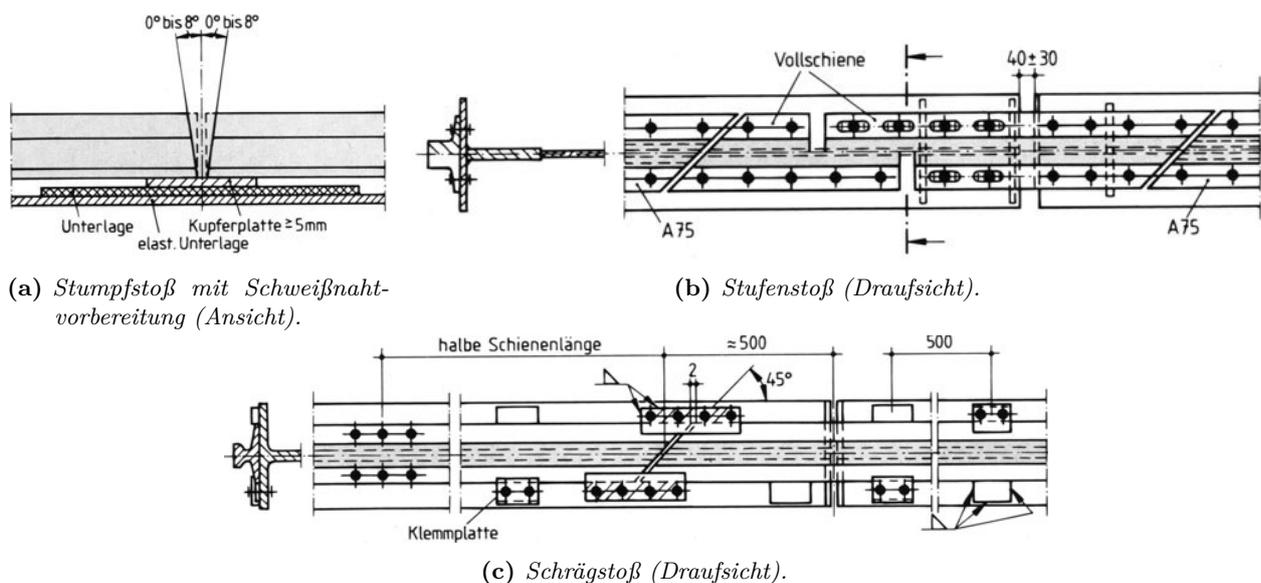


Abbildung 2.10: Schienenstöße (Thiele und Lohse, 1997, S. 129).

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).

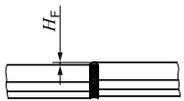
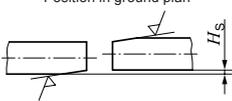
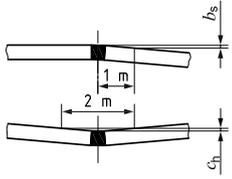
Optimale Fahreigenschaften werden mit durchgehend verschweißten Schienen erreicht, die Stand der Technik sind. Abbildung 2.10a zeigt die Schweißstoßvorbereitung eines Stumpfstoßes. Nach der Schweißung ist eine Bearbeitung des Stoßes, jedoch mindestens des Schienenkopfes, erforderlich. Die Verbindung 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 \angle	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).

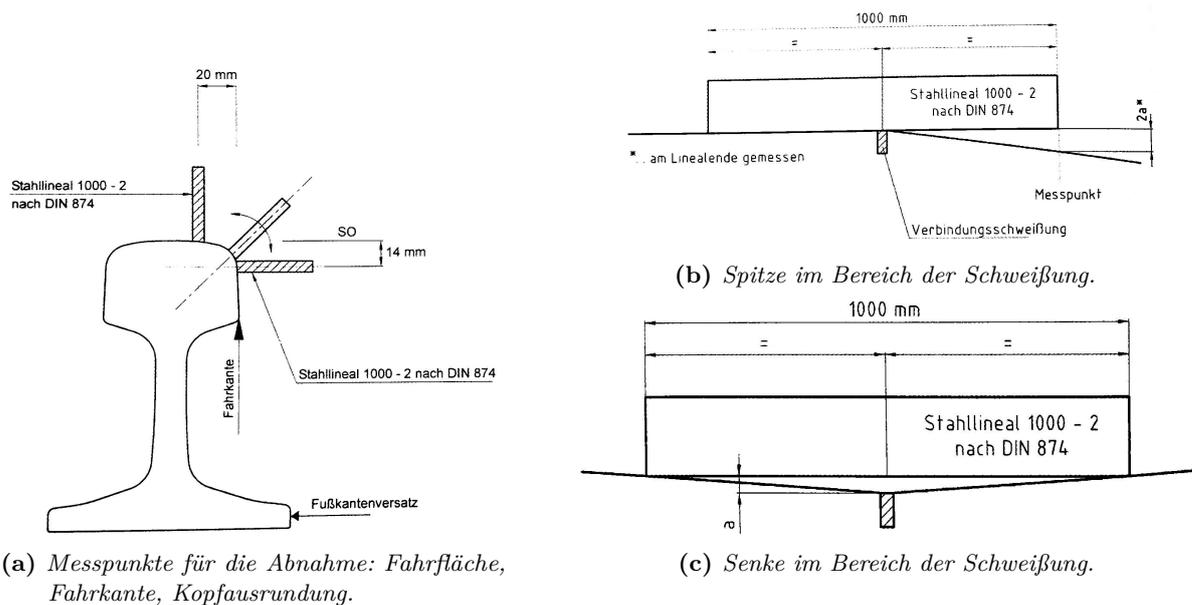


Abbildung 2.13: Durchführung einer geometrischen Abnahmemessung (Köstermann et al., 2008, S. 106).

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).

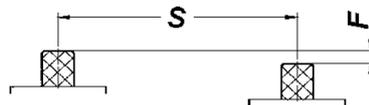


Abbildung 2.14: Toleranz „F“ für die Parallelität der Endanschläge (VDI 3576:2011-03). Die Abbildung zeigt eine Draufsicht.

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):

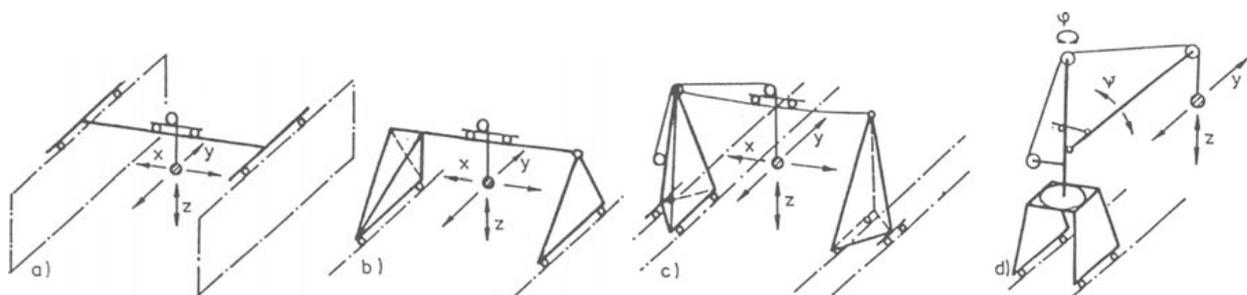


Abbildung 2.16: Brückenkran, Portalkran, Kabelkran und Drehkran (Scheffler et al., 1998).

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 „Brückenkrane, 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 Brückenkrane 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.

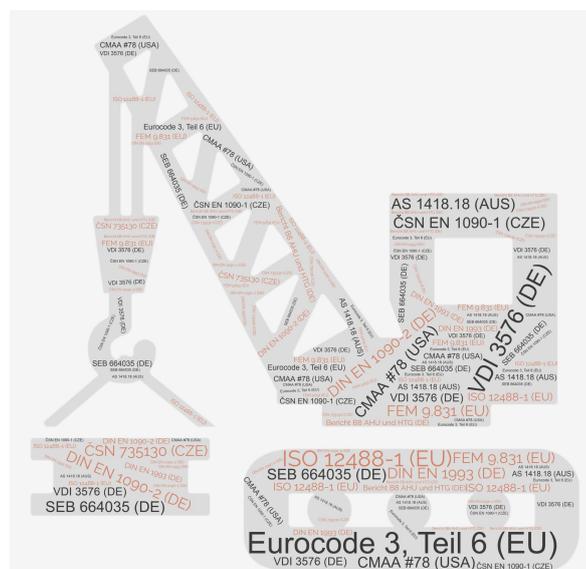


Abbildung 2.18: Wortwolke diverser nationaler und internationaler Richtlinien mit Toleranzvorgaben für die Geometrie von schienengebundenen Anlagen.

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.

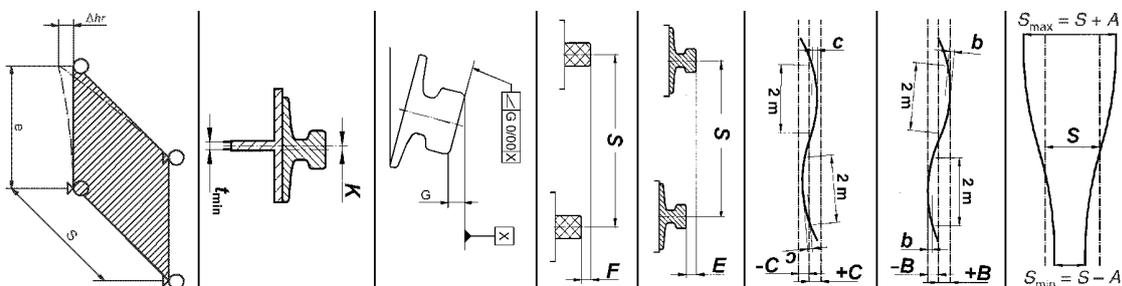


Abbildung 2.19: Darstellung von Zustandsgrößen (VDI 3576, 2011).

2.2.4 Kritische Betrachtung

Aufgrund von Harmonisierungen von Gesetzen auf europäischer Ebene besteht das Risiko, das 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 Alignement, 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.

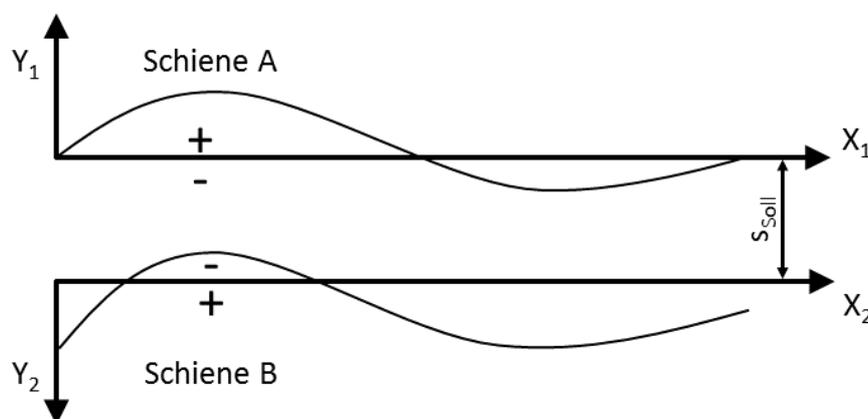


Abbildung 2.20: Koordinatensystem eines Zweischienensystems.

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.

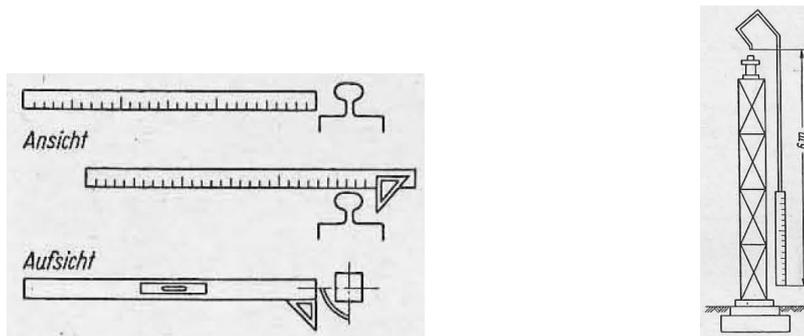
Drake empfiehlt die Herstellung von parallelen Achsen auf dem Hallenboden und neben den Schienen. Von dort können die Maße einfach festgelegt werden. Aufgrund des Sicherheitsrisikos beim Bewegen entlang der Schienen, erfolgen die Aufmaße im Bereich der Stützen von Leitern aus. Ist die Halle zugestellt,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

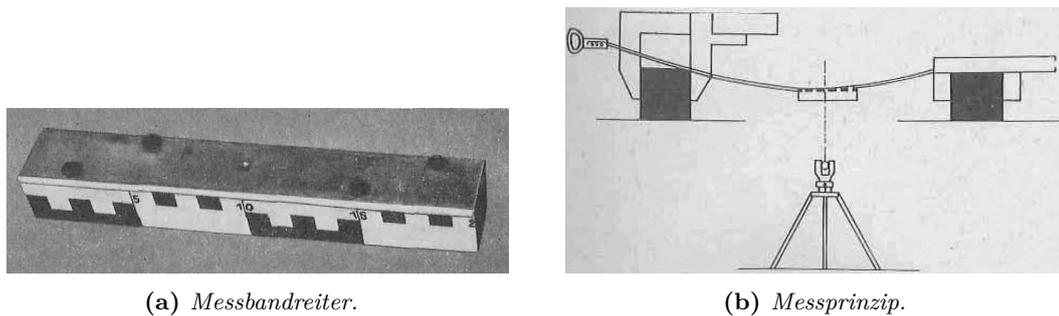


Abbildung 2.22: Das Reiterverfahren nach Eidam (1977).

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

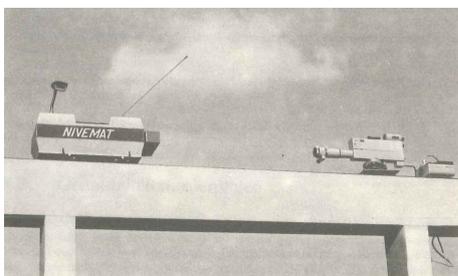
geometrischen Zustand von Kranbahn und Fahrverhalten des Krans ermöglichen. Das System wurde auf einem Kran im störungsfreien Dauerbetrieb erprobt und erreichte eine Winkelauflösung von 0,1 Winkelminuten bei einer Linearität von 0,1 %. Hannover (1980) stellt fest, dass bisher Messungen mit Lasern diskontinuierlich 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.

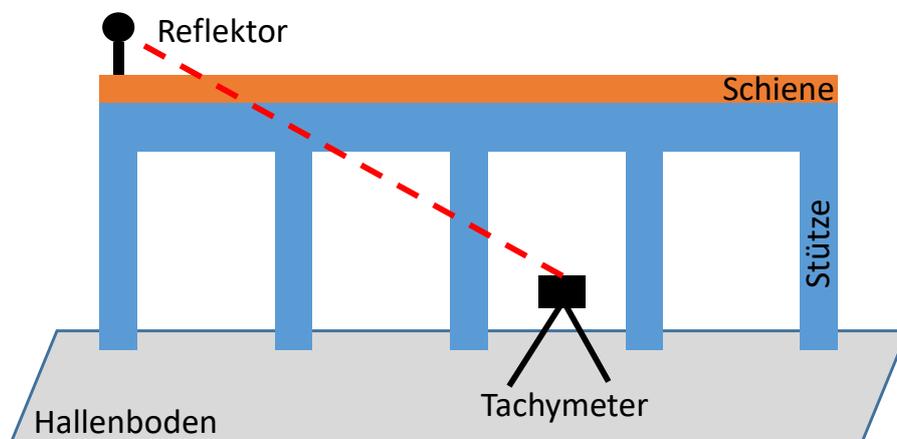


Abbildung 2.24: Kranbahnvermessung mit Tachymeter und Reflektor.

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.

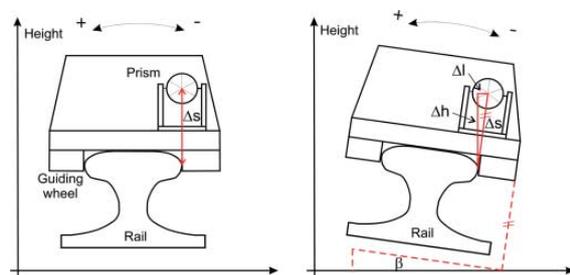
RailControl Das Kranbahnvermessungssystem RailControl (siehe Abbildung 2.25a) wurde 2006 von der ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH initiiert und gemeinsam mit dem Vermessungsbüro Hanack und Partner entwickelt. Das System zeichnet sich durch die konsequente Auslegung auf die Genauigkeit der Messergebnisse 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	1-2 mm	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 Profiltiefen		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Ferngesteuert adaptierbar auf Profiltiefe		Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	-	-
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.

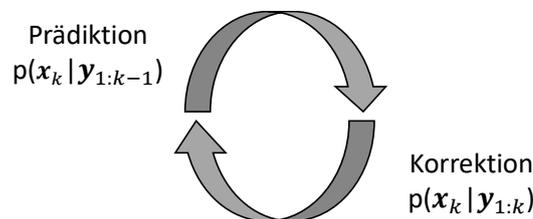


Abbildung 3.1: Rekursion von Prädiktion und Korrektur am Beispiel eines BFs.

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

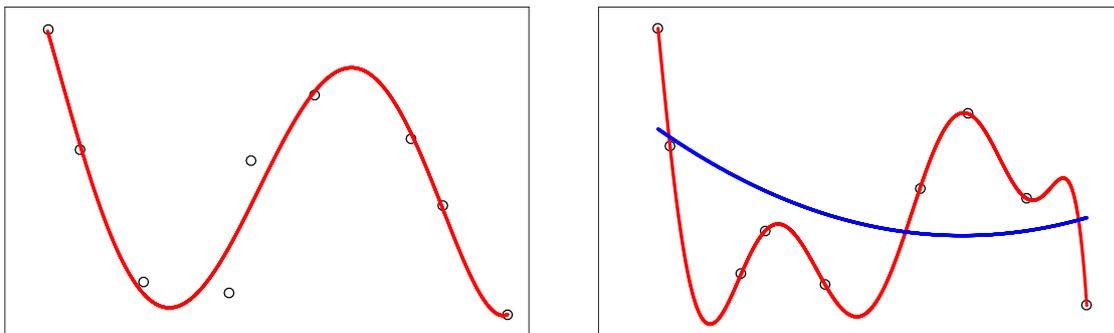


Abbildung 3.3: Verhalten von Polynomen verschiedenen Grades.

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 ($\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{y}}}$)

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

- 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.

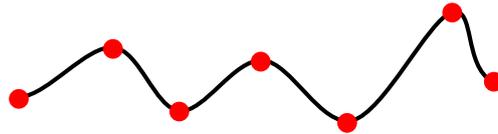


Abbildung 3.4: Darstellung der polynomialen Segmente eines Splines.

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).

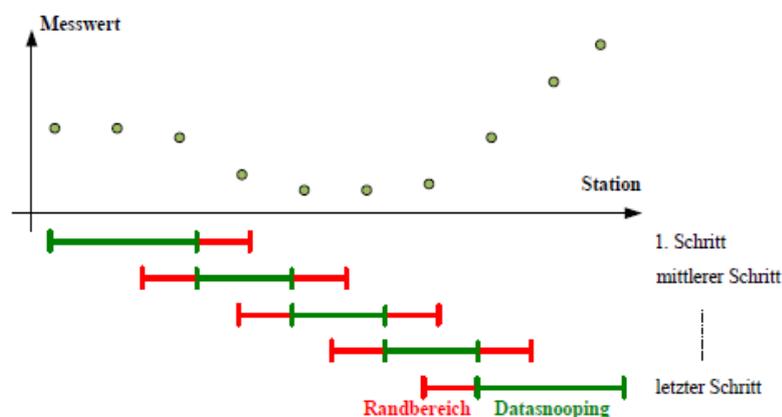


Abbildung 3.5: Prinzipdarstellung der Intervallaufteilung für das Datasnooping (Schulze, 2009, S. 46).

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).

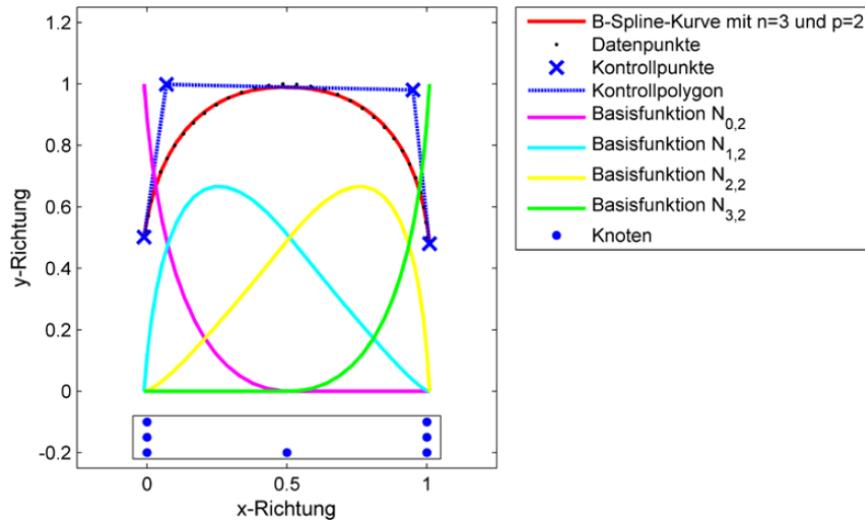


Abbildung 3.6: Beispiel für eine B-Spline Kurve und ihre Einflussparameter (Golnik, 2016).

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:

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

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

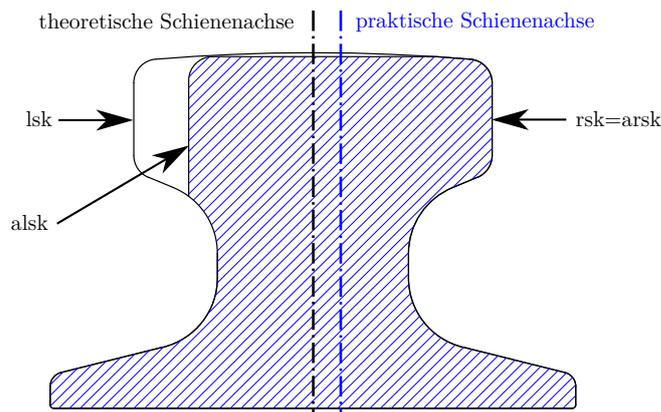
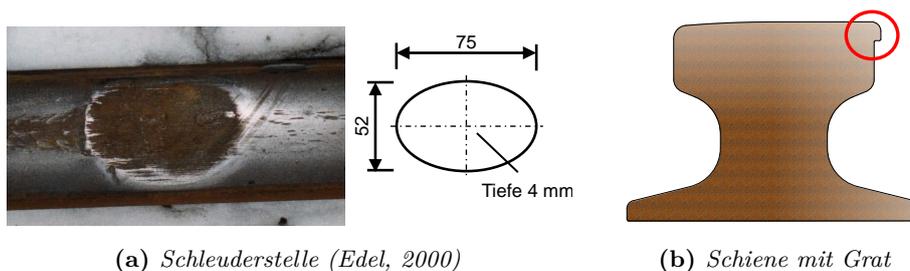


Abbildung 4.2: Querschnitt eines abgenutzten Schienenprofils (blau schraffiert) zur Darstellung der theoretischen (schwarz) und praktischen Schienenachse (blau)

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.

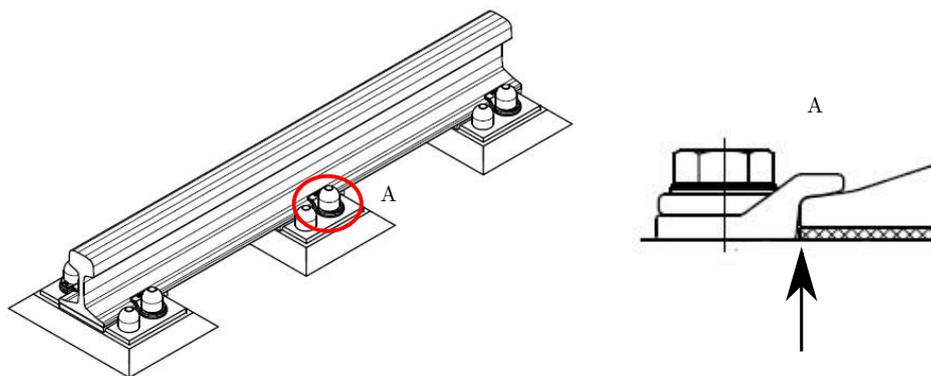


Abbildung 4.5: Kranschiene mit korrekt montierter Schienenbefestigung (ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2010)

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)).

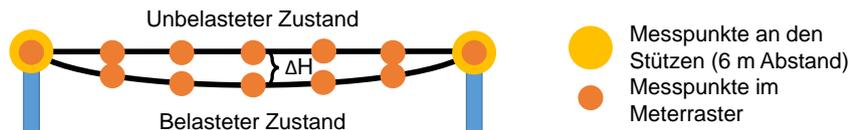


Abbildung 4.6: Vorteil einer höheren Anzahl von Messpunkten: sowohl für den unbelasteten Zustand, als auch bei einer Messung im belasteten Zustand.

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.

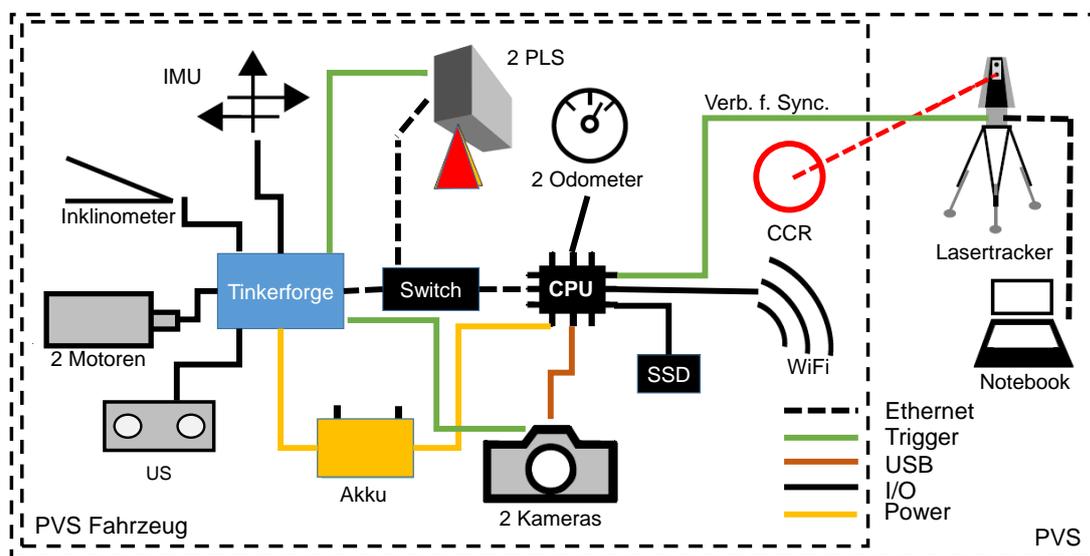


Abbildung 4.7: Hardware-Architektur des PVS. Abbildung in Anlehnung an Dennig et al. (2017)

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.

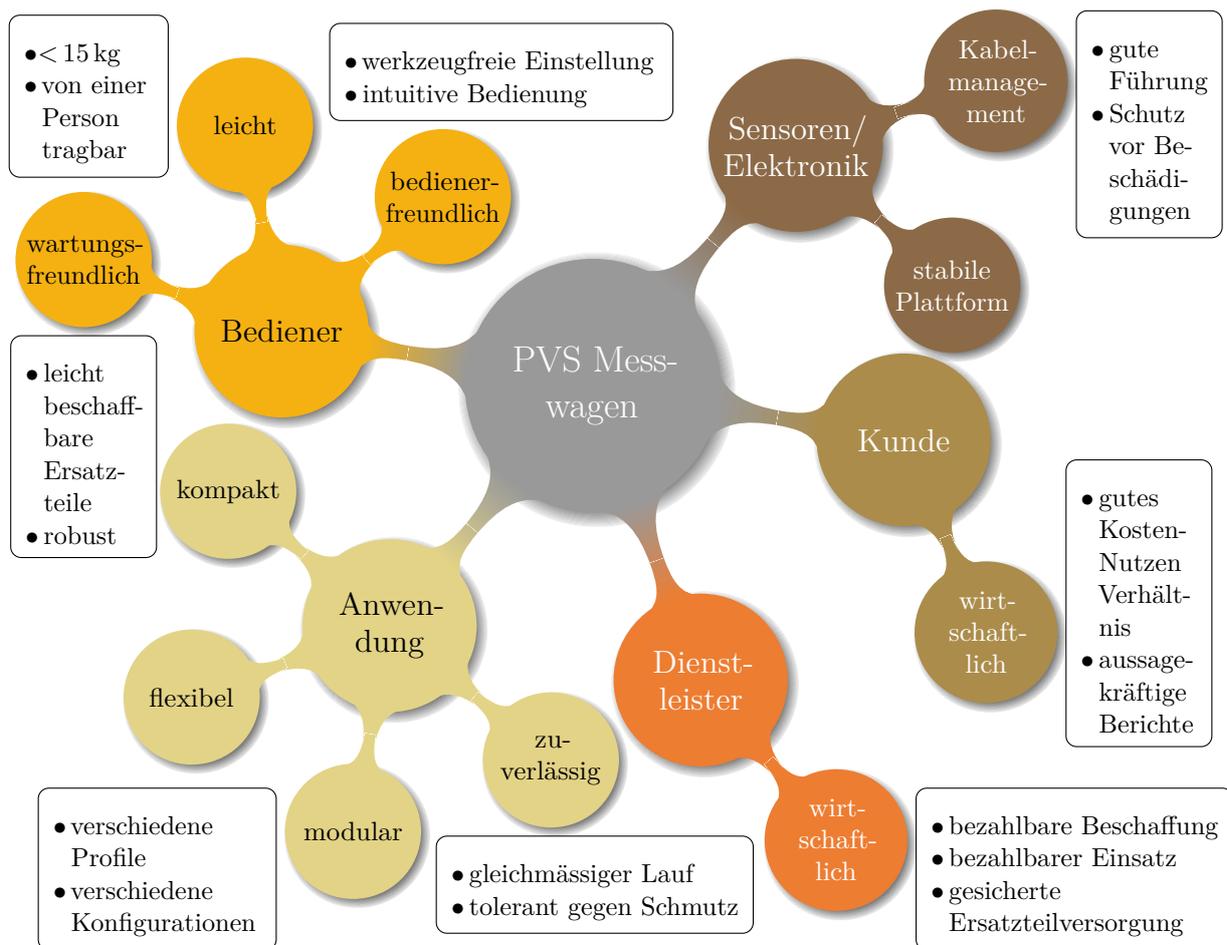


Abbildung 4.8: Anforderungen an das Fahrzeug

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.

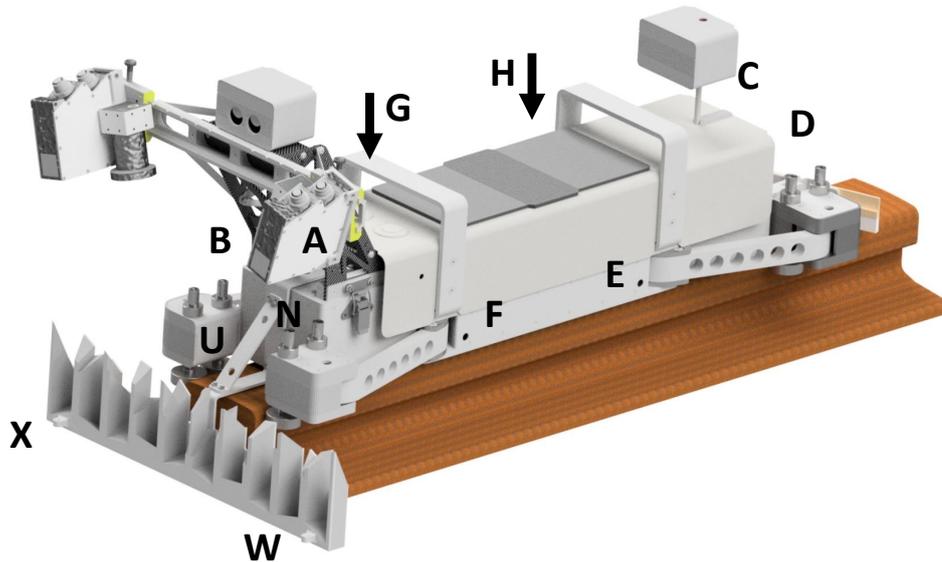


Abbildung 4.9: PVS mit Kalibrierkörper auf einer Schiene. Aufnahmepunkte für CCRs als Referenzpunkte für das Wagenkoordinatensystem mit alphanumerischer Bezeichnung.

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.

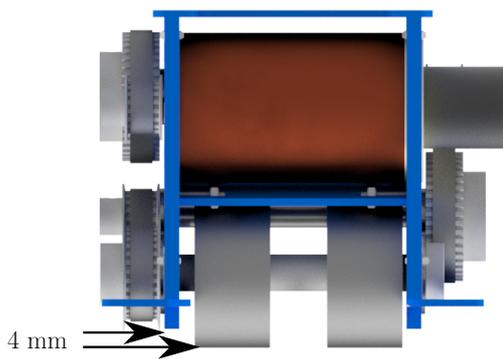
4.3.2 Antriebseinheit

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.

lineare
Führungs-
vorrich-
tung

Drehknopf

Feder

höhen-
verstellbare
Führungs-
rolle

30 mm

(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

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)

