

Ferromagnetische Inhomogenitäten zur berührungslosen Bestimmung der Geschwindigkeit und gleisselektiven Position von Schienenfahrzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Phys. Max Spindler

geb. in Würzburg

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Korreferent:

30.10.2019

Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller für die Betreuung dieser Arbeit bedanken und die Ressourcen, die er mir und meiner Forschungsarbeit zu Verfügung gestellt hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates und das damit verbundene Interesse an meiner Arbeit.

Allen Kollegen und Kolleginnen des MRT danke ich für die gute Zusammenarbeit in den letzten Jahren und die vielen anregenden Diskussionen, wissenschaftlichen Seminare, Social-Tuesdays und Projekte. Bei Herrn Dr. Martin Lauer möchte ich mich für die hervorragende Betreuung, die vielen anregenden Diskussionen, die wertvollen Hinweise in dem Bereich der Bahntechnik und die regelmäßigen Treffen bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. An dieser Stelle möchte ich ebenfalls meinem langjährigen Bürokollegen, Dr. Denis Lochner, für die Unterstützung bei diversen Testfahrten danken. Ebenso Bernd Kröper für die vielen Anmerkungen und das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Mein besonderer Danke gilt ebenfalls Andreas Schütz, Anselm Daniel, Florian Eßer und Daniel Lüdicke vom Institut für Schienenfahrzeuge (IFS), Herrn Martin Pölöskey von der Firma ARIC (Automotive and Rail Innovation Center) und Herrn Hanns-Florian Schuster von der Firma Geohaus GbR für die unbürokratische Unterstützung bei den Testfahrten mit dem IFS1 und dem gang car auf dem Prüf- und Validationcenter Wegberg-Wildenrath (PCW). Für die tägliche Unterstützung und Hilfestellung in administrativen, mechanischen und IT Angelegenheiten danke ich Sieglinde Klimesch, Erna Nagler, Alexandra Stotz, Werner Paal, Günter Barth, Goran Cicak, Marcus Hoffner, Frank-Stefan Müller und Thomas Lobe.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Lebensabschnittsgefährtin Elena Wolf, meinen Eltern Thomas und Christa Spindler und meinen Geschwistern Christine und Moritz für die großartige Unterstützung.

Karlsruhe, im December 2019

Max Spindler

Abstract

To ensure a smooth and safe operation in railway transport the knowledge of the velocity and a track-selective position of the railway vehicles is essential, especially due to the increase of digitalisation and automation in railway transport. For a completely autonomous operating railway vehicle, it is important to avoid cost-intensive modernisation of the railway track infrastructure. Instead, methods which can be used directly on the railway vehicle are necessary. The accuracy and availability of the existing on-board sensors (e. g. wheel encoders, inertial measuring unit, satellite-based positioning systems or optical methods) are not sufficient for track-selective positioning of the railway vehicle. Uncertainties due to multipath propagation, masking, availability or poor lighting conditions lead to ambiguities or even a complete loss of position. Slip between wheel and rail or wear of the wheels lead to incorrect velocities and constantly growing uncertainties in the travelled distance. So a track selective position determination in areas with several parallel tracks is no longer possible. In order to avoid the limitations of present sensors, in this work a new sensor concept is proposed. The concept is based on the ferromagnetic inhomogeneities along the railway track, which are mainly caused by the already existing track-side infrastructure elements. For example for the rails, rail fastenings, check rails, frogs, the Difference-Inductance-Sensor (DIS) was developed. Due to the arrangement of the components along the track and the system-related binding of the railway vehicle, each rail segment has a unique ferromagnetic signature. To determine the velocity of the railway vehicle, the DIS is equipped with two detectors covering the ferromagnetic inhomogeneities of the rails by means of an electromagnetic measuring method. The velocity of the railway vehicle results from the time delay of the signatures and the distance between the detectors. At the same time, the ferromagnetic inhomogeneities of the rails serve as landmarks. Each track section in the railway network can be uniquely identified, thus providing a track-selective method for position determination. The procedure was evaluated under controlled laboratory conditions as well as on a georeferenced test track. Here, the determination of the velocity and the location procedure was tested using only the DIS. The velocity and position

deviation of the DIS to the reference sensors has the same order of magnitude as the deviation of the two reference sensors from each other. The velocity deviation is less than $|0.5|$ m/s, that of the position less than $|1.0|$ m to the reference sensors. In addition, the DIS and the ferromagnetic inhomogeneities of the railway provide a track-selective position of the rail vehicle. A model is used to determine the maximum length of ferromagnetic inhomogeneities of 200 m, which is required for a unique comparison with the ferromagnetic track map. An optimization procedure is presented, which improves the search on extended ferromagnetic track maps and simultaneously reduces the amount of data to be stored. With the completely self-sufficient operating DIS, the velocity as well as the track-selective position with a ferromagnetic track map is provided. Based on the ferromagnetic inhomogeneities, the DIS is able to clearly distinguish between the left and right rail of a track segment. In contrast to satellite-based localization methods, parallel or closely spaced rail segments can be clearly distinguished from each other by means of the ferromagnetic signature. This means that track selectivity is no longer limited by the spatial proximity of the tracks. Compared to the previous methods, the DIS and the ferromagnetic inhomogeneities of the railway track ensure a continuous and track-selective position determination of the railway vehicle, which are not restricted to individual sections in the vicinity of switches or balises. With an absolute position accuracy of less than 1.0 m and a velocity deviation of less than 0.5 m/s, the DIS meets the requirements of modern traffic management and control systems. The DIS is thus able to replace a satellite-based localization method or to complement it by the complementary measurement method. Ambiguities in the track occupancy of the railway vehicle, due to uncertainties in the position, are omitted.

Kurzfassung

Mit der zunehmenden Digitalisierung und Automatisierung des Schienenverkehrs ist die Kenntnis der Geschwindigkeit und der gleisselektiven Position der Schienenfahrzeuge grundlegend, um einen reibungsfreien und sicheren Betriebsablauf zu gewährleisten. Für einen vollständig autonomen Betriebsablauf sind insbesondere Verfahren erforderlich, die auf dem Schienenfahrzeug zum Einsatz kommen und dadurch kostenintensive Modernisierungen der streckenseitigen Infrastruktur umgehen. Für eine gleisselektive Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs reichen Genauigkeit und Verfügbarkeit der bisherigen fahrzeugseitigen Sensoren (Radencoder, Inertiale Messeinheit, satellitengestützte Positionierungssysteme oder optische Verfahren) nicht aus. Unsicherheiten aufgrund von Mehrwegausbreitung, Verdeckung, geringer Verfügbarkeit, Ausfällen oder schlechte Lichtverhältnissen führen zu Mehrdeutigkeiten oder einem kompletten Verlust der Position. Schlupf zwischen Rad und Schiene oder Verschleiß des Rades führen zu fehlerhaften Geschwindigkeiten und stetig wachsenden Unsicherheiten in der zurückgelegten Wegstrecke. Insbesondere in Bereichen mit mehreren parallel zueinander verlaufenden Gleisen ist eine gleisselektive Positionsbestimmung nicht mehr möglich.

Um die Einschränkungen aktueller Sensoren zu umgehen, wird in dieser Arbeit ein neues Sensorkonzept vorgeschlagen. Basierend auf den ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Gleisstrecke, die maßgeblich durch die bereits vorhandenen streckenseitigen Infrastrukturelemente, darunter die Schienen, Schienenbefestigung, Radlenker und Herzstücke, verursacht werden, entstand der *Differenz-Induktivitäts-Sensor* (DIS). Durch die systembedingte Bindung des Schienenfahrzeugs und die Anordnung der Bauelemente entlang der Gleisstrecke besitzt jedes Schienenelement eine einzigartige ferromagnetische Signatur. Um daraus die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs zu ermitteln, ist der DIS mit zwei Detektoren ausgestattet, die über ein elektromagnetisches Messverfahren berührungslos an zwei unterschiedlichen Positionen die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schienen erfassen. Aus dem zeitliche Versatz der Signaturen und dem Abstand der Detektoren ergibt

sich die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs. Gleichzeitig dienen die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schienen als Landmarken, mit denen jeder Streckenabschnitt im Streckennetz eindeutig identifizierbar ist. Dadurch wird ein gleisselektives Verfahren bereitgestellt, um die Position des Schienenfahrzeugs zu bestimmen. Unter kontrollierten Laborbedingungen und auf einer georeferenzierten Teststrecke wird die Erstellung der ferromagnetischen Streckenkarten, die Bestimmung der Geschwindigkeit und das Lokalisierungsverfahren unter alleiniger Verwendung des DIS evaluiert. Die Abweichung in der Geschwindigkeit und Position des DIS zu den Referenzsensoren liegt dabei in derselben Größenordnung wie die Abweichungen der beiden Referenzsensoren zueinander. Die Abweichung der Geschwindigkeit beträgt weniger als $|0,5|$ m/s, die der Position weniger als $|1,0|$ m, zu der Referenzsensorik. Zusätzlich liefert der DIS über die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs. Über ein Modell wird eine maximale Länge der ferromagnetischen Inhomogenitäten von 200 m ermittelt, die für einen eindeutigen Abgleich mit der ferromagnetischen Streckenkarte erforderlich ist. Zusätzlich wird ein Optimierungsverfahren vorgestellt, mit dem der Abgleich auf ausgedehnten Streckenkarten beschleunigt und gleichzeitig die zu speichernde Datenmenge der ferromagnetischen Streckenkarten reduziert wird.

Mit dem vollständig autark operierenden DIS ist es nun möglich, berührungslos die Geschwindigkeit und die gleisselektive Position mit einer ferromagnetischen Streckenkarte zu ermitteln. Anhand der ferromagnetischen Inhomogenitäten ist der DIS in der Lage, die linke und rechte Schiene eines Gleissegmentes eindeutig voneinander zu trennen. Im Gegensatz zu satellitengestützten Lokalisierungsverfahren sind parallel verlaufende oder nah beieinander liegende Schienensegmente eindeutig unterscheidbar. Die Gleisselektivität ist dadurch nicht mehr durch die räumliche Nähe der Gleise beschränkt. Im Vergleich zu den bisherigen Verfahren ist mit dem DIS und den ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene eine kontinuierliche und gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs gegeben und nicht auf einzelne Abschnitte in der Nähe von Weichen oder Balisen beschränkt. Mit einer absoluten Positionsgenauigkeit von unter einem Meter und einer Geschwindigkeitsabweichung von weniger als 0,5 m/s erfüllt der DIS die Anforderungen moderner Verkehrsmanagement- und Kontrollsysteme. Der DIS ist dadurch in der Lage, ein satellitenbasiertes Lokalisierungsverfahren zu ersetzen oder dieses über das komplementäre Messverfahren sinnvoll zu ergänzen. Mehrdeutigkeiten in der Gleisbelegung des Schienenfahrzeugs aufgrund von Unsicherheiten in der Position entfallen.

Inhaltsverzeichnis

Notationen und Symbole	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Stand der Forschung	4
1.4 Relevante Arbeiten	6
1.5 Aufbau der Arbeit	7
2 Sensorkonzept	11
2.1 Anforderungen an die Sensorik	11
2.2 Messung ferromagnetischer Merkmalspunkte und Landmarken	12
2.3 Messprinzip	14
2.4 Vorzüge des DIS	15
2.4.1 Einkopplung der Messfrequenz	17
2.4.2 Bestimmung der Laufzeitdifferenz	17
2.4.3 Auswertung der Laufzeitdifferenz	18
2.5 Ergebnisse der simulierten Messschaltung	19
2.6 Ergebnisse der realen Messschaltung	21
2.7 Signalfilterung	23
2.7.1 Wavelet-Transformation	25
2.7.2 Diskrete Wavelet-Transformation	25
2.7.3 Wavelet-Koeffizienten	31
2.8 Fazit Sensorkonzept	31
3 Geschwindigkeitsmessung	33
3.1 Prinzip der Geschwindigkeitsmessung	34
3.2 Versuche am Schienenprüfstand	39
3.2.1 Fahrtrichtungserkennung	40

3.2.2	Einfluss der Montageposition auf die Geschwindigkeitsbestimmung	42
3.2.3	Geschwindigkeitsmessungen auf dem Schienenprüfstand	43
3.2.4	Fazit Schienenprüfstand	44
3.3	Feldversuche	45
3.3.1	Versuchsaufbau und Referenzsensorik	46
3.3.2	Versuchsfahrten	48
3.3.3	Geschwindigkeitsmessungen im Feldversuch	48
3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	53
4	Kartierung und Positionsbestimmung	55
4.1	Erstellung der ferromagnetischen Streckenkarte	56
4.2	Absolute Positionsbestimmung mit dem DIS	61
4.3	Aktualisierung der ferromagnetischen Streckenkarte	62
4.4	Versuchsaufbau zur Evaluation der Positionsbestimmung mit dem DIS	62
4.4.1	Kombinierter Ansatz	65
4.4.2	Stand-Along-Ansatz	66
4.4.3	Relative Positionsgenauigkeit des DIS	68
4.4.4	Ergebnisse der ferromagnetischen Lokalisierung	69
4.5	Zusammenfassung Lokalisierung	70
5	Modell der ferromagnetischen Streckensignatur	73
5.1	Vereinfachung der ferromagnetischen Signalstruktur	74
5.2	Abschätzung der ferromagnetischen Signallänge	76
5.2.1	Maximale Templatelänge	79
5.2.2	Speichergröße der ferromagnetischen Streckenkarte	80
5.3	Erweitertes Lokalisierungsverfahren	81
5.3.1	Wavelet-basiertes Lokalisierungsverfahren	82
5.4	Simulationsaufbau	83
5.4.1	Abgleich idealer Signaturen	83
5.4.2	Abgleich fehlerbehafteter Signaturen	84
5.4.3	Maximale Templatelänge	85
5.4.4	Ergebnisse aus den Simulationen	86
5.5	Zusammenfassung	87

6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	89
6.1 Zusammenfassung	89
6.2 Fazit	90
6.3 Ausblick	92
A Induktivitätsmessung	93
A.1 Phasenverschiebung	93
A.2 Erzwungene elektrische Schwingung	96
A.3 Bestückungsplan der Messschaltung	100
A.4 Montageposition des DIS	101
A.5 Modell der ferromagnetischen Inhomogenitäten	102
A.6 Safety Integrity Level SIL	103
B Ferromagnetische Signaturen	105
Literaturverzeichnis	111
Veröffentlichungen des Autors	119

Notationen und Symbole

Akronyme

4G	4th Generation (mobile phone generations)
5G	5th Generation (mobile phone generations)
AMR	Anisotropic Magneto-Resistance
ABA	Achslagerbeschleunigung
ARM	Advanced RISC Machines
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIS	Differenz-Induktivitäts-Sensor (engl. Difference-Inductance-Sensor)
DPMM	Dirichlet Process Mixture Model
DWT	Diskrete Wavelet-Transformation
ECS	Eddy Current Sensor
EEG	Elektroenzephalogramm
EN	Europäische Norm
ESSR	European Space Software Repository
ETCS	European Train Control System
GND	Ground
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSM-R	Global System for Mobile Communications-Railway
HAL	Hardwareabstraktionsschicht
IDWT	Inverse Diskrete Wavelet-Transformation
IMU	Inertial Measurement Unit
IR	Infrarot
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
LASER	Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation
LST	Leit- und Sicherheitstechnik
LIDAR	Light Detection and Ranging
LTE	Long-Term Evolution

LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
MCU	Microcontroller Unit
PCW	Prüf- und Validationscenter Wegberg-Wildenrath
PWM	Pulse-Width Modulation
PZB	Punkt förmige Zugbeeinflussung
RAMS	Reliability Availability Maintainability Safety
SIL	Safety Integrity Level
STFT	Short-Time-Fourier-Transformation
THR	Tolerierbare Gefährdungsrate
TS15	Leica Viva TS15
USB	Universal Serial Bus
UTM	Universal Transverse Mercator
VCS	Version Control System
VM	Virtual Machine
WLAN	Wireless Local Area Network
ZNCC	Zero Mean Normalized Cross Correlation

Allgemeine Notationen

Skalare	nicht fett, kursiv:	a, b, c, \dots
Vektoren	fett, nicht kursiv	$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \dots$
Matrizen	fett, nicht kursiv, groß:	$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$
Konstanten	nicht kursiv:	a, b, c, \dots

Symbole und Konstanten

L	Induktivität der Spule
L_G	Grundinduktivität der Spule
ΔL	Induktivitätsänderung
μ_0	Magnetische Feldkonstante
μ_r	Permeabilitätszahl
N	Windungen der Spule
A	Querschnittsfläche der Spule
R	Widerstand
C	Kapazität

U	Spannung
I	Stromstärke
ω	Kreisfrequenz
X_L	Blindwiderstand der Induktivität
X_C	Blindwiderstand der Kapazität
l_s	Länge der Spule
Δt	Laufzeitdifferenz
Z	Zählerwert
f_Z	Zählerfrequenz
$\varphi_{u,i}$	Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke
Δt_{\min}	Minimale Laufzeitdifferenz
φ_{\min}	Minimale Phasenverschiebung
π	Kreiszahl
f_0	Messfrequenz
h	Skalierungskoeffizient
g	Waveletkoeffizient
W	Wavelet-Matrix (DWT)
R	Wavelet-Rücktransformationsmatrix (IDWT)
a	Approximationskoeffizient
d	Detailkoeffizient
d'	Wavelet gefilterte Detailkoeffizient
v	Messpunkt
$f_{a,l}, f_{d,l}$	Frequenzbänder
f_s	Nyquist-Frequenz
$f_{\text{soft}}(\cdot)$	Wavelet shrinkage Funktion
w	Waveletgefilterte Koeffizienten
l_{\max}	Maximales Level
RC	Korrelationskoeffizient
μ_{RC}	Durchschnittlicher Korrelationskoeffizient
τ	Zeitlicher Versatz
d	Abstand der Detektoren
v	Geschwindigkeit
ΔT^*	Min-Max normierte Laufzeitdifferenz
α_n	Gewichtungsfaktor
S_T	Elementlänge des Templates
σ_I, σ_T	Standardabweichungen des Template- und Imagesignals

I, T	Signalkomponenten des Image- und Templatesignals
\bar{I}, \bar{T}	Mittelwertfreie Signalkomponenten des Image- und Templatesignals
$f_i(\cdot)$	Interpolationsfunktion
x_{\max}	Maximaler Wert der Funktion
t_I, t_T	Startzeit des Image- und Templatesignals
t	Zeit
\bar{D}'	Diskretisierte und normierte ortsdiskrete Signalstruktur
D'	Kontinuierlicher und normierter ferromagnetischer Signalverlauf des n -ten Elements
$\Delta D'$	Superposition der ortsdiskreten ferromagnetischen Streckenkarten
L	L-Zustand
H	H-Zustand
$L(X)$	Länge des Zustandes X
L_n	n -tes Element des L-Zustand
H_n	n -tes Element des H-Zustand
s, s^+	Skalierungsfaktoren
l_v	Versatz
k	Kompressionsrate
l	Level
$P(X)$	Eintrittswahrscheinlichkeit von X
$N(X)$	Eintrittshäufigkeit von X
α	Signifikanzniveau
$Z(\cdot)$	Testprüfgröße
p	Signifikanzwert
H_B, L_B, K_B	Anzahl der Zeichen (H-Zustand, L-Zustand, Streckenkarte)
A_H, A_L	Eingeschlossene Flächen der ferromagnetischen Signalstruktur
T_L, T_{\max}^*, T_L^+	Längen des Templates
d_s	Auflösung der Streckenkarte
w_l	Index der maximalen Übereinstimmung mit dem Approximationskoeffizienten
ΔD	Positionsunsicherheit
ΔD_{\max}	Maximale Positionsunsicherheit
ΔP	Abweichung zur Referenzposition

1 Einleitung

Das markanteste Merkmal spurgeführter Fahrzeuge besteht in der Bindung des Fahrzeugs an die Fahrbahn. Für Schienenfahrzeuge ist dies durch das Gleis – zwei parallel zueinander verlaufende Stahlschienen – gegeben. Werden Gleise über Weichen miteinander verbunden, entsteht ein ausgedehntes Streckennetz, auf dem sich die Schienenfahrzeuge fortbewegen. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Gleisen und der bisherigen technischen Umsetzung der Leit- und Sicherheitstechnik (LST), die zur Absicherung der Gleisstrecke eingesetzt wird, ist ein erhöhtes Verkehrsaufkommen mit einer Modernisierung der Gleisinfrastruktur und somit erheblichen Kosten verbunden. Um auch in Zukunft ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zu bewältigen, besteht eine Möglichkeit darin, den Durchsatz auf der Gleisstrecke durch Steigerung der Taktrate der Schienenfahrzeuge zu erhöhen. Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebsablaufes werden neue Ansätze, unter anderem für die Geschwindigkeits- und gleisselektive Positionsbestimmung der Schienenfahrzeuge, benötigt. Die Konzeptionierung und Bereitstellung eines bordautonomen Verfahrens für die Geschwindigkeits- und gleisselektive Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen wird in dieser Arbeit realisiert.

1.1 Motivation

Der Verkehrsträger Schiene ist ein essenzieller Bestandteil für die Beförderung von Personen und den Transport von Gütern. Dies gilt insbesondere für große und schwere Nutzlasten, die über weite Strecken hinweg befördert werden. Durch die vorgegebene Wegstrecke (Trasse) ist die Haft- bzw. Gleitreibung¹ zwischen den Stahlrädern und der Stahlschiene um den Faktor 10 geringer als zwischen Gummireifen und Asphalt. Auf der einen Seite sinkt dadurch der benötigte Energieaufwand für den Transport, erhöht aber gleichzeitig den

¹ Stahl auf Stahl: Haftreibungszahl $\mu_{HR} = 0,15$; Gleitreibungszahl $\mu_{GR} = 0,03$ bis $0,09$ [1].

Bremsweg des Schienenfahrzeugs. Fahren auf Sicht ist dadurch im Regelbetrieb nicht möglich. Trotz dieser Einschränkung zählt der Schienenverkehr mit 2,7 Verletzten und 0,04 Toten pro eine Milliarde Personenkilometer – im Vergleich zu dem Personenkraftwagen (Pkw) mit 275,8 Verletzten und 2,93 Toten pro eine Milliarde Personenkilometer (Stand 2010) in Deutschland – zu den sichersten Verkehrsmitteln [2]. Dies wird erreicht, indem streckenseitige Sicherungssysteme zum Einsatz kommen. Signale, Balisen, Achszähler, Gleisfreimeldeanlagen entlang der Gleisstrecke und das Fahren im Blockabstand² gewährleisten einen sicheren Betriebsablauf, indem die Gleisstrecke für jedes Schienenfahrzeug abgesichert wird [3]. Über die Länge des Blockabstandes und die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist der maximale Durchsatz des Streckenabschnittes gegeben. Aufgrund der stetig steigenden Verkehrsnachfrage, des Ausbaus des multimodalen Mobilitätsangebots, der Reduktion der CO₂-Emissionen und der Entlastung der Straßen ist eine Zunahme des Schienenverkehrs und eine Verlagerung des Verkehrsaufkommens auf die Schiene erforderlich. Um nicht den Anschluss zu verlieren, ist es notwendig, die bestehende Infrastruktur effizienter zu nutzen, Kosten zu senken und die Zuverlässigkeit sowie die Verfügbarkeit über moderne Verkehrsmanagement- und Kontrollsysteme zu regeln [4].

Zur Bewältigung des immer stärker anwachsenden Verkehrsaufkommens ist es erforderlich, die bestehende Streckeninfrastruktur effizienter auszulasten. Eines der erfolgversprechendsten Ansätze stellt dabei der Wechsel vom festen Blockabstand auf den wandernden Raumabstand dar. Dabei wandert der zu sperrende Streckenabschnitt mit dem Schienenfahrzeug [5] und ermöglicht dadurch eine dichtere Taktung der Schienenfahrzeuge.

Unter Berücksichtigung der zunehmenden Digitalisierung und Automatisierung des Schienenverkehrs ist die Kenntnis der exakten Geschwindigkeit und Position des Schienenfahrzeugs ein essenzieller Bestandteil, um einen sicheren und reibungsfreien Betriebsablauf zu gewährleisten [6]. Auf Basis dieser Informationen werden Entscheidungen gefällt und Situationen bewertet, die das automatische Schienenfahrzeug anschließend umsetzt. Durch die Verlagerung der Sicherungssysteme auf das Schienenfahrzeug ist ein Abbau der streckenseitigen Infrastruktur möglich, wodurch die Kosten bei der Installation und Instandhaltung gesenkt werden. Um auch in Zukunft einen effizienten und sicheren Betriebsablauf zu gewährleisten, sind neue Verfahren und Ansätze in den

² Der Blockabstand oder Streckenblock sperrt den dazugehörigen Streckenabschnitt für die anderen Schienenfahrzeuge.

Bereichen der Geschwindigkeits- und Positionsbestimmung erforderlich. In dieser Arbeit wird ein berührungsloses und bordautonomes Sensorsystem für die Geschwindigkeits- und gleisselektive Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen vorgestellt, welches den Anforderungen moderner Zugbeeinflussungs- und Zugsicherungssystemen entspricht.

1.2 Problemstellung

Eine exakte Geschwindigkeits- und gleisselektive Positionsbestimmung, die auf dem Schienenfahrzeug zum Einsatz kommt, ist mit den bisherigen Sensoren nicht gegeben und wird aus Mangel entsprechender Alternativen über die streckenseitige Infrastruktur (Balisen, LZB, PZB etc.) realisiert. Momentan wird über Drehgeber (Radencodier), die an der Motorwelle oder an einer mitlaufenden Achse befestigt sind, die Geschwindigkeit und die zurückgelegte Wegstrecke auf dem Schienenfahrzeug ermittelt. Aufgrund von Schlupf zwischen Rad und Schiene und der Verringerung des Radumfangs durch Verschleiß der Räder ist die gemessene Relativgeschwindigkeit zur Trasse und die ermittelte zurückgelegte Wegstrecke mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Infolgedessen steigt die Unsicherheit der Position des Schienenfahrzeugs trotz einer vorab bekannten Wegstrecke und der Kenntnis der Weicheinstellungen im Gleisnetz kontinuierlich an. Eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs ist bereits nach kürzester Zeit nicht mehr gegeben und erfüllt dadurch nicht die Anforderung moderner Zugbeeinflussungs- und Zugsicherungssysteme [7]. Erst durch neue Fertigungstechniken im Bereich der Mikroelektronik und der Massenfertigung entstanden kostengünstige Alternativen, die im Bahnbereich eingesetzt werden konnten. Satellitengestützte Positionierungssysteme³ (GNSS) in Verbindung mit Trägheitsnavigationssystemen (IMUs) sind ein Beispiel für die fahrzeugseitige Bestimmung der absoluten Position. Unabhängig von dem Betriebszustand des Schienenfahrzeugs oder der Weichenstellung werden Abweichungen zu dem vorgegebenen Fahrweg erkannt und folglich die Zuverlässigkeit und Sicherheit im Schienennetz erhöht. Durch die kostengünstige

³ Diese umfassen das US-amerikanische GPS, das europäische Galileo, das chinesische BeiDou und das russische GLONASS.

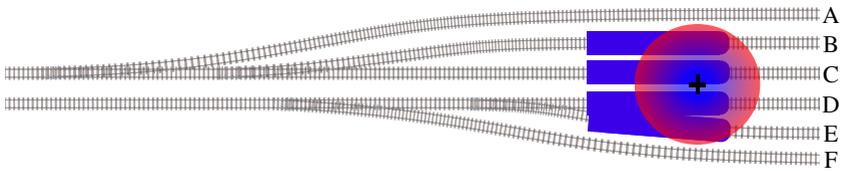


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Positionsunsicherheit von satellitengestützten Lokalisierungsverfahren. Eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs ist nicht gegeben. Die Positionshypothesen verteilen sich primär auf die Streckenabschnitte B, C, D und E.

Sensorik⁴ stellen GNSS-basierte Verfahren häufig die Grundlage aktueller Forschung [8], [9] im Bereich der Selbstlokalisierung von Schienenfahrzeugen dar. Mehrwegeausbreitung, Abschattung der Satellitensignale in urbanen Gebieten, Wäldern, Bahnhöfen oder in Tunneln beeinträchtigen die Verfügbarkeit und erhöhen die Unsicherheiten in der Positionsgenauigkeit und Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs. Bereits kleinste Abweichungen, die in der Größenordnung der Messunsicherheit der Sensoren liegen, können zu schweren Unfällen führen. Selbst die Kombination aus Radencoder, IMU und GNSS sind nicht ausreichend, um eine gleisselektive Position und dadurch einen sicheren Betriebsablauf auf Streckenabschnitten mit mehreren parallel zueinander verlaufenden Gleisen zu gewährleisten (vgl. Abbildung 1.1). Trotz der vielfältigen Möglichkeiten und der einfachen Handhabung konnten sich GNSS-basierte Lokalisierungsverfahren in der Bahnindustrie bisher nicht durchsetzen [9], [10].

1.3 Stand der Forschung

Um die Schwächen der satellitengestützten Positionsbestimmung zu kompensieren, werden ortsfeste Strukturen, bspw. Stahlbrücken, Bahnübergänge, Gebäude oder benachbarte Gleise, als Landmarken verwendet [11], [12], [13], [14], [15]. Die immanenten Eigenschaften der Gleisstrecke, darunter die Krümmungen, verschiedene Weichenbauteile, Überhöhungen- und Unebenheiten der

⁴ Die Entwicklung und Bereitstellung der gesamten Infrastruktur sowie die laufenden Kosten werden dabei nicht berücksichtigt.

Tabelle 1.1: Übersicht der gebräuchlichsten Sensoren für die inkrementelle (I) und absolute (A) Bestimmung der Position und Geschwindigkeit von Schienenfahrzeugen. Dargestellt wird eine qualitative Gegenüberstellung der Positionsgenauigkeit, des Aufwands bei der Inbetriebnahme und der Erstellung der Karten, der Verfügbarkeit und der Witterungsbeständigkeit.

Sensor	Beitrag zur Lokalisierung	Ink./Abs. Pos.	Genauigkeit	Aufwand	Verfügbarkeit	Witterungseinfluss
Radencoder	misst Geschwindigkeit/Wegstrecke	I	gering	gering	hoch	hoch
IMU	misst Beschleunigungen/Drehraten	I	gering	gering	hoch	hoch
Doppler-Radar	misst Geschwindigkeit/Wegstrecke	I	gering	gering	mittel	mittel
ECS	misst Schienenbefestigungen	I/(A)	mittel	mittel	mittel	hoch
GNSS	ermittelt geographische Koordinaten	A	mittel	hoch	mittel	hoch
LIDAR	erkennt Strukturen (Schienen, Weichen)	A	hoch	mittel	mittel	gering
Kamera	erkennt Strukturen/Objekte	A	hoch	mittel	mittel	mittel
Balise	stellt Informationspunkte bereit	A	hoch	gering	gering	hoch
DIS	misst ferr.-mag. Inhomogenitäten	A & I	hoch	gering	hoch	hoch

Schienen besitzen eine ausreichende Struktur, um die Position des Schienenfahrzeugs bestimmen zu können [12], [16], [17]. Die wichtigsten fahrzeugseitigen Sensoren, die zur Bestimmung der Geschwindigkeit und der Position für Schienenfahrzeuge verwendet werden, sind u. a. Doppler-Radar [18], [19], Light Detection and Ranging (LIDAR) [11], [20], Kamera [15], [21], [22], Wirbelstromsensor (ECS) [16], [17], [23], [24], Anisotropic Magneto-Resistance (AMR) Sensoren [12], [25], Balisen, Punktförmige/Linienförmige Zugbeeinflussung (PZB/LZB) [3], Radio Frequency Identification (RFID)-Tags [26], inertielle Messeinheit (IMU) [27], [28], [29], [30], [31]. Eine kontinuierliche Geschwindigkeits- und gleisselektive Positionsbestimmung auf Basis einer flächendeckenden Installation streckenseitiger Infrastrukturelemente entfällt aufgrund der hohen Installations- und Instandhaltungskosten der Hardware. PZB/LZB, Balisen oder RFID-Tags entlang der Gleisstrecke stellen deshalb keine realistische Alternative für zukünftige Lokalisierungsverfahren dar. Alternativen sind Sensoren und Messverfahren, die direkt auf dem Schienenfahrzeug zum Einsatz kommen und nicht auf streckenseitige Infrastrukturelemente angewiesen sind. Über das Doppler-Radar wird bspw. die Relativgeschwindigkeit zwischen Trasse und Schienenfahrzeug bestimmt. Dieser benötigt jedoch eine Mindestgeschwindigkeit von 16 km/h und ist zudem anfällig gegenüber Umwelteinflüssen, wie Vereisung der Trasse oder Spritzwasser [18]. Über die Beschleunigungsdaten und die Drehlage der IMU oder Achslagerbeschleunigungsaufnehmer (ABA) sind einzelne Streckenabschnitte anhand der jeweiligen Krümmung und ihrer individuellen Vibrationssignaturen voneinander differenzierbar. Die Ergebnisse hängen dabei stark von dem jeweils eingesetzten Fahrzeugtyp ab. Durch die Möglichkeit, den nächsten Streckenabschnitt

vorausschauend zu untersuchen und dadurch frühzeitig Objekte im Gleis oder in der unmittelbaren Umgebung zu erfassen, gehören optische Messverfahren, darunter Kamera und Light Detection and Ranging (LIDAR), mit zu den vielversprechendsten Ansätzen. Die Messverfahren sind jedoch auf gute Sichtverhältnisse angewiesen. Verunreinigungen der optischen Bauelemente durch Schmutz, Staub oder Öl, schlechte Lichtverhältnisse oder Umwelteinflüsse, bspw. Schnee oder Regen, beeinträchtigen die Funktionsweise der Sensoren. AMR und ECS verwenden ein elektromagnetisches Messverfahren, um Gleis- und Infrastrukturelemente entlang der Gleisstrecke bzw. Veränderungen des Erdmagnetfelds zu erfassen. Zur Ermittlung der Position aus den bereitgestellten Sensorinformationen sind bei allen vorgestellten Verfahren Karten erforderlich. Abhängig vom Sensor werden die erfassten Merkmale durch ein Referenzellipsoid (GNSS), eine 3D-Punktwolke (LIDAR), Bildmerkmale (Kamera), eine zurückgelegte Wegstrecke (Radencoder und Doppler-Radar), Signaturen oder Marker (AMR, ECS, Balisen und RFID-Tags) einer georeferenzierten Position in einer Karte zugeordnet. Die Tabelle 1.1 zeigt eine Übersicht der gebräuchlichsten Sensoren für die Bestimmung der Geschwindigkeit und Position für Schienenfahrzeuge.

Die Erfassung der streckenseitigen Infrastruktur über ein elektromagnetisches Messverfahren, welches unempfindlich gegenüber Verschmutzung, Witterungsverhältnissen und der Umgebungsbeleuchtung ist, besitzt ein großes Potenzial, um neben der Geschwindigkeit auch eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs zu bestimmen. Aktuell fehlen hierfür jedoch die entsprechenden Sensoren, um dieses Vorhaben in die Tat umzusetzen.

1.4 Relevante Arbeiten

Die Erfassung der streckenseitigen Infrastruktur über ein elektromagnetisches Messverfahren besitzt ein großes Potenzial, um neben der Geschwindigkeit auch eine Position des Schienenfahrzeugs zu ermitteln. Wie bereits erwähnt, verwenden die bisherigen Arbeiten u. a. einen Wirbelstromsensor (ECS), um grobe Inhomogenitäten, darunter die Schienenbefestigungen entlang der Gleisstrecke zu erfassen [16], [17], [32], [33]. Das auffälligste Merkmal des ECS sind die periodischen Sensorsignale, welche von der Anordnung der Schienenbefestigungen entlang der Gleisstrecke stammen. Über die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) wird der Versatz der beiden Sensorsignale bestimmt und mit

dem Abstand der Sensoren die Geschwindigkeit ermittelt. Die Kreuzkorrelationsfunktion weist dadurch ebenfalls einen periodischen Verlauf auf, wodurch sich das Hauptmaximum und die Nebenmaxima stark ähneln [16]. Treten Störungen in den Sensorsignalen auf, ist die Bestimmung des wahren Maximum nur bedingt möglich. Nur an Weichen wird die Periodizität der Sensorsignale durch die zusätzlichen Bauteile der Weiche unterbrochen. Aus der Klassifikation der Bauelemente der Weiche sind diese anhand der Sensorsignale identifizierbar [32]. Neben der Geschwindigkeit ergibt sich aus der spezifischen Anordnung der Schienenelemente (Radlenker, Herzstück etc.) die Befahrriichtung der Weiche. Aus der Abfolge der Bauelemente und der zurückgelegten Wegstrecke werden über ein stochastisches Lokalisierungsverfahren Rückschlüsse auf die Position des Schienenfahrzeugs innerhalb des Gleisnetzes gezogen [34]. Aufgrund der teils großen Unsicherheiten bei der Klassifikation der Bauteile, Unsicherheiten in der Geschwindigkeit und der damit verbundenen zurückgelegten Wegstrecke (Koppelnavigation) sind mehrere Positionshypothesen des Schienenfahrzeugs gegeben. Insbesondere auf sehr großen Streckenkarten und ohne die Kenntnis einer initialen Position des Schienenfahrzeugs ist eine eindeutige Position des Schienenfahrzeugs erst durch das überfahren mehrere Weichen möglich. Darüber hinaus ist durch die geringe Variabilität in den Signalen des ECS eine kontinuierliche Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs auf freier Strecke nicht gegeben. Zusammenfassend erfüllt der ECS nicht die Anforderungen, die für eine kontinuierliche und gleisselektive Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs erforderlich sind.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit behandelt die Konzeptionierung eines neuartigen Sensors für die bordautonome Bestimmung der Geschwindigkeit und der gleisselektiven Position von Schienenfahrzeugen. Über ein elektromagnetisches Messverfahren werden dabei die ferromagnetischen Strukturen der Schienen und die der unmittelbaren Umgebung erfasst. Durch die Bindung des Schienenfahrzeugs an die Gleisstrecke wird diese zu einem essenziellen Bestandteil für die Bestimmung der Geschwindigkeit und Position des Schienenfahrzeugs. Der Aufbau des Sensors, das zugrunde liegende Messverfahren, die Funktionsweise der Sensorik und die Aufbereitung der Messdaten wird in dem Kapitel 2 beschrieben. Die Sensorik wird anhand von Simulationen untersucht und ausgehend von den Ergebnissen in einem finalen Sensoraufbau umgesetzt. Kapitel 3 geht

explizit auf die Bestimmung der Fahrtrichtung und der Geschwindigkeit ein. Dabei wird ebenfalls die Montageposition des Sensor und die Auswirkung auf die Geschwindigkeit untersucht. Anschließend wird über die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene der Sensor und das Verfahren unter kontrollierten Laborbedingungen an verschiedene Szenarien getestet und unter realen Bedingungen auf einer georeferenzierten Teststrecke validiert. Kapitel 4 behandelt die Aufbereitung der ferromagnetischen Inhomogenitäten und die Erstellung der dazugehörigen ferromagnetischen Streckenkarten. Mit Hilfe der daraus gewonnen Landmarken wird das Lokalisierungsverfahren über die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schienen untersucht und mit den hochgenauen Referenzsensoren verglichen. In der Abbildung 1.2 ist der gesamte Informationsfluss von der Signalfilterung, Erkennung der Fahrtrichtung, Erstellung der ferromagnetischen Streckenkarten, Bestimmung der Geschwindigkeit und Position grafisch dargestellt. Aus den gemessenen ferromagnetischen Inhomogenitäten wird in Kapitel 5 ein Modell der ferromagnetischen Inhomogenitäten erstellt, welches die Struktur entlang der Gleisstrecke wiedergibt. Neben der maximalen ferromagnetischen Signallänge, die erforderlich ist, um einen eindeutigen Abgleich mit der Streckenkarte zu bekommen, wird ein Verfahren zur Beschleunigung des Abgleiches mit der ferromagnetischen Streckenkarte untersucht. Zusammenfassend wird in Kapitel 6 die Leistungsfähigkeit des neuen Sensors in Verbindung mit den ferromagnetischen Inhomogenitäten bewertet und ein Ausblick über zukünftige Arbeiten gegeben.

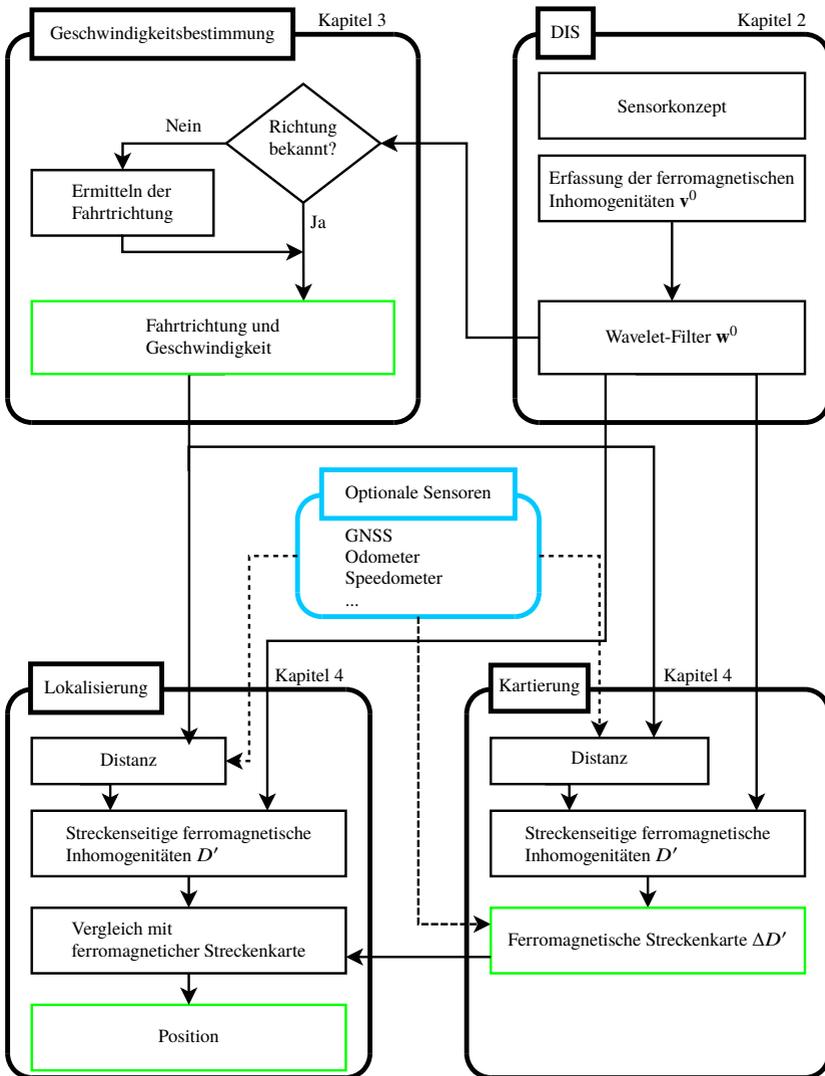


Abbildung 1.2: Grafische Darstellung der Informationsverarbeitungskette der Kapitel 2, 3 und 4. Der hellblaue Kasten kennzeichnet die optionalen Sensoren und die gestrichelten Linien kennzeichnen den optionalen Informationsfluss. Grüne Kästen repräsentieren die Ergebnisse der der einzelnen Kapitel.

2 Sensorkonzept

In diesem Kapitel wird das Sensorkonzept, das physikalische Messprinzip, der Aufbau und die Funktionsweise des Differenz-Induktivitäts-Sensors (engl. Difference-Inductance-Sensor)¹, kurz DIS [36], [37], [38], beschrieben. Bei dem DIS handelt es sich um einen neuartigen Sensor, der speziell für die Anforderungen im Schienenverkehr im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Das bordautonome Sensorkonzept des DIS verwendet dabei die immanenten ferromagnetischen Inhomogenitäten, die sich entlang und in der unmittelbaren Umgebung der Schiene befinden. Anhand dieser wird die Geschwindigkeit und die absolute Position von spurgeführten Fahrzeugen (Schienenfahrzeugen) berührungslos bestimmt.

2.1 Anforderungen an die Sensorik

Sensoren, die in sicherheitsrelevanten Bereichen, darunter die Geschwindigkeits- und Positionsbestimmung, zum Einsatz kommen, sind besonderen sicherheitstechnischen Anforderungen unterworfen. Insbesondere in der Bahnindustrie müssen alle elektrischen Baugruppen, vom Mikrotonkollektor über die Widerstände und Kondensatoren, für einen erweiterten Temperaturbereich (-40 °C bis +85 °C²) konzipiert sein. Gleichzeitig müssen mechanische Anforderungen und die Prüfung der Betriebsmittel für Hard- und Software nach (DIN EN 50155) erfüllt werden. Bis ein neuer Sensor für den operativen Betrieb freigegeben wird, muss dieser einen langwierigen Entwicklungs- und Zertifizierungsprozess durchlaufen. Um diese Hürden zu umgehen, wurde bereits bei der Konzepterstellung des DIS darauf geachtet, dass dieser als vollständig autark operierendes Sensorsystem verwendet werden kann. Über das berührungslose

¹ Patent DE102016105413A1 [35]

² Übertemperatur von +15 K für die Dauer von 10 Minuten.

Messverfahren wird der DIS galvanisch von dem Schienenfahrzeug, der restlichen Bordelektronik und der Infrastruktur getrennt. Dadurch wird verhindert, dass der DIS in einem bereits zertifizierten Betriebsprozess eingreift und bestehende Sicherheitskonzepte auf dem Schienenfahrzeug oder der Streckeninfrastruktur gefährdet. Eine erneute Zertifizierung des Gesamtsystems Schienenfahrzeug unter Berücksichtigung aller Teilsysteme entfällt. Die Zertifizierung der funktionalen Sicherheit nach DIN EN 50126 (generischer RAMS-Prozess) [39] ist zunächst nur für den DIS erforderlich. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss der DIS alle Informationen, die für eine Geschwindigkeits- und absolute Positionsbestimmung benötigt werden, aus den eigens erfassten Messwerten ableiten können. Informationen, die das Schienenfahrzeug bereitstellt, darunter die Fahrtrichtung, Drehzahl des Motors und die Stillstandserkennung, sind für den DIS nicht zugänglich. Als Basis für den DIS wird ein energieeffizienter Mikrocontroller STM32F405RG [40] (MCU) verwendet, der für einen Temperaturbereich von -40 °C bis $+85\text{ °C}$ bzw. $+105\text{ °C}$ ausgelegt ist (entspricht DIN EN 50155). Über das Sensor-Framework wird eine Virtuelle Maschine (VM), die ein Bestandteil des European Space Software Repository (ESSR) [41] ist, bereitgestellt. Mit der bereits zertifizierten Hardwareabstraktionsschicht (HAL) müssen nur die firmwarespezifischen Komponenten des DIS und die Anwendungssoftware zertifiziert werden [42].

2.2 Messung ferromagnetischer Merkmalspunkte und Landmarken

Das markanteste Merkmal von spurgeführten Fahrzeugen, insbesondere von Schienenfahrzeugen, ist die vorgegebene Trasse (Verkehrsweg). Diese besteht aus zwei parallel zueinander verlaufenden Stahlschienen, die in einem festen Abstand von 600 bis 1676 mm [43] auf dem Gleisbett liegen. Die Bahnkurve des Schienenfahrzeugs wird dadurch, bis auf wenige Millimeter in der Querrichtung, auf eine reine längsseitige Bewegung entlang des Gleises beschränkt. Werden mehrere Gleisabschnitte über Weichen miteinander verbunden, entsteht ein komplexes Gleisnetz. Durch die starke Bindung des Schienenfahrzeugs an das Gleis ist gewährleistet, dass die zurückgelegte Wegstrecke stets dieselben ferromagnetischen Merkmalspunkte passiert. Durch die Variation der Bauteile (Schienen, Schienenbefestigungen, Radlenker, Herzstücke etc.) entlang

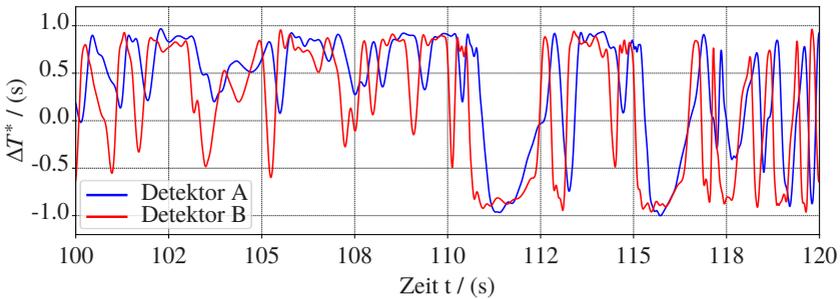


Abbildung 2.1: Während einer Messfahrt aufgenommene und Min-Max-normierte (Intervall $[-1, 1]$) Signalverläufe der ferromagnetischen Inhomogenitäten der beiden Detektoren A und B für eine Dauer von 20 s.

der Gleisstrecke und die Superposition aus den ferromagnetischen Strukturen entsteht eine kontinuierliche Veränderung der ferromagnetischen Zusammensetzung entlang der Schiene und damit eine einzigartige und eindeutige Signatur (Fingerabdruck) der Schiene für jeden Streckenabschnitt. Werden die ferromagnetischen Inhomogenitäten, siehe Abbildung 2.1, mit den korrespondierenden ortsfesten Schienenelementen verbunden, ergeben sich für jedes Streckensegment spezifische Landmarken. Die dabei entstehenden Streckenkarten

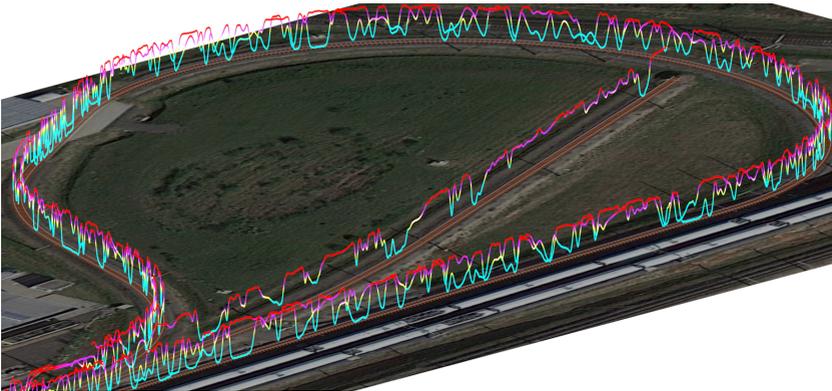


Abbildung 2.2: Orthographische 3D-Darstellung der aufgenommenen ferromagnetischen Inhomogenitäten des T4-Rings auf dem Prüf- und Validationscenter Wegberg-Wildenrath (Map data ©2016 Google Z:32U; E:306076; N:5666477). Die Signalverläufe der ferromagnetischen Inhomogenitäten (Laufzeitdifferenz ΔT^*) sind farbcodiert in der Karte aufgetragen.

beinhalten genügend Informationen, um das Schienenfahrzeug bei einer späteren Befahrung im Gleisnetz zu lokalisieren. In der Abbildung 2.2 sind die ferromagnetischen Strukturen eines Streckenabschnittes farbcodiert zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass jede Schiene eines Streckenabschnittes eine eigene individuelle Signatur besitzt.

2.3 Messprinzip

Um den Herausforderungen einer genauen Geschwindigkeits- und absoluten Positionsbestimmung auf Basis von ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Trasse zu begegnen, ist eine hohe Abtastrate und eine zuverlässige Bestimmung der ferromagnetischen Inhomogenitäten erforderlich. Mit dem DIS werden die ferromagnetischen Signaturen an zwei räumlich voneinander getrennten Positionen gemessen. Mit der MCU und einer separaten Messschaltung (siehe Abbildung 2.3 und Bestückungsplan Abbildung A.5) für jeden der Detektoren werden über ein elektromagnetisches Messverfahren auch verdeckte ferromagnetische Strukturen im Gleisbett erfasst. Der DIS ist dadurch in der Lage, auch bei schlechten Witterungsverhältnissen, bspw. Schnee oder Regen, oder bei starker Verschmutzung, bspw. durch Staub und Öl, die ferromagnetischen Strukturen zu erfassen. Dazu wird jeweils die Induktivität:

$$L(x) = \mu_0 \cdot \mu_r(x) \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l_s} \quad (2.1)$$

an den beiden Detektoren, die aus einer elektrischen Spule bestehen, gemessen. Die Induktivität des Detektors hängt dabei von den intrinsischen Parametern der Spulengeometrie ab. Dazu gehört die Querschnittfläche A der Spule, die Länge der Spule l_s , die Anzahl der Windungen N und die magnetische Feldkonstante μ_0 . Der extrinsische Faktor und damit die zu bestimmende Messgröße ist die Permeabilitätszahl $\mu_r(x)$. Diese ist von der Position x der ferromagnetischen Materialien entlang der Schiene abhängig [44]. Die Permeabilitätszahl wird dabei messtechnisch über die Phase (Phasenverschiebung) $\varphi_{u,i}$ bzw. die Laufzeitdifferenz:

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi_{u,i}}{2\pi f_0} \quad (2.2)$$

bestimmt. Diese beinhaltet die konstante Arbeitsfrequenz f_0 , die Spannung U und Stromstärke I im Stromkreis der Detektorspule. Das theoretische Wirkprinzip und die Funktionsweise ist im Anhang A.1 und A.2 detailliert beschrieben. Für eine einheitliche Darstellung der gemessenen ferromagnetischen Inhomogenitäten werden die Laufzeitdifferenzen Min-Max-normiert im Intervall von $[-1,1]$ (ΔT^*), vgl. Abbildung 2.1, dargestellt.

2.4 Vorzüge des DIS

Für die messtechnische Umsetzung wird eine Schaltung entworfen, deren Signalausgabe der Laufzeitdifferenz aus Gleichung 2.2 entspricht (siehe Abbildung 2.3). Im Vergleich zu den bisherigen Messverfahren verzichtet der DIS bei der Signalerfassung auf analoge Baugruppen. Über ein integriertes Gate-Array in der MCU ist eine zeitsynchrone Erfassung der Laufzeitdifferenz für mehrere Detektoren gewährleistet. Durch die hardwarebasierte und taktsynchrone Messwerterfassung und durch den Verzicht auf Leistungselektronik ist der DIS im Gegensatz zum ECS als Low-Power Sensor konzipiert. Durch die Verwendung der ferromagnetischen Inhomogenitäten als Landmarken entfällt die Installation von kostenintensiven Infrastrukturelementen entlang der Strecke. Mit dem kostengünstigen Aufbau des DIS und der energieeffizienten MCU sind Anwendungen auf Güterwagons, die keine Stromversorgung besitzen, denkbar. Im Nachfolgenden wird die Funktionsweise der wichtigsten Baugruppen der Messschaltung für einen der beiden Detektoren erläutert. Der zweite Detektor verwendet eine identische Messschaltung. Die Funktionsweise der Messschaltung ist dabei in die drei Bereiche unterteilt:

- Einkopplung der Messfrequenz in den Detektorstromkreis (grün) in Abbildung 2.3
- Bestimmung der Laufzeitdifferenz zwischen der Spannung und Stromstärke (blau) in Abbildung 2.3
- Auswertung der Laufzeitdifferenz (gelb) in Abbildung 2.3

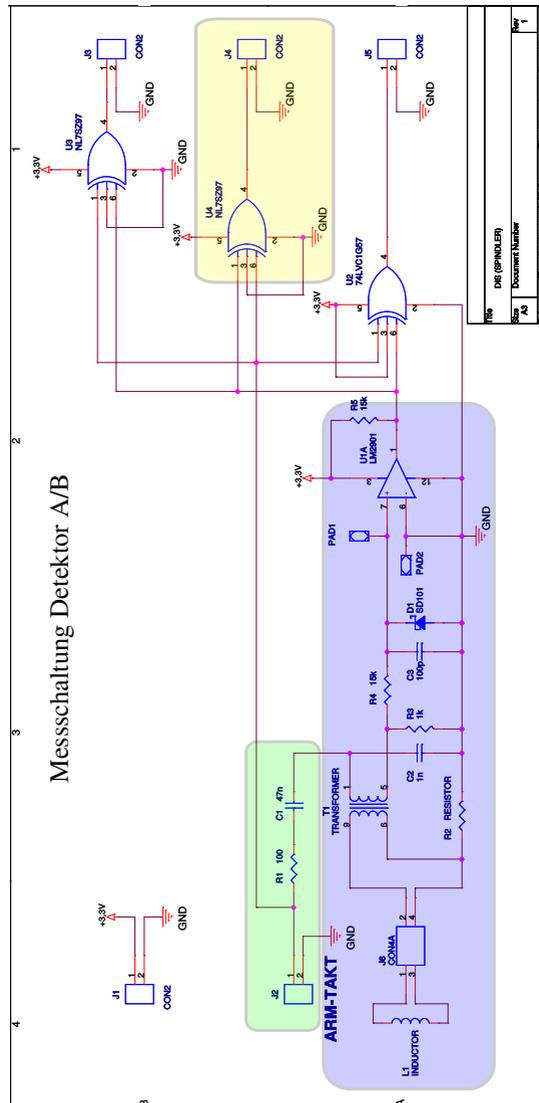


Abbildung 2.3: Elektrischer Schaltplan einer der beiden Messschaltungen (A/B) des DIS. Grüner Block: Einkopplung der Messfrequenz. Blauer Block: Bestimmung der Laufzeitdifferenz. Gelber Block: Auswertung der Laufzeitdifferenz.

2.4.1 Einkopplung der Messfrequenz

In dem Eingangsbereich der Messschaltung (Abbildung 2.3 grüner Block) wird eine feste Erregerfrequenz³ (an der Leitung des ARM_TAKT) kapazitiv (über den Kondensator C1) in den Schwingkreis eingekoppelt. Dadurch gelangt lediglich der Anteil der Wechselstromkomponente in die Messschaltung. Die Schaltung des DIS wird mit einer Pulsweitenmodulation (PWM⁴) direkt über die MCU betrieben. Durch den gemeinsamen Basistakt ist die Messfrequenz der MCU synchron zu der Erregerfrequenz der Messschaltung. Kommt es zu einer Verschiebung der Laufzeitdifferenz zu der Erregerfrequenz wird dies direkt von der MCU erfasst.

2.4.2 Bestimmung der Laufzeitdifferenz

Die Erregerfrequenz entspricht der in Kapitel A.2 beschriebenen Resonanzfrequenz des Serienschwingkreises und wird über den Transformator T1 in den Sekundärkreis mit der Detektorspule L1 (siehe Abbildung 2.3) eingespeist. Der Transformator trennt den Detektorstromkreis galvanisch von der Messschaltung, wodurch diese vor Überspannung geschützt ist. Das phasenverschobene Signal an der Primärseite des Transformators wird vom hochfrequenten Rauschen befreit und die negative Halbwelle über eine Schottky-Diode (D1) terminiert. Die Nulldurchgänge des phasenverschobenen Signalverlaufs der verbleibenden positiven Halbwelle werden über den Komparator U1A (LM2901) [45] gegenüber GND bestimmt. Am Ausgang des Komparators liegt anschließend ein PWM-Signal (der positiven Halbwelle) des phasenverschobenen Eingangssignals an (siehe Abbildung 2.3 blauer Block). Eine detaillierte Darstellung der Signalverläufe ist in der Abbildung 2.4 (links) zu sehen. Das Erreger-signal (ARM_TAKT) und der Ausgang des Komparators (Detektorsignal; LM2901_Ausgang) werden über ein Logikgatter (NL7SZ97 [46]); AND-Gatter mit invertiertem LM2901_Ausgang) miteinander verglichen. Die Zeitspanne des aktiven Zustandes (Pulsbreite) am Ausgang des Logikgatters entspricht der Laufzeitdifferenz aus der Gleichung 2.2. Besitzen beide Signalverläufe dieselbe

³ Die Erregerfrequenz wird von der MCU generiert.

⁴ Tastgrad 50:50 zwischen den Werten von 0,0 V und 3,3 V mit einer konstanten Erregerfrequenz.

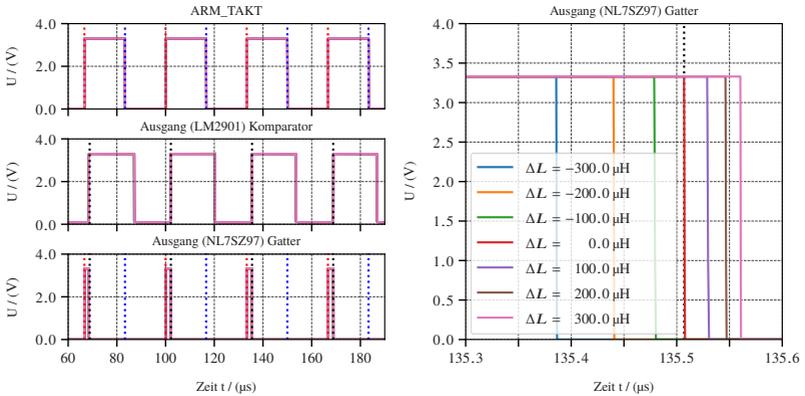


Abbildung 2.4: Links: Signalverläufe der Messschaltung aus der Schaltungssimulation für verschiedene Induktivitätsänderungen. Rechts: Detailsicht des Ausgangs des Logikgatters.

Phasenlage, ist der Ausgang des Logikgatters Null. Je größer die Laufzeitdifferenz an den Detektorspulen, desto größer ist die Pulsbreite am Ausgang des Logikgatters.

2.4.3 Auswertung der Laufzeitdifferenz

Der Ausgang des Logikgatters wird direkt mit der MCU verbunden. Dort wird mit einem internen Zähler ($f_Z = 84 \text{ MHz}$) die Pulsbreite ermittelt. Mit einer Erregerfrequenz von $f_0 = 30 \text{ kHz}$ ergibt sich mit der Gleichung 2.3 und 2.4 eine Auflösung der Phase von $\varphi_{\min} \approx 0,13^\circ$ bzw. der Laufzeitdifferenz $\Delta t_{\min} \approx 12 \text{ ns}$. In der Abbildung 2.5 ist das Verfahren zur Bestimmung der Pulsbreite Δt_n über einen der internen Hardwarezähler der MCU zu sehen.

$$\varphi_{\min} = \frac{1}{f_Z} \frac{360^\circ}{Z_x=1} \frac{1}{f_0} \quad (2.3)$$

$$\Delta t_{\min} = \frac{Z_x = 1}{f_Z} \quad (2.4)$$

Für den eingeschwungenen Zustand wird die Laufzeitdifferenz einmal pro Periode über den Zählerstand Z_n (proportional zu Δt_n) ermittelt und zusammen mit einem internen Zeitstempel in einen Ringpuffer in der MCU abgelegt. Die

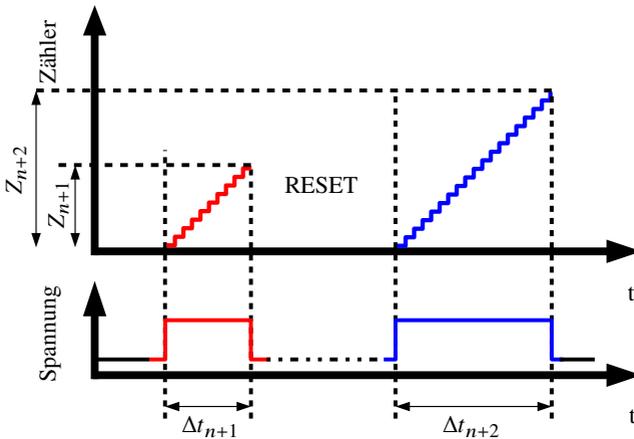


Abbildung 2.5: Oben: Zählerbasierte Bestimmung der Pulsbreite (Laufzeitdifferenz Δt_n) für einen Detektor am Ausgang des Logikgatters (unten) bei einer internen Abtastfrequenz von 84 MHz.

Messfrequenz des DIS ist identisch mit der Erregerfrequenz der Messschaltung. Ist der Ringpuffer zur Hälfte gefüllt, werden die Zählerstände und die Zeitstempel an einen Auswerterechner übertragen. Neben den Laufzeitdifferenzen, die durch die ferromagnetischen Inhomogenitäten an der Detektorspule verursacht werden, enthält die Pulsbreite am Ausgang des Logikgatters einen konstanten Offset. Dieser wird durch die Gatterlaufzeiten der übrigen elektrischen Baugruppen in der Messschaltung verursacht und ist konstant für eine feste Erregerfrequenz. Vor der weiteren Verarbeitung wird der Offset von dem eigentlichen Nutzsignal der Detektoren entfernt.

2.5 Ergebnisse der simulierten Messschaltung

Die Messschaltung für einen der beiden Detektoren, welche in der Abbildung 2.3 dargestellt ist, wird mit einer SPICE⁵ (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) basierenden Schaltungssimulation untersucht. Anhand der Simulation wird der gesamte Messprozess, von der Änderung der Detektorspuleninduktivität über den Signalvergleich bis zur Ermittlung

⁵ LTspice XVII des Halbleiterherstellers Linear Technology (Seit 2017: Analog Devices).

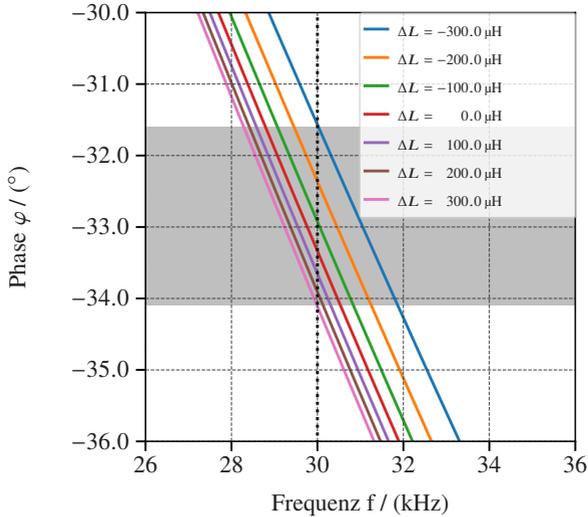


Abbildung 2.6: Phase zwischen Spannung und Stromstärke für verschiedene Induktivitätsänderungen an einer Detektospule für den Bereich der Arbeitsfrequenz der Messschaltung.

der Laufzeitdifferenz, unter Berücksichtigung aller elektrischer Komponenten untersucht. Mit einer AC-Frequenzanalyse⁶ wird zunächst die Arbeitsfrequenz der Messschaltung ermittelt. Eine minimale Änderung an der Spuleninduktivität ΔL führt dabei zu einer möglichst großen Phasenverschiebung an der Detektorspule. In Abbildung 2.6 ist die Phasenlage an der Detektorspule für unterschiedliche Verschiebungen aus der Grundinduktivität bei einer Arbeitsfrequenz von 30 kHz zu sehen. Eine detaillierte Darstellung der Arbeitsfrequenz (ARM_TAKT), des Ausgangs des Komparators und des Logikgatters findet sich in der Abbildung 2.4. Die rot- und blau gestrichelten Linien kennzeichnen dabei den Zeitpunkt einer steigenden bzw. einer fallenden Signalfanke des ARM_TAKT. Die schwarz gestrichelten Linien markieren den Zeitpunkt einer steigenden Flanke am Ausgang des Komparators. Der Zeitraum zwischen einer rot- und einer schwarz gestrichelten Linie entspricht der Laufzeitdifferenz (siehe Gleichung 2.4), welche durch die Detektorspule verursacht wird. In der Abbildung 2.4 (rechts) ist die Laufzeitdifferenz am Ausgang des Logikgatters in einer Detailansicht zu sehen. Abhängig von der Induktivität der Detektorspule

⁶ Untersuchung des Schaltungsverhaltens als Funktion der Frequenz.

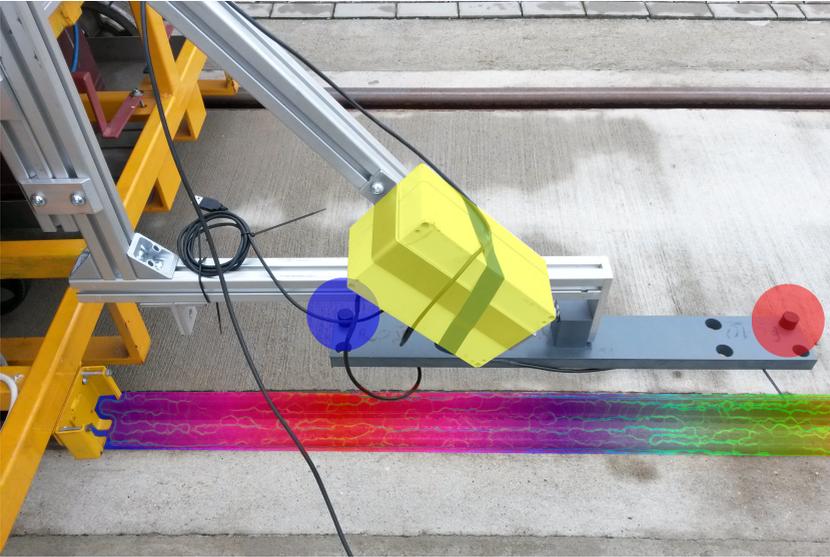


Abbildung 2.7: Montageposition des DIS an einem Schienenfahrzeug (gang car) 10 cm über dem Schienenkopf. Der rote und blaue Kreis markieren die Detektoren A und B. Der gelbe eingefärbte Bereich beinhaltet die Messschaltung des DIS. Die ferromagnetischen Inhomogenitäten sind schematisch unterhalb des DIS entlang der Schiene aufgetragen.

ändert sich die Laufzeitdifferenz, welche direkt von der MCU (siehe Kapitel 2.4.2) erfasst wird. Dadurch können über die Messschaltung auch geringe Veränderungen in den ferromagnetischen Strukturen erfasst werden.

2.6 Ergebnisse der realen Messschaltung

Ausgehend von den Ergebnissen aus den Simulationen und der Schaltung aus Abbildung 2.3 wird jeweils eine finale Messschaltung für die Detektoren (A und B) aus konkreten elektrischen Baugruppen aufgebaut und die beiden Ausgänge der Logikgatter (J4) mit der MCU (Pin A0 und A3 [40]) verbunden. Beide Detektoren besitzen einen Abstand von $d = 0,60$ m zueinander und werden zusammen mit der restlichen Elektronik auf einer Trägerplattform montiert. Der fertige Aufbau des DIS ist in der Abbildung 2.7, montiert an einem

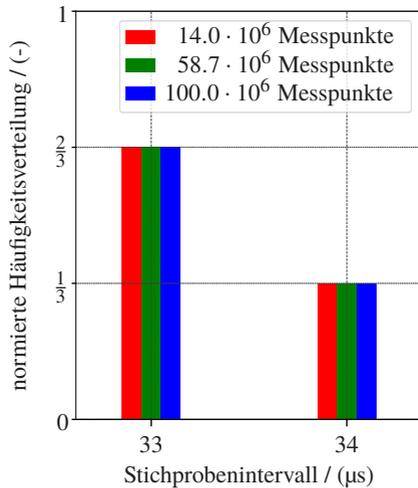


Abbildung 2.8: Normierte Häufigkeit der Zeitdifferenz zwei aufeinanderfolgender Messungen des DIS ausgewertet über drei reale Messfahrten mit insgesamt 169 Millionen Messpunkten [38].

Erprobungsfahrzeug⁷, zu sehen. Das Testen der Firmware und der Messschaltung der Detektorspulen soll Aufschluss über die Messgenauigkeit des DIS geben. Insbesondere die zeitdiskrete und lückenlose Erfassung der Messwerte ist für die spätere Geschwindigkeits- und absolute Positionsbestimmung entscheidend. Durch die zeitdiskrete Messwerterfassung über die MCU besitzt jeder der Messpunkte einen internen Zeitstempel mit einer zeitlichen Auflösung von 1 µs. In der Abbildung 2.8 sind die Zeitdifferenzen von insgesamt 169 Millionen Messpunkten zu sehen. Bedingt durch die Auflösung des internen Zeitstempels besitzen $\frac{2}{3}$ der Messpunkte eine Zeitdifferenz von 33 µs und $\frac{1}{3}$ aller Messpunkte eine Zeitdifferenz von 34 µs. Anhand der Zeitstempel ergibt sich eine kontinuierliche und verlustfreie Erfassung der Messpunkte, die der zuvor eingestellten Arbeitsfrequenz von 30 kHz entspricht. Davon profitiert insbesondere das nachfolgende Filter- und Auswerteverfahren, welches für die Geschwindigkeits- und absolute Positionsbestimmung verwendet wird. Für Geschwindigkeiten von 400 km/h wird jeder Schienenmeter mit 270 Messpunkten abgetastet. Um das Rauschverhalten der beiden Detektoren zu untersuchen, wurden die Detektoren in einem Abstand von 10 cm über dem Schienenkopf

⁷ Gang car der Firma ARIC (Automotive and Rail Innovation Center).

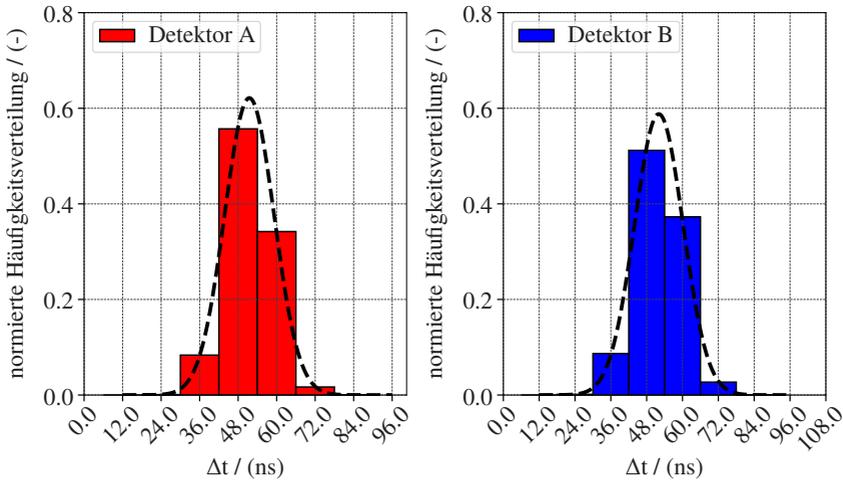


Abbildung 2.9: Normierte Häufigkeitsverteilung für eine Messung bestehend aus 7,2 Millionen Messpunkten an einer festen Position. Für den Detektor A beträgt die mittlere Laufzeitdifferenz $\mu_A = 51,5$ ns, $\sigma_A = 7,7$ ns und für den Detektor B $\mu_B = 52,0$ ns, $\sigma_B = 8,1$ ns [38].

an ein Schienenfahrzeug montiert. In der Abbildung 2.9 ist die Verteilung der Messwerte bei einer festen Position für ca. 7,2 Millionen Messpunkte zu sehen. Für den Detektor A ergibt dies eine mittlere Laufzeitdifferenz von $\mu_A = 51,5$ ns mit einer Standardabweichung von $\sigma_A = 7,7$ ns. Die mittlere Laufzeitdifferenz des Detektor B beträgt $\mu_B = 52,0$ ns mit einer Standardabweichung von $\sigma_B = 8,1$ ns.

2.7 Signalfilterung

Bei der Konzeption des DIS wurde auf eine spezielle hardwareseitige Signalfilterung und Vorverarbeitung der Messdaten verzichtet. Die Aufbereitung und Interpretation der mit dem DIS erfassten Messdaten wird auf einem separaten Auswerterechner durchgeführt. Dadurch kann die Hardware des DIS flexibler für den Mess- und Auswerteprozess eingesetzt werden. Ohne den Aufbau der Messschaltung zu verändern, können verschiedene Verfahren für die Analyse der Messsignale untersucht werden. In der Abbildung 2.10 ist das normierte Messsignal (schwarze Kurve) eines Detektors des DIS für eine Zeitspanne von

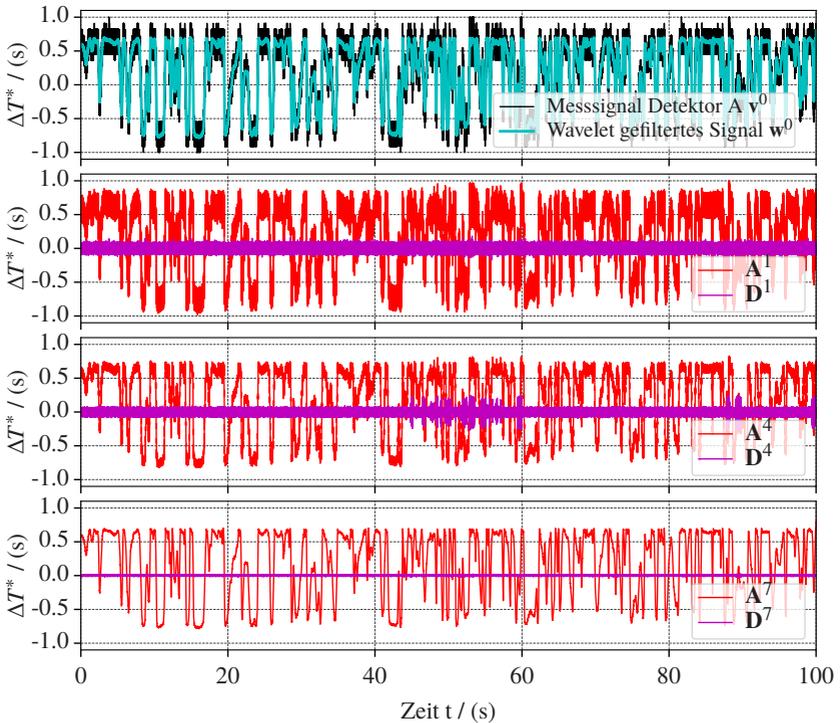


Abbildung 2.10: Min-Max-normiertes $[-1, 1]$ Messsignal eines Detektors v^0 (schwarz) und mit der Gleichung 2.20 gefiltertes Signal w^0 (cyan). Rekonstruierte Signalverläufe der Detailkoeffizienten D_l (magenta) und Approximationskoeffizienten A_l (rot) für die Level $l = \{1, 4, 7\}$ [36].

100 s (entspricht 3 Millionen Messpunkten) zu sehen. Der dargestellte Signalverlauf setzt sich aus einem hochfrequenten Quantisierungsrauschen, verursacht durch die Messeinheit der MCU, und einem niederfrequenten Nutzanteil zusammen. Für die weitere Auswertung wird zunächst der Anteil des Rauschens aus dem Messsignal (siehe Abbildung 2.10 magenta Kurven) herausgefiltert, ohne dabei markante Signalstrukturen (bspw. Kanten oder abrupte Signaländerungen) zu glätten. Hierfür wird ein auf Wavelets basiertes Verfahren zur Filterung und Analyse der Messsignale verwendet. Wavelets wurden bereits erfolgreich in der Infrarot (IR) Spektroskopie [47], [48] und bei der Auswertung von Elektroenzephalogrammen (EEG) [49], [50] angewandt. Mit der Zeit- und Frequenzdarstellung der Signalstrukturen bieten die Wavelet-Koeffizienten

Möglichkeiten für die Signalanalyse, die bereits in den genannten Teilgebieten erfolgreich umgesetzt wurden. Dazu gehört die Entfernung von Artefakten, die Verringerung des Rauschanteils, die Datenreduktion sowie die gezielte Extraktion von Merkmalen aus dem Orts- bzw. Frequenzbereich des Nutzsignals.

2.7.1 Wavelet-Transformation

Bei der Wavelet-Transformation handelt es sich um eine lineare Transformation, ähnlich der Fourier-Transformation, zur Überführung einer Funktion vom Ortsbereich (bzw. Zeitbereich) in den Frequenzbereich. Die Orts- und Frequenzdarstellung sind äquivalent, besitzen also denselben Informationsgehalt und können ohne Informationsverlust ineinander überführt werden. Bei der Fourier-Transformation führt eine lokale Änderungen eines Funktionswertes im Orts- oder Frequenzbereich zu einer globale Änderung im jeweiligen anderen Darstellungsbereich. Da im Ortsbereich keinerlei Frequenzinformation und im Frequenzbereich keine Ortsinformationen vorhanden sind, können Orts- und Frequenzinformationen bei der Fourier-Transformation nur bedingt als Merkmale verwendet werden. Im Vergleich zur Window- bzw. Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) [51], bei der örtlich- bzw. zeitlich begrenzte Segmente untersucht werden (dadurch ist eine lokale Frequenzanalyse des Signals möglich), bietet die Wavelet-Transformation eine Alternative Ort/Zeit-Frequenz-Analyse für die Untersuchung von nichtstationären Signalen. Dabei handelt es sich um eine Multiskalen-Analyse, bei der das Signal auf verschiedenen Skalen (hier Level l) unterschiedlicher Auflösungen durch die Wavelet-Koeffizienten repräsentiert wird [52]. Die Besonderheit der Wavelet-Transformation liegt dabei in der gleichzeitigen Analyse der Orts- und Frequenzanteile eines Signals.

2.7.2 Diskrete Wavelet-Transformation

Für die Signalanalyse werden die Messpunkte v^0 von einem der Detektoren des DIS über digitale Filterbänke (Tief- und Hochpassfilter) der Diskreten Wavelet-Transformation (DWT) in unterschiedliche Frequenzbänder zerlegt [53]. Das Ergebnis der DWT hängt dabei entscheidend von der Wavelet-Filter-Basis

(Haar-Wavelet, Daubechies-Wavelets, etc.), d. h. von den Skalierungskoeffizienten h_n und den Wavelet-Koeffizienten g_n , ab. Die Anzahl der Waveletkoeffizienten für die jeweilige Wavelet-Filter-Basis ist über den Index n gegeben. Durch das Anwenden der Wavelet-Transformationsmatrix:

$$\mathbf{W}_l = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & h_5 & h_6 & \cdots & 0 & 0 \\ g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_2 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_1 & g_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & h_{z-1} & h_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & g_{z-1} & g_z \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

auf die Messpunkte \mathbf{v}^0 (mit der Gesamtanzahl der Messpunkte j) des jeweiligen Levels l ergeben sich die Approximationskoeffizienten \mathbf{a}^l und Detailkoeffizienten \mathbf{d}^l für das Frequenzband des nächsten Levels:

$$\mathbf{W}_l \mathbf{v}^l = \mathbf{W}_l \begin{pmatrix} v_1^l \\ v_2^l \\ \vdots \\ v_k^l \\ v_{k+1}^l \\ \vdots \\ v_{j-1}^l \\ v_j^l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^{l+1} \\ d_1^{l+1} \\ \vdots \\ a_k^{l+1} \\ d_k^{l+1} \\ \vdots \\ a_z^{l+1} \\ d_z^{l+1} \end{pmatrix} = (\mathbf{a}^{l+1} | \mathbf{d}^{l+1}) = (\mathbf{v}^{l+1} | \mathbf{d}^{l+1}) \quad (2.6)$$

mit:

$$\mathbf{a}^{l+1} = (a_1^{l+1}, a_2^{l+1}, \dots, a_z^{l+1}) \quad (2.7)$$

$$\mathbf{d}^{l+1} = (d_1^{l+1}, d_2^{l+1}, \dots, d_z^{l+1}). \quad (2.8)$$

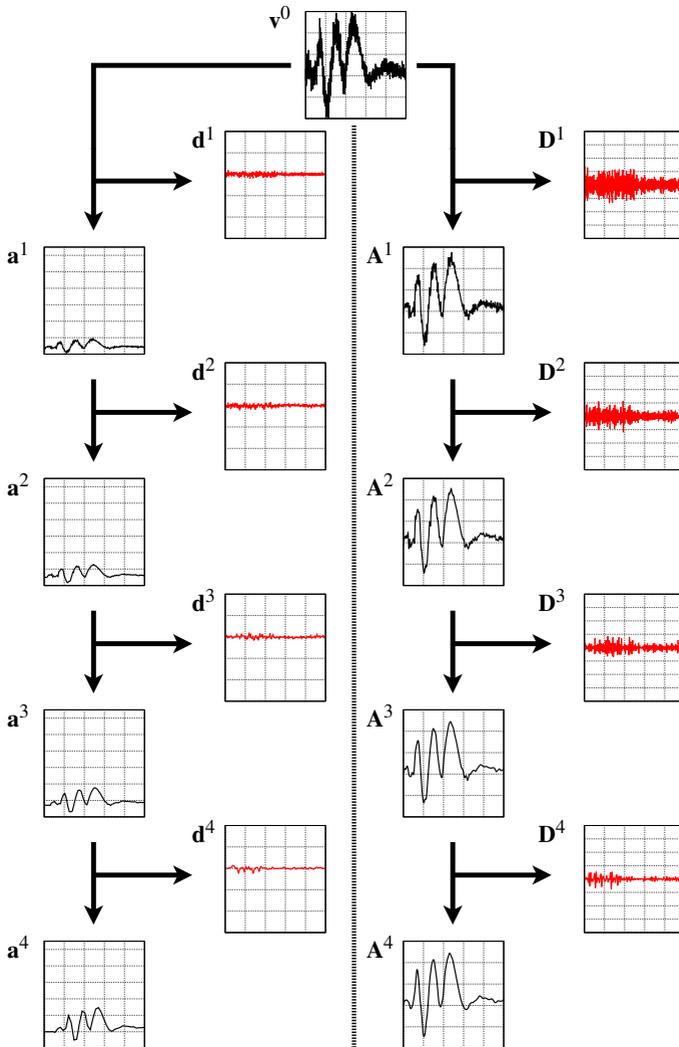


Abbildung 2.11: Darstellung der Multiskalen-Analyse für einen synthetischen Signalverlauf v^0 . Links: Abgebildet sind die Approximationskoeffizienten a^l und Detailkoeffizienten d^l der DWT. Rechts: Darstellung der rücktransformierten (IDWT) Approximationskoeffizienten A^l und Detailkoeffizienten D^l jeweils für die Level $l = \{1, \dots, 4\}$. Die Skalierung der Achsen ist für die Darstellungen der Approximations- und Detailkoeffizienten der DWT und IDWT konstant.

Abhängig von der Wavelet-Filter-Basis ergibt sich die Anzahl der Approximations- und Detailkoeffizienten aus der Anzahl der Waveletkoeffizienten n und der Anzahl der Messpunkte j über:

$$z = \left\lfloor \frac{j + n - 1}{2} \right\rfloor. \quad (2.9)$$

Aus den Wavelet-Koeffizienten \mathbf{a}^{l+1} und \mathbf{d}^{l+1} wird der vorherige Signalzustand (\mathbf{v}^l) über:

$$\mathbf{R}_l \mathbf{v}^{l+1} = \mathbf{v}^l, \quad 0 \leq l < l_{\max} \quad (2.10)$$

mit der Rücktransformationsmatrix \mathbf{R}_l verlustfrei rekonstruiert. Für die Wavelet-Transformationsmatrix und die Rücktransformationsmatrix gilt:

$$\mathbf{W}_l \mathbf{R}_l = \mathbb{1}. \quad (2.11)$$

Durch die Detailkoeffizienten werden feine Strukturen (sogenannte Details), bspw. hochfrequente Signalanteile (u. a. Rauschen der Messeinheit in der MCU), dargestellt. Die Approximationskoeffizienten hingegen beinhalten niedrige Frequenzanteile, welche den ferromagnetischen Signalstrukturen im Ursprungssignal entsprechen. Durch rekursives Anwenden der Wavelet-Transformation auf die Approximationskoeffizienten des letzten Zustandes werden die Wavelet-Koeffizienten der tieferen Level l (vgl. Gleichungen 2.12 bis 2.15) ermittelt.

$$\mathbf{v}^0 \xrightarrow{\mathbf{W}_0} (\mathbf{a}^1 | \mathbf{d}^1) \quad (2.12)$$

$$\mathbf{a}^1 \xrightarrow{\mathbf{W}_1} (\mathbf{a}^2 | \mathbf{d}^2) \quad (2.13)$$

$$\mathbf{a}^2 \xrightarrow{\mathbf{W}_2} (\mathbf{a}^3 | \mathbf{d}^3) \quad (2.14)$$

$$\vdots$$

$$\mathbf{a}^l \xrightarrow{\mathbf{W}_{l+1}} (\mathbf{a}^{l+1} | \mathbf{d}^{l+1}), \quad l < l_{\max} \quad (2.15)$$

In der Abbildung 2.11 ist die schematische Abfolge der Multiskalen-Analyse für die Level $l = \{1, \dots, 4\}$ zu sehen. Die linke Seite zeigt die Approximations- und Detailkoeffizienten (\mathbf{a} und \mathbf{d}) aus der DWT. Auf der rechten Seite sind die rücktransformierten (Inversen Diskreten Wavelet-Transformation (IDWT))

Approximations- und Detailkoeffizienten (**A** und **D**) zu sehen. Das Ursprungssignal wird durch die Wavelet-Koeffizienten in immer feinere Frequenzbänder $f_{a,l}$ und $f_{d,l}$ (siehe Gleichung 2.16 und 2.17) unterteilt.

$$f_{a,l} = \left[0, \frac{f_s}{2^l} \right] \quad (2.16)$$

$$f_{d,l} = \left[\frac{f_s}{2^l}, \frac{f_s}{2^{l-1}} \right] \quad (2.17)$$

$$f_s = \frac{f_0}{2} \quad (2.18)$$

Die Messfrequenz f_0 des DIS liegt bei 30 kHz und f_s ist die Nyquist-Frequenz. Niedrigere Level decken den Bereich mit höheren Frequenzen ab. Durch die überlappenden Frequenzbereiche der Approximations- und Detailkoeffizienten wird eine hohe Auflösung im Zeit- und Frequenzbereich des Ursprungssignals erreicht. In der Abbildung 2.10 sind die mit der IDWT rücktransformierten Signalanteile der Detailkoeffizienten D^l (magenta) und Approximationskoeffizienten A^l (rot) für die Level $l = \{1, 4, 7\}$ zu sehen. Das unterteilen in immer feinere Approximations- und Detailkoeffizienten endet sobald das maximale Level von:

$$l_{\max} = \left\lceil \log_2 \left(\frac{j}{n-1} \right) \right\rceil \quad (2.19)$$

erreicht ist. Für eine vollständige und verlustfreie Rekonstruktion (IDWT) des Ursprungssignals wird nur der Approximationskoeffizient eines Levels zusammen mit den Detailkoeffizienten der darunterliegenden Level benötigt, $\mathbf{v}^0 = \text{IDWT}(\mathbf{a}^{\text{nmax}}, \mathbf{d}^{\text{nmax}}, \mathbf{d}^{\text{nmax}-1}, \dots, \mathbf{d}^2, \mathbf{d}^1)$. Werden vor der Rücktransformation die Detailkoeffizienten \mathbf{d}^l eines Level l unterdrückt, verschwindet das dazugehörige Frequenzband $f_{d,l}$ unabhängig von der Amplitude aus dem Ursprungssignal [48]. Einzelne Frequenzbänder werden dadurch unterschiedlich stark gewichtet.

Für die Messsignale des DIS wird ein soft-thresholding (wavelet shrinkage) nach Donoho [54] auf die Detailkoeffizienten (siehe Gleichung 2.20 bis 2.23) angewendet [55], [56].

$$d_i^l = \text{sgn}(d_i^l) \cdot f_{\text{soft}}(d_i^l) \quad (2.20)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (v_i^0 - \bar{v}^0)^2} \quad (2.21)$$

$$\delta = \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \log(j)} \quad (2.22)$$

$$f_{\text{soft}}(d_i^l) = \begin{cases} 0 & |d_i^l| - \delta \leq 0 \\ |d_i^l| - \delta & |d_i^l| - \delta > 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

Das soft-thresholding hängt vom Betrag der Detailkoeffizienten ab und wirkt auf den gesamten Frequenzbereich des Signals. Der Betrag der Wavelet-Koeffizienten ist ein Maß für den Informationsgehalt. Kleine Beträge werden dabei vernachlässigt, ohne dabei die Signalcharakteristika des Ursprungssignals zu verfälschen. Höhere Frequenzanteile, bspw. das Quantisierungsrauschen, werden dadurch stärker gedämpft. Die Frequenzanteile des Nutzsignals hingegeben bleiben erhalten. Durch Rekonstruktion der gefilterten Wavelet-Koeffizienten:

$$(\mathbf{a}^{n_{\max}}, \mathbf{d}'^{n_{\max}}, \mathbf{d}'^{n_{\max}-1}, \dots, \mathbf{d}'^2, \mathbf{d}'^1) \xrightarrow{\mathbf{R}_{n_{\max}}} \mathbf{w}^{n_{\max}-1} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{w}^{n_{\max}-1} \xrightarrow{\mathbf{R}_{n_{\max}-1}} \mathbf{w}^{n_{\max}-2} \quad (2.25)$$

$$\vdots$$

$$\mathbf{w}^1 \xrightarrow{\mathbf{R}_1} \mathbf{w}^0 \quad (2.26)$$

verschwinden die hochfrequenten Signalanteile aus dem Messsignal. Durch das soft-thresholding ergeben sich für die Rekonstruktion im allgemeinen glattere Signalverläufe und markante Signalstrukturen bleiben weiterhin erhalten, wobei sehr feine Details im Ursprungssignal verloren gehen können. In der Abbildung 2.10 (cyan Kurve) ist der geglättete Signalverlauf des Ursprungssignals zu sehen.

2.7.3 Wavelet-Koeffizienten

Anhand der Wavelet-Koeffizienten ($\mathbf{a}^l | \mathbf{d}^l, \dots, \mathbf{d}^1$) und der dazugehörigen Wavelet-Filter-Basis ist das Ursprungssignal des DIS mit allen Details vollständig rekonstruierbar. Wird für die Rücktransformation ausschließlich einer der Approximationskoeffizienten \mathbf{a}^l verwendet, ergeben sich die Signalverläufe \mathbf{A}^l (vgl. Abbildung 2.11). Mit jedem Level reduziert sich das Signalrauschen und die zu speichernde Datenmenge der Approximationskoeffizienten \mathbf{a}^l . Durch den geringeren Detailgrad und die weiterhin gegebenen Ortsauflösung können auch die Approximationskoeffizienten, ohne vorherige Rücktransformation, für die Analyse der Signalstrukturen und insbesondere für einen Signalabgleich verwendet werden. In der Abbildung 2.10 sind für einen der Detektoren des DIS die Signalverläufe für die Approximationskoeffizienten \mathbf{a}^1 , \mathbf{a}^4 und \mathbf{a}^7 und die dazugehörigen Signalverläufe der Rücktransformationen \mathbf{A}^1 , \mathbf{A}^4 und \mathbf{A}^7 zu sehen. Verglichen mit dem Wavelet-gefilterten Signalverlauf \mathbf{w}^0 besitzt der Signalverlauf \mathbf{A}^7 genügend Struktur, um eine Geschwindigkeit oder absolute Positionsbestimmung durchzuführen. Für die Filterung der Messsignale und zur Repräsentation der Approximations- und Detailkoeffizienten werden Daubechies Wavelets (db Wavelets) verwendet. Daubechies Wavelets eignen sich insbesondere zur Darstellung von Polynomstrukturen, wie sie innerhalb der gemessenen ferromagnetischen Signalstrukturen auftreten (vgl. Abbildung 2.10) [57]. Um komplexe Strukturen bzw. einzelnen Signalkomponenten akkurat wiederzugeben, wird die db20-Wavelet verwendet.

2.8 Fazit Sensorkonzept

Es wurde das theoretische Wirkprinzip zur Erfassung der ferromagnetischen Inhomogenitäten und die Funktionsweise der Messschaltung beschrieben. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde ein funktionsfähiger Prototyp des DIS aufgebaut. Die Sensorplattform besteht aus zwei Detektoren A und B, den dazugehörigen Messschaltungen und einer MCU. Die Ergebnisse der realen Messschaltung stimmen mit den Ergebnissen aus den Simulationen überein. Aus der vorgegebenen Arbeitsfrequenz $f_0 = 30$ kHz konnten die äquidistanten zeitlichen Abstände von $33, \bar{3} \mu\text{s}$ für jede Messung durch die MCU bestätigt werden. Die Unterschiede in den Laufzeitdifferenzen an den beiden Detektoren sind auf Fertigungstoleranzen der elektronischen Bauteile und die unterschiedlichen Positionen entlang der Schiene zurückzuführen. Die ermittelte

Standardabweichung der realen Messschaltung liegt für beide Detektoren unterhalb der theoretischen Auflösung der Messschaltung (vgl. Gleichung 2.4). Zur Unterdrückung des Quantisierungsrauschens in den Messschaltungen wird ein Wavelet-basiertes Filterverfahren auf die Messdaten des DIS angewandt. Mit einem soft-thresholding der Detailkoeffizienten werden definierte Frequenzbänder aus dem Messsignal herausgefiltert, ohne markante Signalstrukturen in den Messsignalen zu verfälschen. Gleichzeitig liefert das Wavelet-basiertes Filterverfahren über die Approximationskoeffizienten ein effektives Verfahren um die Anzahl der zu speichernden Datenpunkte zu reduzieren. Das vorgestellte Sensorkonzept und der DIS erfüllen alle technischen Voraussetzungen, um eine bordautonome Erfassung der Geschwindigkeit und der absoluten Position über die ferromagnetischen Inhomogenitäten zu tätigen.

3 Geschwindigkeitsmessung

Für die Untersuchung der berührungslosen und bordautonomen Geschwindigkeitsmessung kommt ausschließlich der DIS auf dem Schienenfahrzeug zum Einsatz. Das bedeutet, es stehen keine zusätzlichen Sensorinformationen im Schienenfahrzeug oder entlang der Gleisstrecke zu Verfügung, um die Geschwindigkeit oder die absolute Position des Schienenfahrzeugs zu ermitteln. Für eine präzise Geschwindigkeitsmessung ist deshalb ein Messverfahren erforderlich, welches robust gegenüber äußeren Umwelteinflüssen (Schnee, Regen, Spritzwasser, Öl und Staub), verschleißfrei und unempfindlich gegenüber Schlupf zwischen Rad und Schiene ist. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist der DIS mit zwei baugleichen Detektoren (siehe Kapitel 2.3) ausgestattet, die längs zur Fahrtrichtung des Schienenfahrzeugs in einem festen Abstand zueinander angebracht sind (siehe Abbildung 2.7 und 3.1). Mit dem in Kapitel 2.3 beschriebenen elektromagnetischen Messverfahren zur Bestimmung der ferromagnetischen Inhomogenitäten, wird über ein Template-Matching-Verfahren berührungslos die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs bestimmt.

Template-Matching- bzw. Laufzeit-Korrelations-Verfahren besitzen ein breites Anwendungsspektrum, u. a. zur Messung der Entfernung bei Radaren [58], zum Auffinden von korrespondierenden Bildelementen in der digitalen Bildverarbeitung [59] oder zur berührungslosen Geschwindigkeitsbestimmung von Oberflächen [60]. Mit dem Eddy Current Sensor (ECS) wurde das Laufzeit-Korrelations-Verfahren bereits angewandt, um berührungslos die Geschwindigkeit von Schienenfahrzeugen zu bestimmen [16], [17]. Allerdings treten beim ECS aufgrund der periodischen Sensorsignale Mehrdeutigkeiten bei der Signalzuordnung auf, wodurch eine eindeutige Bestimmung der Geschwindigkeit erschwert wird.

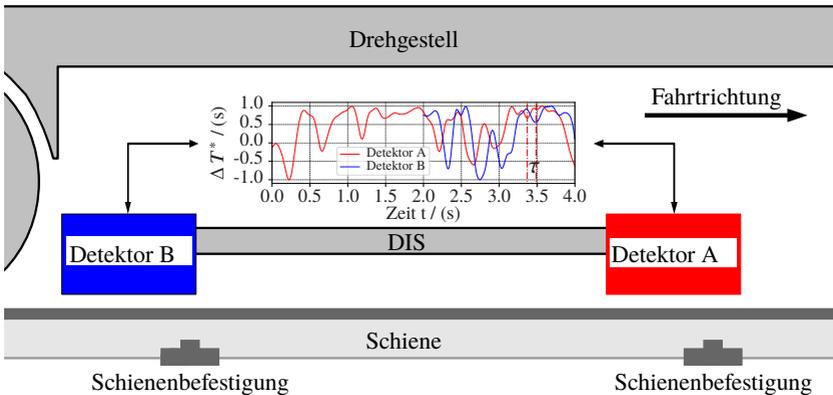


Abbildung 3.1: Seitliche Montageansicht des DIS an einem Schienenfahrzeug in der Nähe des Drehgestells zusammen mit einer schematischen Darstellung der ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Schiene.

3.1 Prinzip der Geschwindigkeitsmessung

Die an den beiden Detektoren des DIS gemessenen ferromagnetischen Inhomogenitäten werden in ein Image- und ein Template-Signal aufgeteilt. Das Image-Signal dient als Referenz und beinhaltet die zuletzt gemessenen ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene. Das Template-Signal beinhaltet ebenfalls die zuletzt gemessenen ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene, jedoch an dem zweiten Detektor. Bei dem Template-Matching werden die Signalverläufe der beiden Detektoren miteinander verglichen und der zeitliche (oder räumliche) Versatz der Signale bestimmt. Dabei wird das kürzere Template-Signal als Schablone verwendet und in dem Image-Signal gesucht. Die Signallängen des Image- und Template-Signals können dabei je nach Anwendungsfall und Zustand des Schienenfahrzeugs (Geschwindigkeit oder Rechenleistung des Auswerterechners) variieren. Dabei sind vor allem die letzten Sekunden der beiden Detektorsignale für eine zeitnahe Geschwindigkeitsbestimmung von Bedeutung. In der Abbildung 3.2 (oben) sind die Wavelet-gefilterten und Min-Max-normierten Signalverläufe (im Intervall $[-1, 1]$) der Detektoren A (rot,

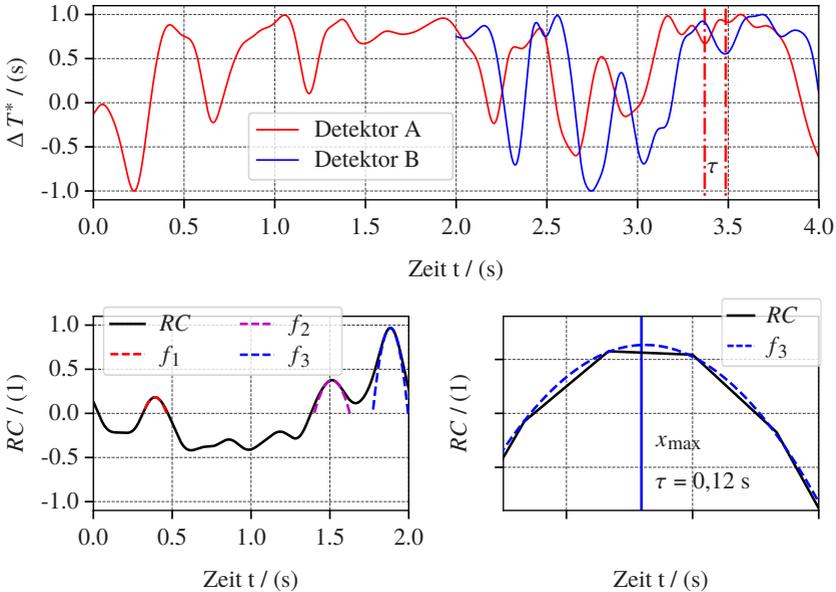


Abbildung 3.2: Oben: Signalverlauf der beiden Detektoren A (Image / 4 s / rot) und B (Template / 2 s / blau) des DIS. Unten links: RC -Signalverlauf der Korrelationskoeffizienten, quadratische Polynome f_1 und f_2 der lokalen Maxima und f_3 des globalen Maximums. Unten rechts: Detailansicht des quadratischen Polynoms f_3 , an dem eine Übereinstimmung von $RC = 0,98$ erreicht wurde. Es ergibt sich ein zeitlicher Versatz von $\tau = 0,12$ s.

Image-Signal) und B (blau, Template-Signal) der letzten vier bzw. zwei Sekunden¹ des DIS zu sehen. Bedingt durch den festen Abstand der Detektoren zueinander und der Montageposition des DIS an dem Drehgestell des Schienenfahrzeugs (siehe Abbildung 3.1) unterscheiden sich die Signalverläufe der beiden Detektoren, bei konstanter Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs, nur durch einen zeitlichen Versatz τ voneinander. Bereits beim ECS wurde ein Korrelationsverfahren verwendet, um den zeitlichen Signalversatz der Signale zu ermitteln [16], [17]. Aufgrund der periodischen Signalstruktur des ECS, vgl. Kapitel 1.4, besitzt die Korrelationsfunktion mehrere nahezu identische Maxima an unterschiedlichen Positionen [17]. Eine eindeutiger Signalversatz

¹ Die zeitlichen Abstufungen können abhängig von der Geschwindigkeit und der Güte des Signales variieren.

ist aufgrund der Mehrdeutigkeiten nicht gegeben. Beim ECS wird dabei stets das erste Maxima aus der Korrelationsfunktion verwendet. Im Vergleich zum ECS besitzt die Korrelationsfunktion RC des DIS durch die Messungen der einzigartigen ferromagnetischen Signaturen der Schiene ein eindeutiges Maximum, vgl. Abbildung 3.2. Bedingt durch die Signallängen, den Abstand der Detektoren zueinander und die Trägheit des Schienenfahrzeugs sind Streckungen und Stauchungen zwischen den Signale aufgrund von Beschleunigungen oder Abbremsvorgängen vernachlässigbar. Die Ähnlichkeit der Signalverläufe wird mit einem Zero Mean Normalized Cross Correlation (ZNCC) [59], [61] Template-Matching-Verfahren bestimmt. Dieses ergibt sich aus:

$$\begin{aligned}
 RC[x, T, I] &= \frac{\sum_{x'=0}^{S_T} (\bar{T}[x'] \cdot I[x + x'])}{\sqrt{\sum_{x'=0}^{S_T} (\bar{T}[x'])^2 \cdot \sum_{x'=0}^{S_T} (\bar{I}[x + x'])^2}} \\
 &= \frac{1}{S_T} \sum_{x'=0}^{S_T} \frac{1}{\sigma_I \sigma_T} \bar{T}[x'] \cdot I[x + x'] \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

mit der diskreten Verschiebung x der Signale zueinander, der Elementlänge des Template S_T , den mittelwertfreien Signalkomponenten \bar{I} , \bar{T} und den dazugehörigen Standardabweichungen σ_I , σ_T . Der Korrelationskoeffizient RC kann Werte aus dem Intervall $[-1, 1]$ annehmen und gibt den Grad des linearen Zusammenhangs der Detektorsignale an. Der Schwerpunkt des ZNCC liegt auf dem Vergleich der Signalstruktur. Das Messverfahren ist dadurch robust gegenüber linearen Verschiebungen in den Messsignalen, die bspw. auf Fertigungstoleranzen der elektrischen Bauteile zurückzuführen sind. Dadurch entfällt die Notwendigkeit, die Detektoren zu kalibrieren oder gegeneinander abzugleichen. Für den Fall, dass $RC = 1$ ist, unterscheiden sich die Detektorsignale A und B höchstens durch einen Skalierungsfaktor oder Offset voneinander. Kleine bzw. negative RC -Koeffizienten repräsentieren einen geringen bzw. antisymmetrischen (negativen) Zusammenhang der Detektorsignale und damit den Bereich in dem keine Übereinstimmung zwischen den Signalen vorliegt. Durch das Messverfahren ist der Versatz x der RC -Funktion (Gleichung 3.1) auf diskrete Werte $\{0, 1, 2, \dots\}$ beschränkt und limitiert dadurch die spätere Geschwindigkeitsauflösung. Um dies zu umgehen, werden die RC -Koeffizienten in der Umgebung der jeweiligen Maxima i mit einem quadratischen Polynom $f_i(x)$

angefittet. Die neue Position des Maxima (siehe Abbildung 3.2 unten links und rechts) wird über die Gleichung:

$$\begin{aligned} x_{\max} &= \arg \max(f_i(x)) \\ &\approx \arg \max(RC[x, T, I]) \end{aligned} \quad (3.2)$$

bestimmt². Zur robusten Prädiktion des zeitlichen Versatzes werden beim DIS zusätzlich die Nebenmaxima, $x_{\max,i}$, im RC -Signalverlauf (siehe Abbildung 3.2 f_1 und f_2) über mehrere Zeitschritte hinweg geclustert. Die Cluster werden so gewählt, dass diejenigen Merkmals-Vektoren $(x_{\max,i}, f_i(x_{\max,i}))_t$, die einander am ähnlichsten sind (Versatz und RC -Koeffizienten über mehrere Zeitschritte t hinweg), einer gemeinsamen Gruppe zugeordnet werden. Dabei variiert die Anzahl der Maxima in der RC -Funktion aufgrund der komplexen ferromagnetischen Signalstrukturen zwischen den Zeitschritten. Zur Gruppierung der unstrukturierten Merkmals-Vektoren wird das Dirichlet Process Mixture Model (DPMM) [62] Clusterverfahren gewählt. Das DPMM verwendet im Gegensatz zu den herkömmlichen Clusteranalysemethoden keine vorab definierte Clustergröße, sondern bestimmt diese aus den Merkmals-Vektoren. In der Abbildung 3.3 sind für 40 Zeitschritte ($\Delta 0,2$ s) die RC -Korrelationsfunktionen mit den dazugehörigen Maxima (für RC -Koeffizienten ≥ 0) zu sehen. Das DPMM-Clustering unterteilt die Merkmals-Vektoren in 7 Cluster, die sich aus den Nebenmaxima C1, C3, C4, C5, C6 und C7 sowie dem Hauptmaximum C2 zusammensetzen und dadurch die Ergebnisse aus den vorherigen Zeitschritten berücksichtigen. Fehldetektionen oder Mehrdeutigkeiten aufgrund von zeitlich begrenzten Signalschwankungen (siehe schwarze Kästen in der Abbildung 3.3) werden über eine Prädiktion der Merkmals-Vektoren unterbunden. Liegt keiner der aktuellen Merkmals-Vektoren in dem vorhergesagten Cluster bzw. ist die Vorhersagewahrscheinlichkeit nicht aussagekräftig genug, wird der vorherige Wert verwendet und die aktuelle Messung verworfen. Das Cluster C2 (roter Kasten) in der Abbildung 3.3 an der Position $\mu_x = 2808,49$ besitzt einen durchschnittlichen Korrelationswert von $\mu_{RC} = 0,97$ und dadurch die höchste

² Im Vergleich zum DIS besitzt die Korrelationsfunktion des ECS mehrere nahezu identische Maxima an unterschiedlichen Positionen in der Korrelationsfunktion [17]. Störungen im Messsignal können dabei zu einer falschen Signalversatz führen. Eine Bestimmung der Geschwindigkeit ist dann nicht mehr gegeben.

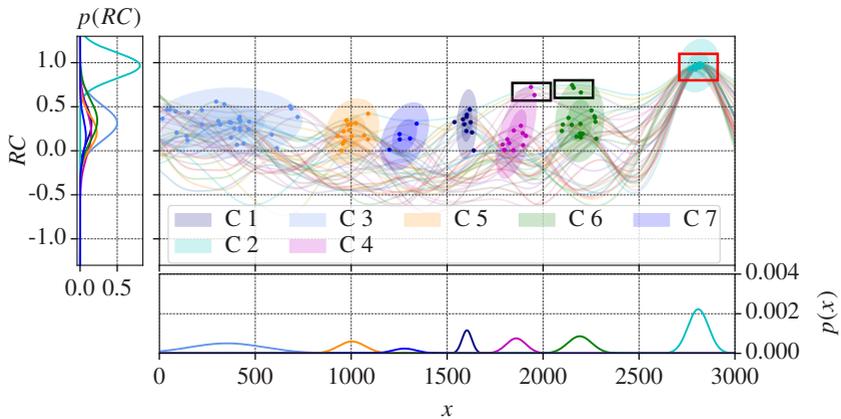


Abbildung 3.3: Zeitliches DPMM-Clustering der lokalen Maxima $f_i(x_{\max,i})$ der Korrelationsfunktion RC über eine Dauer von 8 s, mit der einfachen σ Umgebung (inneren Ellipse) und der doppelten σ Umgebung (äußeren Ellipse). Für eine bessere Darstellung wurde die Messfrequenz des DIS auf $f_0 = 1,5$ kHz reduziert.

Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Mit der Messfrequenz f_0 des DIS und den Startzeiten t_T und t_I der Signalverläufe des Template- und Imagesignals, ergibt sich der zeitliche Versatz der Detektorsignale aus:

$$\tau = (t_T - t_I) - x_{\max} \cdot \frac{1}{f_0}. \quad (3.3)$$

Mit dem Abstand d der Detektoren ist die Geschwindigkeit:

$$v = \frac{d}{\tau} \quad (3.4)$$

des Schienenfahrzeugs gegeben. Das in der Abbildung 3.3 gezeigte Szenario zeigt über den Cluster C2 den Geschwindigkeitsverlauf der letzten acht Sekunden an. Es ist anzumerken, dass im Gegensatz zum ECS³ der Abstand der Detektoren beim DIS aufgrund der nicht periodischen Signalstruktur beliebig gewählt werden kann. Bei hohen Geschwindigkeiten profitiert insbesondere das Template-Matching-Verfahren von einem großen Abstand zwischen den Detektoren.

³ Beim ECS ist der Abstand durch den mittleren Schwellenabstand (ca. 60 cm) gegeben.



Abbildung 3.4: Darstellung des Schienenprüfstandes zusammen mit einer Detailansicht des DIS.

3.2 Versuche am Schienenprüfstand

Die Funktionsweise des DIS wurde auf dem Schienenprüfstand unter kontrollierten Laborbedingungen getestet. Der Schienenprüfstand, siehe Abbildung 3.4, ist mit einem beweglichen Führungsschlitten ausgestattet. An diesem wird der DIS befestigt und periodisch mit einer Maximalgeschwindigkeit von 3 m/s über die darunterliegenden Schienenelemente geführt [34]. Mit einer effektiven Länge von 6,7 m werden über den DIS die ferromagnetischen Inhomogenitäten der darunterliegenden Vignolschienen und eines Weichenelementes (Herzstück) erfasst. Anhand des Schienenprüfstandes wird die Hardware des DIS, die Signalfilterung und die Auswertesoftware für die Geschwindigkeitsbestimmung unter kontrollierten Laborbedingungen untersucht und mit der Referenzgeschwindigkeit des Schienenprüfstandes verglichen. Der Aufbau ermöglicht es, unterschiedliche Montagepositionen über dem Schienenkopf und quer zur Fahrtrichtung miteinander zu vergleichen.

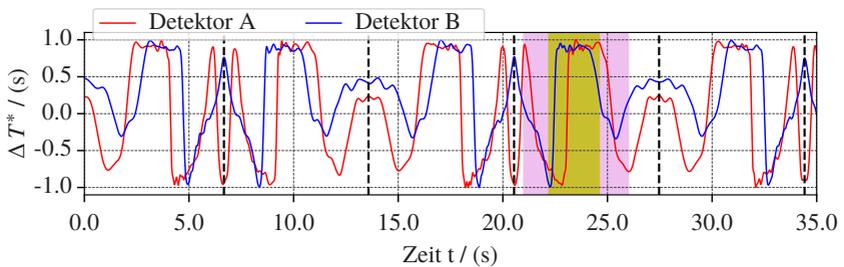


Abbildung 3.5: Signalverlauf der Detektoren A (rot) und B (blau) auf dem Schienenprüfstand mit den Wendepunkten des Führungsschlittens (schwarze gestrichelte Linien). Die ferromagnetischen Strukturen des Detektors B (gelber Signalbereich) sind vollständig in den ferromagnetischen Strukturen des Detektors A (magentafarbener Signalbereich) enthalten [37].

3.2.1 Fahrrichtungserkennung

In der Abbildung 3.5 sind für die beiden Detektoren des DIS die gemessenen ferromagnetischen Inhomogenitäten auf dem Schienenprüfstand zu sehen. Durch die kontinuierliche Messwerterfassung des DIS und den ständigen Richtungswechsel des Führungsschlittens auf dem Schienenprüfstand tritt an den Umkehrpunkten ein Phasensprung zwischen den beiden Signalverläufen auf. Kommt es zu einem Richtungswechsel (schwarz gestrichelte Linien), muss die Zuordnung der Detektoren zu den Signalkomponenten T und I für das Template-Matching (Gleichung 3.1) getauscht werden. Anderenfalls beinhaltet das gesuchte Template-Signal Merkmalspunkte der Schiene, die in dem Image-Signal noch nicht gemessen wurden. Ein Signalmatching bzw. die Geschwindigkeitsbestimmung ist in diesem Fall nur noch bedingt möglich. Die Erkennung der Fahrrichtung und damit die Zuordnung der Signale zu den Detektoren wird bei der Initialisierung des DIS (beim Anfahren) durchgeführt. Zunächst wird eines der Detektorsignale willkürlich als Image-Signal gewählt. Die Länge der ferromagnetischen Signatur ist so gewählt, dass die Signalkomponente des zweiten Detektorsignals (Template-Signal) vollständig vom ersten eingeschlossen ist (vgl. Abbildung 3.5 gelber und magentafarbener Signalbereich). Unabhängig von der Fahrrichtung und der Zuordnung der Detektoren sind die ferromagnetischen Signalstrukturen des Template-Signals dadurch immer vollständig im Image-Signal enthalten. Aus dem zeitlichen Versatz (Gleichung 3.3) ergibt sich

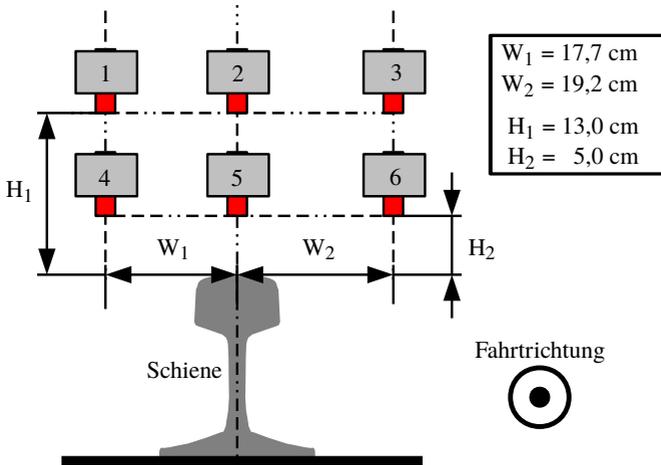


Abbildung 3.6: Querschnitt durch eine Vignolschiene. Dargestellt sind die unterschiedlichen Montagepositionen des DIS über dem Schienenkopf [37].

die Bewegungsrichtung des Schienenfahrzeugs in Abhängigkeit des Vorzeichens:

$$\text{sgn}(\tau) = \begin{cases} -1 & \text{negative Fahrtrichtung} \\ 1 & \text{positive Fahrtrichtung} \end{cases} \quad (3.5)$$

Über die Fahrtrichtung sind die Signalkomponenten des Template- und des Image-Signals eindeutig den Detektoren zuzuordnen. Dies ist entscheidend, um bei niedrigen Geschwindigkeiten die Position des Maximums exakt mit der RC -Korrelationsfunktion (siehe Abbildung 3.3) bestimmen zu können.

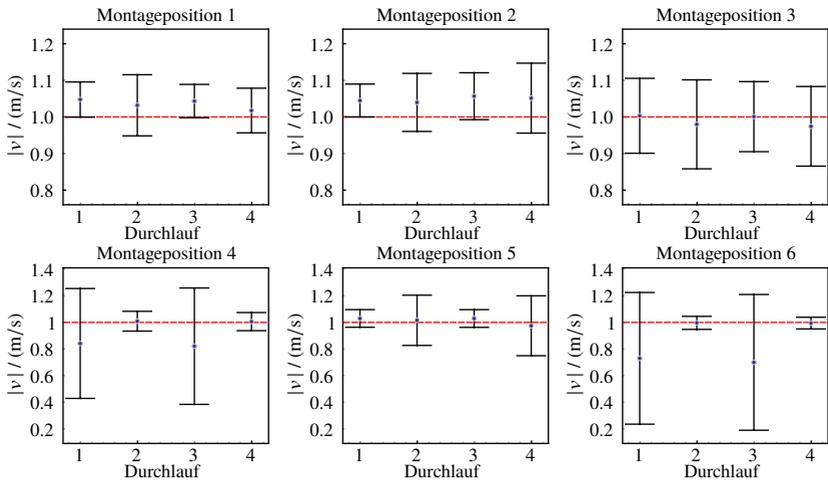


Abbildung 3.7: Betrag der mittleren Geschwindigkeit $|\bar{v}_{\text{DIS}}|$ mit der jeweiligen Standardabweichung σ_v des DIS für die Montagepositionen 1 bis 6 an dem Schienenprüfstand für vier Durchläufe. Rote gestrichelte Linie: Referenzgeschwindigkeit $v_P = 1 \text{ m/s}$ an dem Schienenprüfstand.

3.2.2 Einfluss der Montageposition auf die Geschwindigkeitsbestimmung

Die ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Schiene dienen als Landmarken für die Geschwindigkeitsbestimmung des Schienenfahrzeugs. Für eine optimale Erfassung der ferromagnetischen Inhomogenitäten ist eine Montageposition des DIS in der Nähe des Drehgestells an dem Schienenfahrzeug vorgesehen. Während einer Kurvenfahrt wird dadurch sichergestellt, dass beide Detektoren dieselben ferromagnetischen Strukturen erfassen. Zudem wird eine zu große Auslenkung der Detektoren quer zur Schiene verhindert. Um die Auswirkungen der Montagepositionen auf die Signalqualität an den Detektoren zu untersuchen, werden für verschiedene Montageposition (vgl. Abbildung 3.6 und A.6) auf dem Schienenprüfstand Geschwindigkeitsmessungen mit dem DIS durchgeführt. In der Abbildung 3.7 sind die Beträge der mittleren Geschwindigkeiten \bar{v}_{DIS} für die Montagepositionen (1 bis 6) zusammen mit den Standardabweichungen σ für jeweils vier Fahrten zu sehen. Die vom Schienenprüfstand vorgegebene Geschwindigkeit liegt für alle Messungen innerhalb der ermittelten Standardabweichung des DIS. Für eine asymmetrische Anordnung der

Tabelle 3.1: Mittlerer Geschwindigkeitsverlauf \bar{v}_{DIS} des DIS auf dem Schienenprüfstand für die Durchläufe a bis h in einem Abstand von 10 cm über dem Schienenkopf. Mit der Standardabweichung σ , der eingestellten Referenzgeschwindigkeit v_{P} des Schienenprüfstandes und der Geschwindigkeitsabweichung $|\Delta v|$ [38].

	a	b	c	d	e	f	g	h
\bar{v}_{DIS} / (m/s)	1,09	-1,21	1,27	-1,28	1,47	-1,46	1,44	-1,60
σ / (m/s)	0,12	0,13	0,11	0,10	0,06	0,12	0,12	0,19
v_{P} / (m/s)	1,00	-1,20	1,20	-1,20	1,40	-1,40	-1,60	1,60
$ \Delta v $ / (m/s)	0,09	0,01	0,07	0,08	0,07	0,06	0,16	0,00

der mit dem DIS ermittelten Standardabweichung bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeitsabweichung von 0,05 m/s. Bei dem Durchlauf g ergibt sich die höchste Geschwindigkeitsabweichung des DIS mit einer Abweichung von $\Delta v = 0,16$ m/s zu der eingestellten Geschwindigkeit auf dem Schienenprüfstand. Die erhöhte Abweichung ist auf abrupte Richtungswechsel an den Umkehrpunkten des Schienenprüfstandes und fehlende Signalvariabilität an den Detektoren zurückzuführen⁴.

3.2.4 Fazit Schienenprüfstand

Den Kern der Untersuchungen am Schienenprüfstand bildete das berührungslose Messverfahren zur Erfassen der ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Schiene, die Signalfilterung (vgl. Kapitel 2.7), die Richtungserkennung und die Bestimmung der Geschwindigkeit. Darüber hinaus wurden verschiedene Montagepositionen und deren Einfluss auf die Geschwindigkeitsmessung untersucht. Unabhängig von der Montageposition des DIS ergaben sich für alle Fahrten auf dem Schienenprüfstand im anspruchsvollen Niedriggeschwindigkeitsbereich (< 2 m/s) Abweichungen, die unterhalb der geforderten 0,56 m/s liegen und damit den Anforderungen moderner Zugbeeinflussungssysteme, wie dem ETCS, für niedrige Geschwindigkeiten (< 30 km/h) genügen [7]. Unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Vorgaben wurde eine ideale Montageposition des DIS zur Erfassung der ferromagnetischen Inhomogenitäten in

⁴ Umkehrpunkte des Schienenprüfstandes repräsentiert ein Szenario, welches im regulären Betrieb nicht vorgesehen ist.

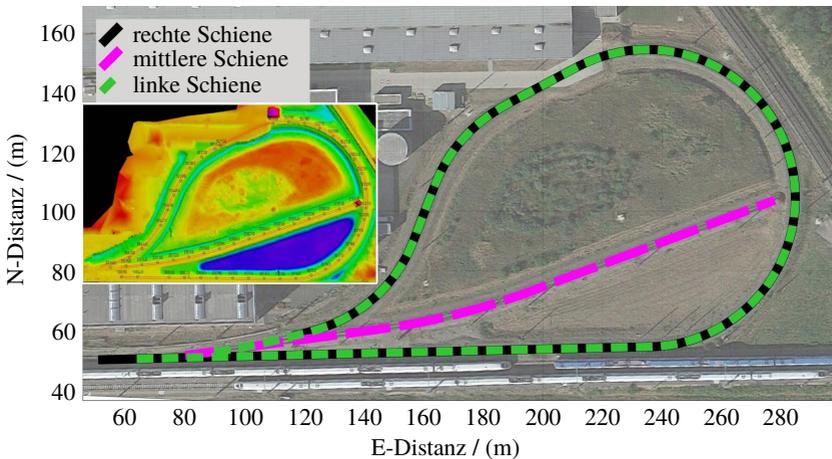


Abbildung 3.9: Satellitenansicht des T4-Rings (Map data ©2016 Google Z:32U; E:306076; N:5666477). Die Gleisstrecke ist in drei Schienenabschnitte, die rechte, mittlere und linke Schiene, unterteilt. Heatmap: Digitales Höhenmodell und Schienenvektorisierung zusammen mit den Kollimationsmarkierungen (schwarze Kreise) [64].

der Nähe des Drehgestells über dem Schienenkopf ermittelt. Dadurch ist eine minimale seitliche Auslenkung der Detektoren bei Kurvenfahrten gewährleistet.

3.3 Feldversuche

Ausgehend von den Ergebnissen auf dem Schienenprüfstand wurden Untersuchungen mit dem DIS auf einem realen Schienenfahrzeug auf der Testanlage des PCW⁵ durchgeführt. Die Versuchsfahrten fanden bei starkem Regen auf der Teststrecke T4 statt. Dieser Streckenabschnitt besitzt ein redundantes und diversitär aufgebautes Messsystem zur absoluten Positionsbestimmung, über welches ebenfalls die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs ermittelt wird. Die Auflösung und insbesondere die Genauigkeit der Referenzsensorik, die auf dem T4 zu Verfügung steht, liegt dabei weit über dem Standard kommerzieller Sensoren, die im Schienenverkehr zum Einsatz kommen. Das georeferenzierte

⁵ Prüf- und Validationcenter Wegberg-Wildenrath (PCW).

Testgelände besitzt dadurch ideale Voraussetzungen, um die Leistungsfähigkeit des DIS gefahrlos unter realen Bedingungen erproben zu können.

3.3.1 Versuchsaufbau und Referenzsensorik

Für die Erfassung der ferromagnetischen Strukturen (siehe Kapitel 2.4) wird die ermittelte ideale Montageposition aus Kapitel 3.2.2 für den DIS (in der Nähe der Vorderachse des Erprobungsfahrzeugs⁶ und einem Abstand von ca. 10 cm über dem Schienenkopf) verwendet (siehe Abbildung 2.7). Das Erprobungsfahrzeug verfügt über einen elektrischen Antrieb und wird mit einer Fernsteuerung über die Gleise bewegt. Als Teststrecke wurde das Testgleis T4⁷ (siehe Abbildung 3.9), welches sich innerhalb des railGATE [65] befindet, verwendet. Der T4 besitzt ein eingemessenes, hoch präzises geodätisches Netz, welches aus sechs georeferenzierten Messstationen (Beobachtungspfeiler) besteht. Zusammen mit dem railGATE bilden diese die Referenz für die Geschwindigkeit und die Lokalisierung des Erprobungsfahrzeugs. Das Gesamtsystem wurde mit einer Genauigkeit im Submillimeterbereich [66], [64] eingemessen. Im Nachfolgenden werden die Referenzsensoren des Testfeldes bzw. des Erprobungsfahrzeugs vorgestellt:

- Rundprisma / Leica Viva TS15 (TS15):
Das Leica Viva TS15 ist ein LASER-Tachymeter der Schweizer Firma Leica Geosystems AG [67]. Über eine von sechs georeferenzierten Messstationen (Beobachtungspfeiler) wird mit Hilfe eines Lasers der Winkel und die Entfernung zu einem Rundprisma ermittelt [66]. Mit den Beobachtungspfeilern und den Messpunkten des TS15 wird das Rundprisma, welches sich zusammen mit der GNSS-Antenne auf dem Erprobungsfahrzeug befindet, in ein kartesisches Koordinatensystem (UTM32) überführt.
- railGATE / Novatel GPS 703 GGG (GNSS):
Bei dem railGATE handelt es sich um eine Versuchsanlage zur Untersuchung, Erprobung und Beurteilung der nächsten Generation von GNSS-Receivern und deren Anwendung im Bahnbereich. Das railGATE besteht

⁶ Gang car (Meterspur) der Firma ARIC / Automotive and Rail Innovation Center.

⁷ Länge 553 m / Radius 50 m.

aus acht, 40 bis 60 Meter hohen Türmen, den sogenannten Galileo Pseudoliten (terrestrischer Sender), die als künstliche Satelliten fungieren und Galileo-konforme Signale bereitstellen. Die Versuchsanlage des PCW ist dadurch bereits in der Lage, das Satellitennavigationssystem Galileo zu nutzen. Aus den Standorten der Pseudoliten und der Laufzeitmessung der einzelnen Signale ergibt sich die Position der GPS-703-GGG Antenne [68]. Das railGATE besitzt eine Positionsgenauigkeit von 1,3 m (Base-Mode) bzw. 0,3 m im Assisted Mode [69].

Das Rundprisma und die GNSS-Antenne befinden sich auf derselben vertikalen Achse und sind gemeinsam an dem Erprobungsfahrzeug montiert. Das

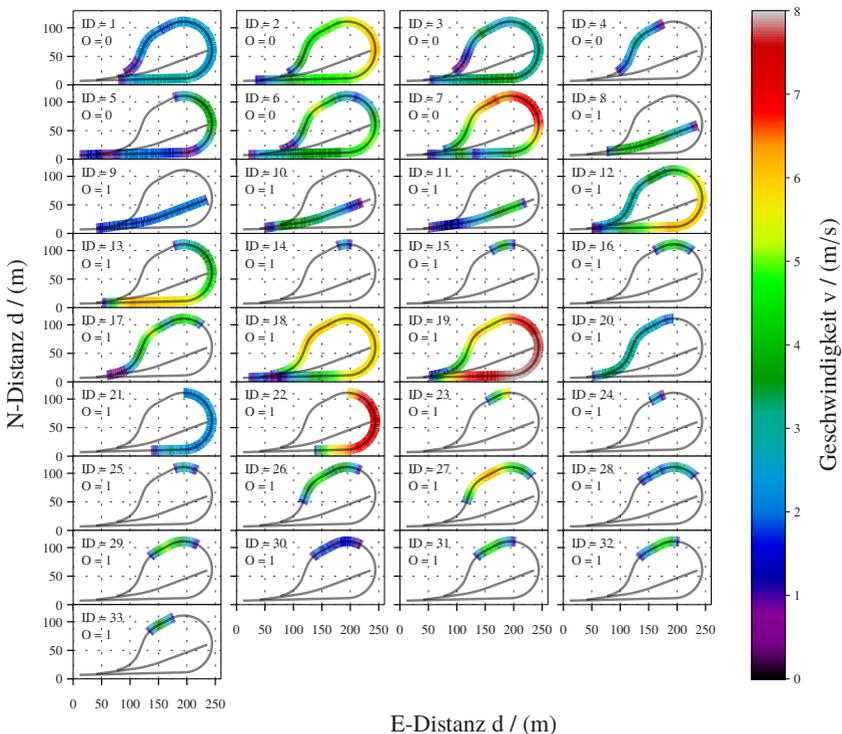


Abbildung 3.10: Position und Geschwindigkeit des Erprobungsfahrzeugs auf der Teststrecke T4 (Koordinatenoffset Z:32U; E:306026; N:5666467) unterteilt in zusammenhängende und nicht überlappende Sequenzen mit einer eindeutigen ID. O ist die Position des DIS über der rechten (0) bzw. linken (1) Schiene eines Gleisabschnittes.

Gesamtsystem besitzt eine absolute Genauigkeit von ± 2 cm und eine relative Genauigkeit von ± 2 mm zu den Beobachtungspfeilern und damit eine höhere Auflösung als herkömmliche Sensoren, die für die Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen in diesem Bereich zum Einsatz kommen [66]. Aus dem zeitlichen Abstand von zwei aufeinanderfolgenden Koordinatenmesspunkten wird die Geschwindigkeit des Erprobungsfahrzeugs ermittelt.

3.3.2 Versuchsfahrten

Aus der unregelmäßigen Verteilung der ferromagnetischen Strukturen, die sich entlang der Schiene befinden, sind für das eingesetzte Mess- und Auswerteverfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung vor allem diejenigen Signalabschnitte von besonderem Interesse, bei denen eine geringe Signalvariabilität an den Detektoren gemessen wird. Dies ist insbesondere im Niedriggeschwindigkeitsbereich der Fall, weshalb es ein besonders anspruchsvolles Testscenario darstellt. Um die Leistungsfähigkeit des DIS speziell unter diesen erschwerten Bedingungen zu untersuchen, wurden auf der Teststrecke unterschiedliche Anfahrvorgänge (0 m/s bis ≈ 1 m/s) und Rangierfahrten im Niedriggeschwindigkeitsbereich (≈ 1 m/s bis 4 m/s) durchgeführt. Dazwischen befinden sich Abschnitte, in denen mit konstanter Geschwindigkeit über die Teststrecke gefahren wurde. Die maximale Geschwindigkeit betrug dabei 8 m/s. Eine detaillierte Ansicht der einzelnen Streckenabschnitte (ID 1 bis 33) mit den dazugehörigen Geschwindigkeitsprofilen ist in der Abbildung 3.10 zu sehen. Der Parameter O (0 rechte Schiene und 1 linke Schiene) kennzeichnet die Montageposition des DIS über der jeweiligen Schiene. Durch das Rangieren auf dem T4 wechselt die Schiene, über der sich der DIS befindet. Beide Schienen eines Streckenabschnittes besitzen eine individuelle ferromagnetische Signatur. In der Abbildung 3.9 ist dies durch die grüne und schwarze Kurve gekennzeichnet.

3.3.3 Geschwindigkeitsmessungen im Feldversuch

Für die Geschwindigkeitsuntersuchungen des DIS werden die oben beschriebenen Fahrmanöver auf der Teststrecke T4 des PCW durchgeführt und mit den Messungen der Referenzsensoren verglichen. Eine detaillierte Ansicht der gemessenen ferromagnetischen Strukturen des Fahrmanöver mit der ID = 3

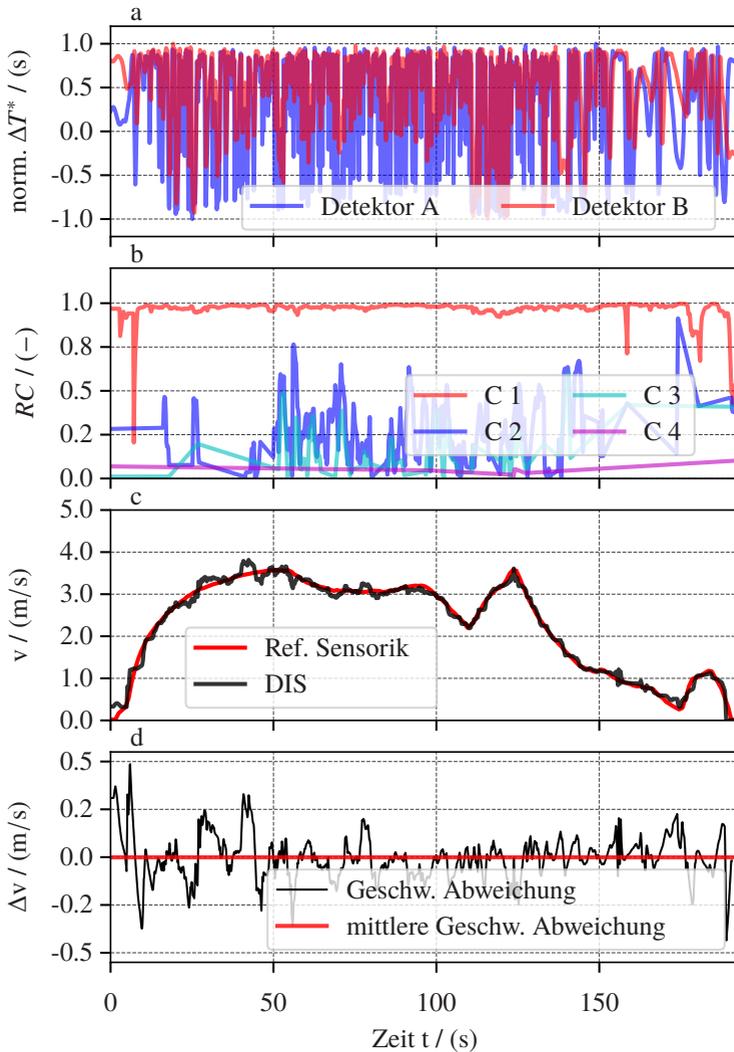


Abbildung 3.11: (a) Detailansicht der ferromagnetischen Inhomogenitäten für das Fahrmanöver ID = 3. Aus den ferromagnetischen Inhomogenitäten werden die Cluster (b) und die Geschwindigkeit (c) des Erprobungsfahrzeugs ermittelt. (d) zeigt die Geschwindigkeitsabweichung zu der Referenzsensorik.

(siehe Abbildung 3.10) ist in der Abbildung 3.11 a) zu sehen. Die Signal-
komponenten des Image- und Templatesignals besitzen für den Vorgang der
Geschwindigkeitsmessung jeweils eine zeitliche Länge von 7,0 s und 4,5 s. Die
einzelnen Maxima der *RC*-Funktionen werden mit einem DPMM-Clustering
abschnittsweise in die Cluster {C1, C2, C3, ...} aufgeteilt und für die gesamte
Dauer des Fahrmanövers miteinander verknüpft (siehe b). Dadurch werden
Mehrdeutigkeiten im Niedriggeschwindigkeitsbereich (siehe $t = 174$ s), die
durch fehlenden Signalvariabilität auftreten, kompensiert. Das Cluster C1, mit
einem mittleren *RC*-Koeffizienten von 0,96 und einer Standardabweichung von
0,07, entspricht dem wahrscheinlichsten zeitlichen Versatz für das gesamte Fahr-
manöver. Aus dem Abstand der Detektoren ($d = 0,6$ m) ergibt sich für jeden Zeit-
schritt die Geschwindigkeit des Erprobungsfahrzeugs über die Gleichung 3.4.
In der Abbildung 3.11 (c) ist der dazugehörige zeitliche Verlauf zusammen mit
der Referenzgeschwindigkeit zu sehen. Für Geschwindigkeiten kleiner 0,5 m/s
($t = 0, 158, 192$ s) ist ein Rückgang der Signalvariabilität an den Detektoren und
ein Anstieg der Geschwindigkeitsabweichung zur Referenzgeschwindigkeit zu
beobachten. Für das gesamte Fahrmanöver ergibt sich eine mittlere Geschwin-
digkeitsabweichung des DIS zur Referenzgeschwindigkeit von $\Delta v \approx 0$ m/s
und eine Standardabweichung von $\sigma = 0,12$ m/s, siehe Abbildung 3.11 (d).
Für das gesamte Fahrmanöver liegt die Geschwindigkeitsabweichung innerhalb
der geforderten minimal bzw. maximal erlaubten Geschwindigkeitsabweichung
($\pm 0,56$ m/s), die für das ETCS vorgesehen ist [7]. In der Abbildung 3.12 ist ein
weiteres Rangier-Szenario, bestehend aus den Fahrmanövern ID = 25 bis 33
(vgl. Abbildung 3.10), zu sehen. Bei diesen Fahrmanövern handelt es sich
um mehrere aufeinanderfolgende Fahrtrichtungswechsel, in denen das Schie-
nenfahrzeug beschleunigt, abbremst und anschließend in die Gegenrichtung
erneut beschleunigt wurde. Die einzelnen Richtungswechsel gehen dabei naht-
los ineinander über, wodurch das Erprobungsfahrzeug nur für eine sehr kurze
Zeit zum Stehen kommt. Die Richtungswechsel sind an den Positionen $t = 23,$
71, 110, 161, 197, 270, 304, 337 s, insbesondere durch die Signalverläufe an
den Detektoren (a) und dem Cluster C1 (b), zu erkennen. Das Image- und
Templatesignal besitzen auch hier eine zeitliche Länge von 7,0 s und 4,5 s.
Durch den häufigen Richtungswechsel liegt der mittlere *RC*-Koeffizient des
C1-Clusters bei 0,90 mit einer Standardabweichung von 0,16. Im Vergleich zu
der verwendeten Referenzsensorik liefert der DIS eine Richtung der ermittelten
Geschwindigkeit des Erprobungsfahrzeugs und erlaubt somit, die Fahrtrichtung
aus den ferromagnetischen Signalen zu extrahieren. In der Abbildung 3.12 (c)
sind zur besseren Darstellung beide Geschwindigkeitsgrößen des DIS (DIS und

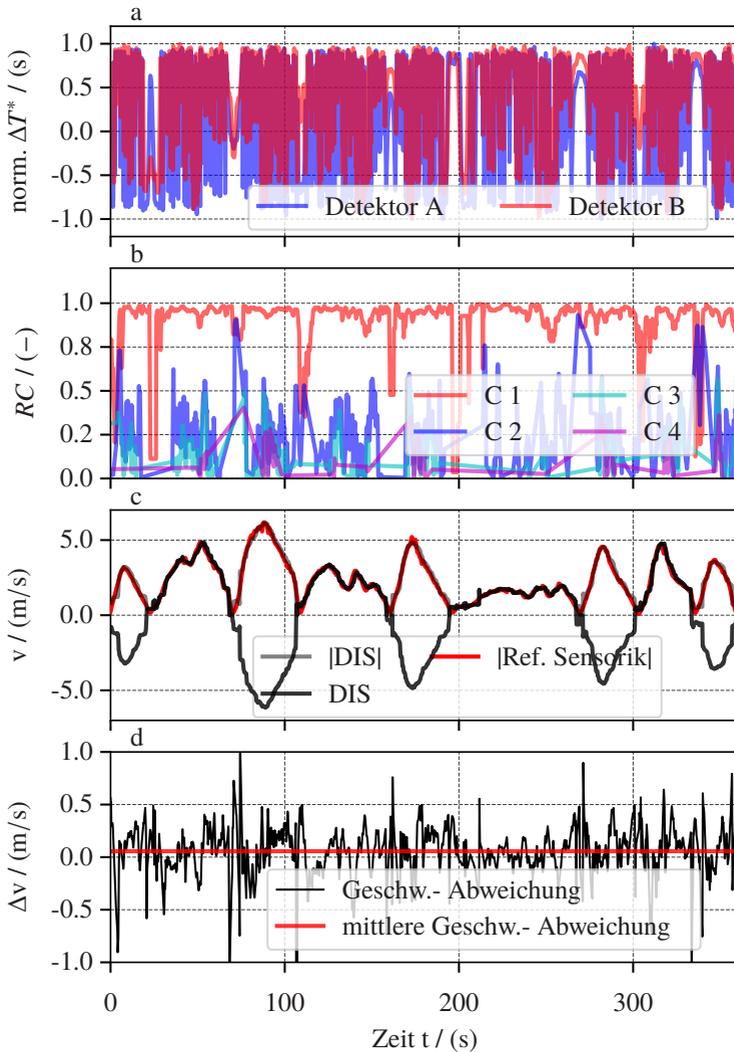


Abbildung 3.12: (a) Detailansicht der ferromagnetischen Inhomogenitäten für die Fahrmanöver ID = 25 bis 33. Aus den ferromagnetischen Inhomogenitäten werden die Cluster (b) und die Geschwindigkeit (c) des Erprobungsfahrzeugs ermittelt. (d) zeigt die Geschwindigkeitsabweichung zu der Referenzsensorik.

Tabelle 3.2: Mittlere Geschwindigkeitsabweichung Δv zu den Referenzsensoren GNSS und TS15 sowie die Standardabweichung σ . Untersucht wurden jeweils die Fahrmanöver ID = 1 bis 33 für unterschiedliche Templatelängen. ⁺ Bei den Übereinstimmungen handelt es sich um die prozentualen Anteile der Geschwindigkeiten des DIS, die eine Abweichung von maximal $\pm 0,56$ m/s aufweisen und damit die Anforderungen des ETCS erfüllen. * Ist die Templatelänge mit den besten Geschwindigkeitsergebnissen.

		Templatelänge / (s)					
		1	2	3	4*	4,5	5
Δv / (m/s)	GNSS	-0,06	-0,10	≈ 0	0,02	0,01	0,01
	TS15	-0,07	≈ 0	0,03	≈ 0	0,02	0,06
σ / (m/s)	GNSS	0,37	0,45	0,30	0,19	0,23	0,24
	TS15	0,79	0,5	0,56	0,38	0,40	0,60
Übereinstimmungen ⁺ / (%)	GNSS	89	88	95	97	97	96
	TS15	72	90	93	93	93	92

[DIS]) und die Referenzgeschwindigkeit abgebildet. Die mittlere Geschwindigkeitsabweichung Δv für das Fahrmanöver ID = 25 bis 33 beträgt dabei 0,05 m/s mit einer Standardabweichung von 0,23 m/s (vgl. Tabelle 3.3). In der Abbildung 3.13 links ist die Häufigkeit der Geschwindigkeitsabweichung $\Delta v_{\text{DIS-Ref}}$ über die Referenzgeschwindigkeit für die Fahrmanöver ID = 1 bis 33, für einen Zeitraum von ca. 40 Minuten, farbcodiert dargestellt. Auf der rechten Seite ist das dazugehörige Histogramm der Häufigkeit über die akkumulierten Geschwindigkeitsabweichungen zu sehen. In beiden Darstellungen sind zusätzlich die minimal und maximal zulässigen Geschwindigkeitsabweichung für das ETCS, blau und rot gestrichelte Linie, dargestellt. Die vereinzelt auftretenden Abweichungen in den Bereichen zwischen 0 bis 1 m/s und 2,5 m/s zu der Referenzgeschwindigkeit resultieren aus der geringen Signalvariabilität an den Detektoren. Durch ein längeres Templatesignal können die Ausreißer teilweise kompensiert werden. Diese verursachen aber einen längeren Nachlauf bei der Geschwindigkeitsmessung. Um auf schnell wechselnde Geschwindigkeitsänderungen reagieren zu können, ist ein kurzes Templatesignal zu bevorzugen. In der Tabelle 3.2 ist eine Übersicht der untersuchten Templatelängen und den daraus ermittelten mittleren Geschwindigkeitsabweichung Δv des DIS zu den Referenzsensoren (GNSS und TS15) sowie die Standardabweichung σ für die Fahrmanöver ID = 1 bis 33 zu sehen. Durch die Verwendung eines längeren

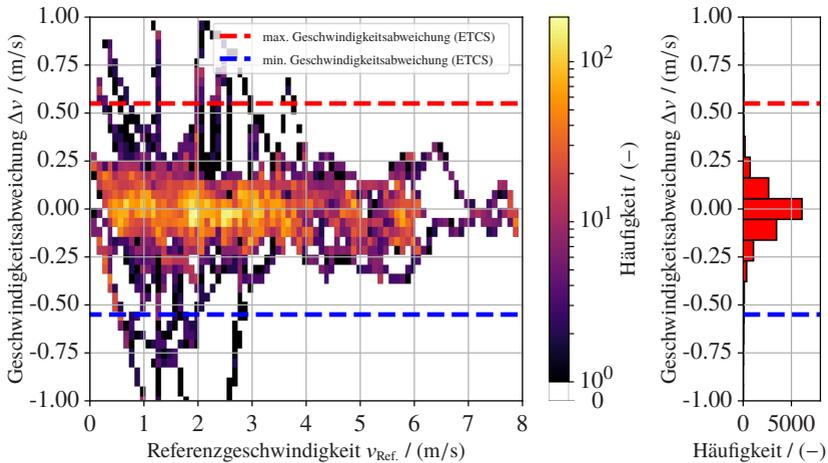


Abbildung 3.13: Links: Häufigkeit der Geschwindigkeitsabweichung aufgetragen über die Referenzgeschwindigkeit v_{Ref} des Schienenfahrzeugs für die Streckenabschnitte ID = 1 bis 33. Rechts: Histogramm der Häufigkeit akkumuliert über alle Geschwindigkeiten. Die blau und rot gestrichelte Linie kennzeichnen die minimale und maximale zulässige Geschwindigkeitsabweichung nach ETCS [7].

Templates profitiert vor allem der Niedriggeschwindigkeitsbereich. Für eine Templatelänge von 4 Sekunden besitzen 93 % bzw. 97 % (vgl. Tabelle 3.3) aller gemessenen Geschwindigkeiten die über den DIS ermittelt wurden eine Geschwindigkeitsabweichung von weniger als 0,56 m/s und entspricht somit ebenfalls dem ETCS Standard [7].

3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Um den Anforderungen moderner Zugkontroll- und Zugsicherungssysteme zu genügen und den Einschränkungen heutiger Geschwindigkeitssensoren entgegenzuwirken, wurde ein neuartiges Sensorkonzept entwickelt. Durch ein elektromagnetisches Messverfahren, welches für die Bestimmung der ferromagnetischen Inhomogenitäten verwendet wird, kann die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs berührungslos, d. h. ohne Verschleiß des Radumfangs oder Schlupf zwischen Schiene und Rad, ermittelt werden. Die Robustheit des Messverfahrens konnte anhand von Messungen auf dem PCW unter regnerischen

Tabelle 3.3: Abweichung zwischen der ermittelten Geschwindigkeit des DIS und der Referenzgeschwindigkeit für unterschiedliche Fahrmanöver (ID).

	ID = 3	ID = 25 bis 33
Templatelänge / (s)	4,0	4,0
Δv / (m/s)	≈ 0	0,05
σ / (m/s)	0,12	0,23

Wetterbedingungen nachgewiesen werden. Das Messverfahren des DIS und die Geschwindigkeitsbestimmung wurden unter kontrollierten Laborbedingungen an einem Schienenprüfstand und auf einer Teststrecke des PCW unter realen Betriebsbedingungen evaluiert. Aus den Untersuchungen konnte eine ideale Montageposition in der Nähe des Drehgestells in einer Höhe von ca. 10 cm über dem Schienenkopf ermittelt werden. Mit einer Templatelänge von 4 Sekunden lagen die ermittelten Geschwindigkeiten in der Nähe der verwendeten Referenzsensorik. Die Referenzsensorik weist dabei eine Genauigkeit auf, die weit über den Anforderungen heutiger Sensoren in diesem Anwendungsbereich liegen. Für alle untersuchten Szenarien ergab sich eine Geschwindigkeit, deren Abweichung zu der Referenzgeschwindigkeit die Anforderungen des ETCS im anspruchsvollen Niedriggeschwindigkeitsbereich erfüllen. Die Ergebnisse zeigen deutlich das Potenzial der streckenseitigen ferromagnetischen Inhomogenitäten in Verbindung mit dem DIS auf.

4 Kartierung und Positionsbestimmung

In dem vorherigen Kapitel wurde gezeigt, wie die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene in Kombination mit dem DIS dazu verwendet werden, um die Geschwindigkeit eines Schienenfahrzeugs zu bestimmen. Wie bereits aus den vorangegangenen Untersuchungen bekannt, reicht die Kenntnis der Geschwindigkeit nicht aus, um eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs im Gleisnetz zu ermitteln. Hierfür sind zusätzliche Informationen, bspw. in Form von Merkmalen, die sich entlang der Gleisstrecke befinden, notwendig. Erst durch die Zuordnung der ferromagnetischen Inhomogenitäten an das jeweilige Schienenelement ergeben sich eindeutige Landmarken, die in einer Streckenkarte hinterlegt werden. Bei einer erneuten Befahrung der Gleisstrecke werden die gemessenen ferromagnetischen Inhomogenitäten mit den Signaturen in der Streckenkarte verglichen. Über die eindeutige Zuordnung der Landmarken an das jeweilige Schienenelement wird die absolute Position des Schienenfahrzeugs ermittelt. Ein ähnliches Prinzip wird bereits im Bereich der Robotik und dem autonomen Fahren angewandt. Hier werden überwiegend Bildmerkmale aus Kameras verwendet, um zusammen mit einer Merkmalskarte die Position des Fahrzeugs zu ermitteln [70]. Auch der ECS besitzt bereits ein grobes Lokalisierungsverfahren. Jedoch nutzt der ECS lediglich Gleisstrukturen, wie Weichen, zur Ermittlung der Position. Mehrdeutigkeiten in der Position können erst durch das Überfahren von mehreren Weichen reduziert werden [33]. Ein Vorteil des DIS ist die Möglichkeit, kontinuierlich anhand der ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene, die Position des Schienenfahrzeugs zu bestimmen. Bereits nach wenigen Streckenmetern ist dadurch eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs gegeben. Dadurch liefert der DIS eine schnellere und genauere Position des Schienenfahrzeugs.

Im folgenden Kapitel wird das Verfahren zur Erstellung der ferromagnetischen Streckenkarten erläutert. Anschließend wird mit den ferromagnetischen Inhomogenitäten die Position des Schienenfahrzeugs kontinuierlich entlang der

zurückgelegten Gleisstrecke bestimmt. Zur Untersuchung der Positionsgenauigkeit werden die Positionsergebnisse aus dem DIS mit denen aus der Referenzsensorik (vgl. Kapitel 3.3.1) verglichen.

4.1 Erstellung der ferromagnetischen Streckenkarte

Um die absolute Position des Schienenfahrzeugs auf der Gleisstrecke zu ermitteln, werden zunächst die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene bei einer Kartierungsfahrt aufbereitet und in einer Streckenkarte hinterlegt. Nachdem der Gleisabschnitt kartiert wurde, können die ferromagnetischen Inhomogenitäten zur Lokalisierung verwendet werden. Durch die starke Bindung der ferromagnetischen Strukturen an die Schienenelemente wird für die Repräsentation der Karte ein Topogramm in Form eines Liniennetzplans gewählt. Die Generierung der Streckenkarte und die anschließende Lokalisierung des Schienenfahrzeugs kann unter alleiniger Verwendung des DIS durchgeführt werden und benötigt keine zusätzlichen Sensoren. Im Gegensatz zu etablierten Lokalisierungsverfahren im Schienen- oder Straßenverkehr werden keine geografischen Streckenkarten für eine gleis- bzw. spurgenaue Lokalisierung auf mehrspurigen Streckenabschnitten benötigt [71]. Dadurch entfallen aufwendige und teure Maßnahmen für die Erstellung von geeigneten georeferenzierten Streckenkarten. Zur Erstellung der ferromagnetischen Streckenkarten werden die ferromagnetischen Strukturen, wie bereits im Kapitel 3 gezeigt, zunächst von dem DIS in Abhängigkeit der Zeit erfasst. Das Messsignal besitzt dadurch eine geschwindigkeitsabhängige Komponente. Um den Einfluss der Geschwindigkeit zu kompensieren, werden die ferromagnetischen Strukturen in Abhängigkeit der zurückgelegten Wegstrecke aufbereitet und dem jeweiligen Streckenabschnitt zugeordnet. Dies kann direkt über die ermittelte Geschwindigkeit des DIS (siehe Kapitel 3) oder unter Verwendung zusätzlicher Sensoren für die Geschwindigkeits- oder Distanzmessung erfolgen. Über die Geschwindigkeit des DIS wird die zurückgelegte Wegstrecke:

$$D_s(N) = \sum_{n=1}^N ((t_n - t_{n-1}) \cdot \frac{v_{t_{n-1}} + v_{t_n}}{2}) \quad (4.1)$$

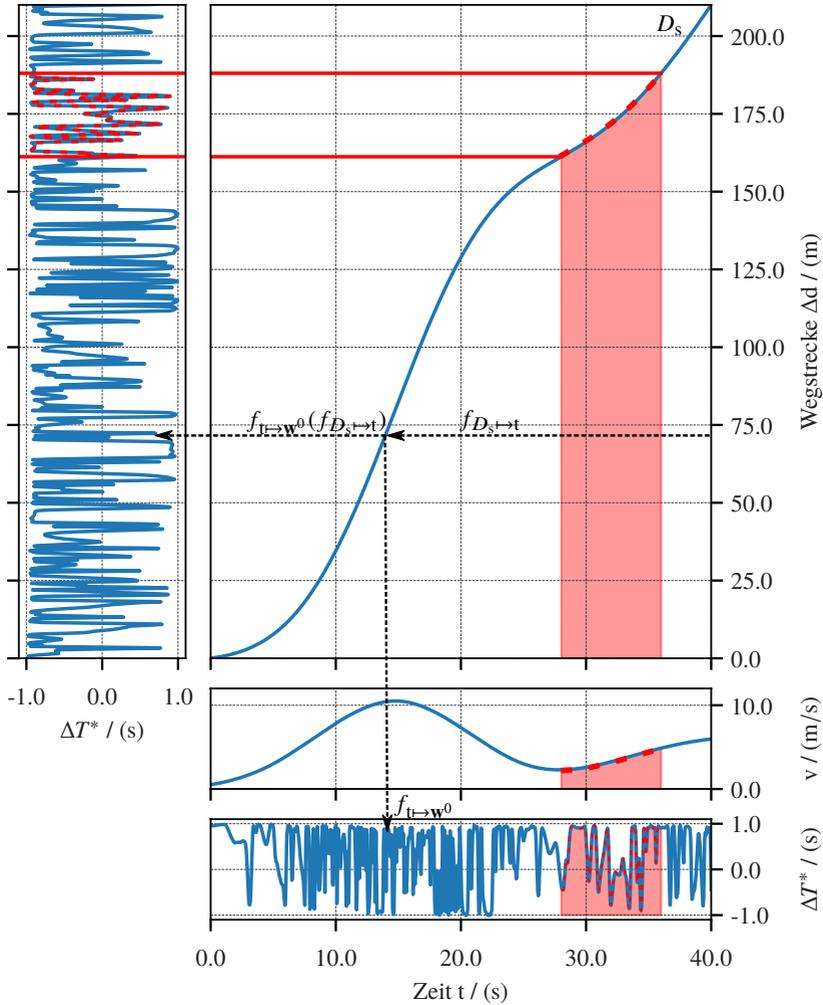


Abbildung 4.1: Darstellung der Transformation der ferromagnetischen Inhomogenitäten eines Detektors von der Zeit- in die Ortsdomäne. Dargestellt sind die ferromagnetischen Inhomogenitäten (unten), die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs (Mitte) und die zurückgelegte Wegstrecke (oben) für einen Zeitraum von 40 s. Links: Darstellung der ferromagnetischen Inhomogenitäten transformiert in die Ortsdomäne. Der rote Bereich zeigt exemplarisch einen Abgleich der ferromagnetischen Signatur (Länge von ca. 25 m) mit der hinterlegten ferromagnetischen Streckenkarte.

des Schienenfahrzeugs durch numerische Integration (Heun-Verfahren) ermittelt (vgl. Abbildung 4.1 D_s). Sie beinhaltet die Einzelgeschwindigkeiten v_{t_n} über alle Geschwindigkeiten N einer zusammenhängenden Wegstrecke. Für die Transformation der ferromagnetischen Inhomogenitäten in die Ortsdomäne werden zunächst Interpolationsfunktionen für die diskreten Messpunkte \mathbf{w}^0 und D_s erstellt. Die Interpolationsfunktion $f_{t \rightarrow \mathbf{w}^0}$ gibt die ferromagnetischen Inhomogenitäten eines Detektors in Abhängigkeit der Zeit an. Die Interpolationsfunktion $f_{D_s \rightarrow t}$ gibt die Zeit in Abhängigkeit der zurückgelegten Wegstrecke an. Bei hohen Geschwindigkeiten des Schienenfahrzeugs ergeben sich mit kubischen Interpolationen im allgemeinen glattere Kurvenverläufe für die Ortsdarstellung der ferromagnetischen Inhomogenitäten. Bei konstanten Signalstrukturen neigt dieses Verfahren zu Schwingungen. Dies kann weitestgehend durch eine stückweise kubische Hermite-Interpolationsfunktion (PCHIP) verhindert werden. Die einzelnen Teilsegmente sind stetig differenzierbar und gehen an den Rändern nahtlos ineinander über. PCHIP verursacht aber in Bereichen mit oszillierenden Signalanteilen Artefakte. Aufgrund der hohen Messrate des DIS (30 kHz), verglichen mit der geringen Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs, liegen die zeitdiskreten ferromagnetischen Signaturen der Schienen in einer ausreichend hohen Punktdichte vor (vgl. Kapitel 2). Dadurch kann auch eine lineare Interpolation verwendet werden, ohne die ferromagnetische Signatur bei der Transformation in die Ortsdomäne zu verfälschen.

Über $f_{\text{lin}}(D_s, d_s)$ wird die zurückgelegte Wegstrecke D_s in äquidistante Wegpunkte d_s unterteilt. Mit der Gleichung 4.2 werden die zeitdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten in die Ortsdomäne überführt (vgl. Abbildung 4.1).

$$D' = f_{t \rightarrow \mathbf{w}^0}(f_{D_s \rightarrow t}(f_{\text{lin}}(d, d_s))) \quad (4.2)$$

Die ferromagnetischen Inhomogenitäten des zweiten Detektors können ebenfalls über die Gleichung 4.2 zu einer ferromagnetischen Streckenkarte verarbeitet werden. Für die Kartierungsfahrt ist die Befahrriichtung der Strecke nicht relevant. Einzig die Reihenfolge der ferromagnetischen Strukturen kehrt sich bei einer entgegengesetzten Fahrt auf derselben Strecke um. Im Liniennetzplan wird deshalb die jeweilige Befahrriichtung bei der Kartierungsfahrt mit angegeben. Dadurch können beide Befahrriichtungen mit demselben Liniennetzplan abgedeckt werden. In der Abbildung B.1 bis B.4 sind die ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der zurückgelegten Wegstrecke für die Fahrmanöver aus der Abbildung 3.10 zu sehen. Ein Teilstück eines Liniennetzplans ist in der Abbildung 4.2 abgebildet. Die Linien in schwarz und cyan repräsentieren

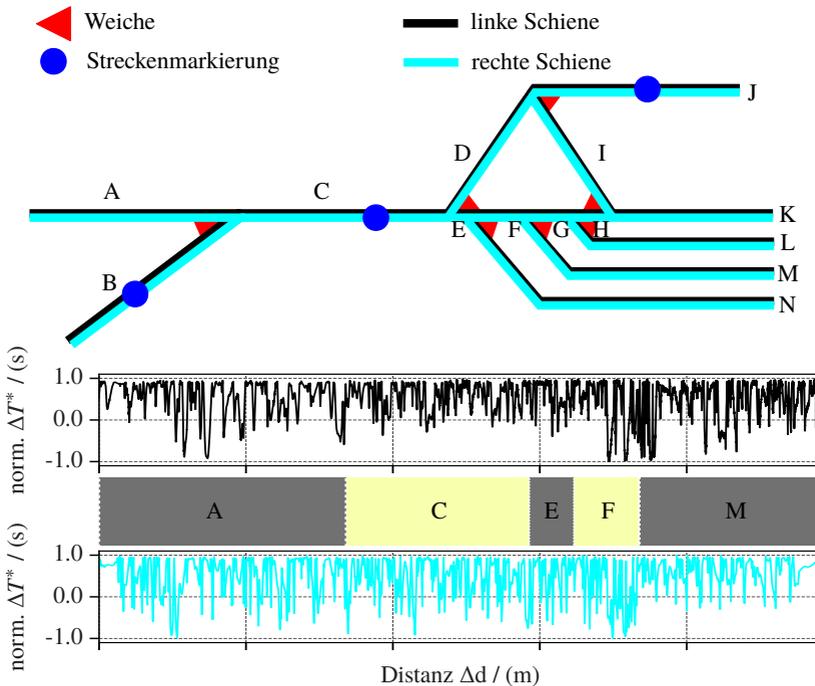


Abbildung 4.2: Exemplarischer Aufbau eines Liniennetzplans mit einer ferromagnetischen Streckenkarte des Streckenabschnittes [A, C, E, F, M] für die linke und rechte Schiene (schwarz, cyan).

die Schienen der Gleisabschnitte (A bis M) und werden über Weichen (rote Dreiecke) miteinander verbunden. Ein Gleiswechsel kann nur über eine der beiden angrenzenden Weichen erfolgen. Unter dem Liniennetzplan sind die ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten der Streckenabschnitte [A, C, E, F, M] für die linke und rechte Schiene (schwarz und cyan) abgebildet. Durch die Separation der Merkmalspunkte (ferromagnetischen Inhomogenitäten) von den eigentlichen Positionskoordinaten werden Mehrdeutigkeiten bei der Gleisbelegung, die aufgrund von Messunsicherheiten (bspw. bei der GNSS-basierten Positionsschätzungen) in Bereichen mehrerer parallel zueinander verlaufender Gleisabschnitten zustandekommen (siehe [K], [L], [M] und [N]), verhindert. Die räumliche Nähe der einzelnen Schienen zueinander stellt somit mit dem DIS kein begrenzendes Element für die Positionsgenauigkeit des Schienenfahrzeugs dar. Der Aufbau der ferromagnetischen Streckenkarte ist so konzipiert,

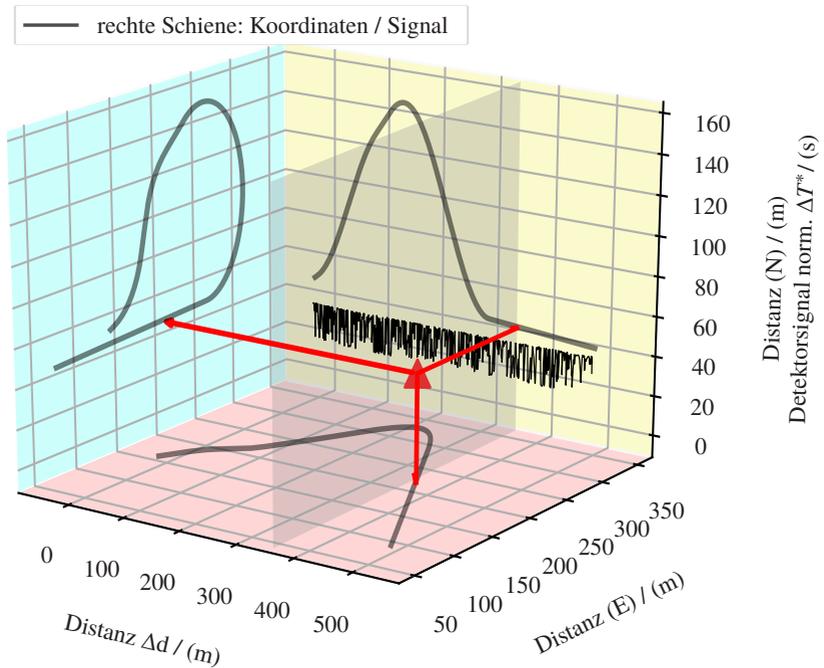


Abbildung 4.3: Darstellung der georeferenzierten ferromagnetischen Streckenkarte der rechten Schiene des T4. Offset der Position des Koordinatensystems; Z:32U; E:306076; N:5666477 [36].

dass diese mit zusätzlichen Informationen¹, bspw. Bahnübergänge, Haltestellen, Brücken, Balisen oder UTM-Koordinaten aus weiteren Sensoren, beliebig erweitert werden kann. In der Abbildung 4.3 ist die Zuordnung der ferromagnetischen Inhomogenitäten der rechten Schiene des T4 zu einem UTM-Koordinatensystem zu sehen. In der gelben Ebene ist die zurückgelegte Wegstrecke mit der ferromagnetischen Streckenkarte der Schiene und der UTM-Koordinate der nördlichen Richtung zu sehen. Die rote Ebene zeigt die zurückgelegte Wegstrecke und die UTM-Koordinate in östlicher Richtung. Die blaue Ebene zeigt die UTM-Koordinaten (N | E) der ferromagnetischen Streckenkarte an.

¹ Die zusätzlichen Informationen sind optional und dienen nicht der Entscheidungsfindung für eine Schienenzuordnung.

4.2 Absolute Positionsbestimmung mit dem DIS

Für die absolute Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs wird zunächst mit dem DIS die Geschwindigkeit anhand der zeitdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten ermittelt. Anschließend werden die ferromagnetischen Inhomogenitäten von der Zeit- in die Ortsdomäne (siehe Kapitel 4.1) überführt. Die ortsdiskreten Teilsegmente der ferromagnetischen Streckensegmente werden ähnlich der Geschwindigkeitsmessung aus Kapitel 3.1 mit dem Template-Matching-Verfahren in der ferromagnetischen Streckenkarte gesucht. Bei der Positionsbestimmung besteht das Template-Signal aus dem ortsdiskreten Teilsegment und das Image-Signal aus der ferromagnetischen Streckenkarte. Der Punkt, an dem die gemessenen ferromagnetischen Signaturen die höchste Übereinstimmung mit der ferromagnetischen Streckenkarte aufweisen, entspricht dem gesuchten Schienenelement und damit der Position des Schienenfahrzeugs im Schienennetz. In der Abbildung 4.1 ist für ein Teilsegment mit einer Länge von ca. 25 m (roter Bereich) die Ortsdiskretisierung der ferromagnetischen Signatur zusammen mit dem Abgleich über die ferromagnetische Streckenkarte (blau) zu sehen. Das Verfahren wird anschließend für die nachfolgenden Streckensegmente wiederholt und so eine kontinuierliche Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs erreicht. Mit zunehmender Länge des verwendeten Templates wird die Unsicherheit bei der Positionsbestimmung auf Kosten der Rechenzeit verringert. Abhängig von der Größe der hinterlegten ferromagnetischen Streckenkarte genügt bereits ein kurzes Schienensegment, um die Position des Schienenfahrzeugs eindeutig zu bestimmen. Ein entscheidender Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass im Gegensatz zu IMU oder Radencodern keine initiale Position des Schienenfahrzeugs erforderlich ist. Unsicherheiten, die bei der Transformation der ferromagnetischen Inhomogenitäten von der Zeit- in den Ortsbereich auftreten, wirken sich nur lokal auf das aktuelle Streckensegment aus. Im Vergleich zur Koppelnavigation akkumulieren sich Unsicherheiten durch den Abgleich mit der ferromagnetischen Streckenkarte nicht auf.

4.3 Aktualisierung der ferromagnetischen Streckenkarte

Für die Erstellung einer ferromagnetischen Streckenkarte ist eine Kartierungsfahrt der Strecke erforderlich. Sind mehrere ferromagnetische Signaturen D'_n aus unterschiedlichen Befahrungen B derselben Strecke vorahnende, können diese über das Superpositionsprinzip zu einer gemeinsamen ferromagnetischen Streckenkarte $\Delta D'$ kombiniert werden (vgl. Gleichung 4.3). Über α_n können die ferromagnetischen Strukturen der einzelnen Befahrungen unterschiedlich stark gewichtet werden. Vorausgesetzt die ferromagnetischen Signaturen sind bereits zueinander ausgerichtet.

$$\Delta D' = \sum_{n=0}^B \alpha_n D'_n \qquad \sum_{n=0}^B \alpha_n = 1 \qquad (4.3)$$

Die Ausrichtung kann auch direkt über den Positionsabgleich der ferromagnetischen Streckenkarte geschehen. Die ferromagnetische Streckenkarte wird dadurch mit jeder Befahrung aktualisiert. Um eine Fragmentierung der ferromagnetischen Streckenkarte zu vermeiden, ist ein zentrales Verfahren für den Abgleich erstrebenswert. In der Abbildung 4.4 ist hierfür ein mögliches Verfahren dargestellt. Abhängig von den Gewichtungen können mit dem Aktualisierungsverfahren Störungen aus der initialen Streckenkarte reduziert oder auch Veränderungen in den ferromagnetischen Strukturen in die ferromagnetische Streckenkarte übernommen werden.

4.4 Versuchsaufbau zur Evaluation der Positionsbestimmung mit dem DIS

Um die Positionsgenauigkeit des ferromagnetischen Lokalisierungsverfahrens zu untersuchen, ist eine ferromagnetische Streckenkarte des zu befahrenden Gleisabschnittes erforderlich. Im Falle des T4 (vgl. Kapitel 3.3.1) wird diese über eine Kartierungsfahrt der Strecke realisiert. Die zeitdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten werden über die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs (vgl. Kapitel 3.1 und Gleichung 4.2) in die Ortsdomäne überführt und mit den optionalen UTM-Koordinaten aus der Referenzsensorik in eine Streckenkarte aufgenommen. Für eine detaillierte Positionsauswertung werden die

gemessenen Signalstrukturen beider Detektoren in die Streckenkarte (Karte A und Karte B) aufgenommen. Im Normalfall ist die Signatur eines Detektors ausreichend. Die ferromagnetische Streckenkarte der rechten Schiene des T4 ist in der Abbildung 4.3 abgebildet. In der Abbildung 4.5 ist der nordöstliche Streckenabschnitt mit den dazugehörigen ferromagnetischen Inhomogenitäten eines Detektors für die linke und rechte Schiene im Detail zu sehen.

Bei den anschließenden Fahrmanövern ID 1 bis 33 (siehe Abbildung 3.10) wird das ferromagnetische Lokalisierungsverfahren getestet. Dabei werden zunächst die zeitdiskreten ferromagnetischen Signaturen der Schiene kontinuierlich über die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs in den Ortsbereich überführt. Die Positionsgenauigkeit des ferromagnetischen Lokalisierungsverfahrens wird mit Hilfe von zwei Konfigurationen untersucht:

- **Kombinierter Ansatz:**

Beim kombinierten Ansatz wird das zugrundeliegende Funktionsprinzip des ferromagnetischen Lokalisierungsverfahrens untersucht. Um etwaige systematische Fehler in der Messschaltung des DIS auszuschließen, wird die Ortsdiskretisierung der aktuellen ferromagnetischen Inhomogenitäten mit der Geschwindigkeit aus der Referenzsensorik durchgeführt.

- **Stand-Alone-Ansatz:**

Beim Stand-Alone-Ansatz wird ausschließlich der DIS verwendet. Dazu wird zunächst die Geschwindigkeit aus dem zeitlichen Versatz der ferromagnetischen Inhomogenitäten ermittelt, vgl. Kapitel 3. Die Geschwindigkeit aus dem DIS wird anschließend verwendet, um die aktuellen ferromagnetischen Signaturen in die Ortsdomäne zu transformieren.

Für die Positionsbestimmung werden bei beiden Ansätzen die aktuellen ortsdiskreten ferromagnetischen Signaturen mit den ferromagnetischen Signaturen der Streckenkarte verglichen. Stimmen beide Signaturen überein, ist das Schienensegment und die Position des Schienenfahrzeugs eindeutig gegeben. Für die Ermittlung der Positionsgenauigkeit des DIS werden die optionalen UTM-Koordinaten der Streckenkarte mit denen der Referenzsensorik verglichen.

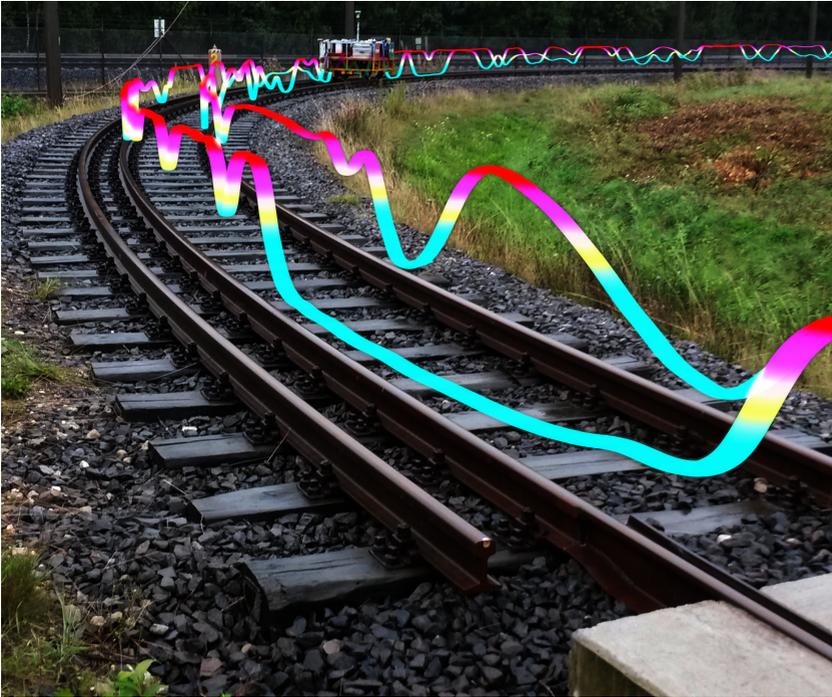


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten der rechten und linken Schienen des T4.

4.4.1 Kombiniertes Ansatz

Beim kombinierten Ansatz wird die Position des Schienenfahrzeugs durch den DIS, eine ferromagnetische Streckenkarte und die Geschwindigkeit aus der Referenzsensorik bestimmt. Letzteres wird verwendet, um die zeitdiskreten ferromagnetischen Inhomogenität in die Ortsdomäne zu überführen und etwaige systematische Fehler in der Messschaltung auszuschließen. Wird eine Strecke von einem Meter zurückgelegt, werden die letzten 15 Meter der ortsdiskreten ferromagnetischen Signatur der Schiene mit der ferromagnetischen Streckenkarte abgeglichen. Beim Abgleich mit der Streckenkarte wird auf eine Initialisierung der Position oder eine Einschränkung des Suchraums durch eine zuvor getätigte Lokalisierung verzichtet. Das Lokalisierungsverfahren wird für beide Detektorsignale A und B des DIS durchgeführt. In der Abbildung 4.6 ist

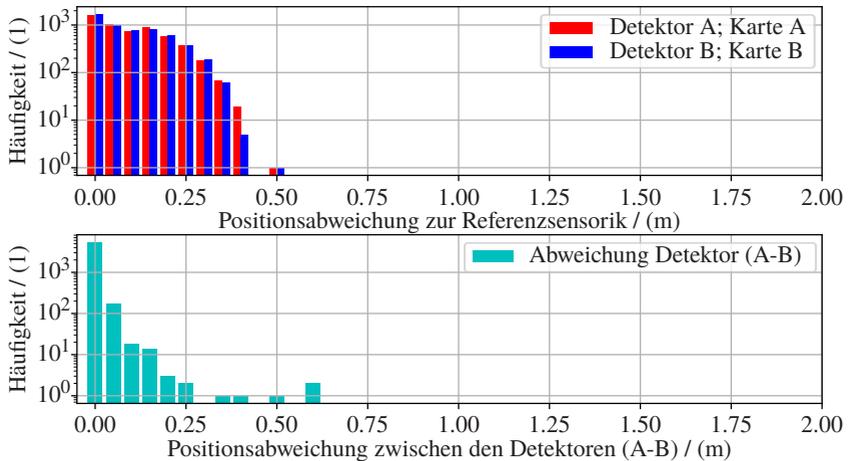


Abbildung 4.6: Oben: Häufigkeit der Positionsabweichung zwischen dem DIS (mit einer Templatelänge von 15 m) und der Referenzsensorik ausgewertet für die Detektoren A und B. Unten: Häufigkeit der Positionsabweichung zwischen den Detektoren A und B.

die Häufigkeit der Positionsabweichung des DIS zu der Referenzposition für die Fahrmanöver ID = 1-33 (siehe Abbildung 3.10) zu sehen. Für den Detektor A/B (rot/blau) wird der Abgleich mit der jeweiligen ferromagnetischen Streckenkarte durchgeführt, die mit dem dazugehörigen Detektor A/B erstellt wurde. In cyan ist die Häufigkeit der Positionsabweichung zwischen den Detektoren A und B zu sehen. Beim kombinierten Ansatz besitzen 99 % aller ermittelten Positionen des DIS eine Positionsabweichung von weniger als 0,40 m zu der Referenzposition. Die Ergebnisse sind für die Detektoren A und B identisch. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der Positionsabweichung zwischen den Detektoren. In der Tabelle 4.1 ist eine detaillierte Übersicht der prozentualen Häufigkeit der Positionsabweichung des DIS zu der Referenzposition zu sehen.

4.4.2 Stand-Alone-Ansatz

Beim Stand-Alone-Ansatz wird ausschließlich der DIS, der Abstand zwischen den Detektoren und eine ferromagnetische Streckenkarte verwendet, um die Position des Schienenfahrzeugs zu bestimmen. Es werden keine zusätzlichen Sensorinformationen, initiale Positionen oder Positionen

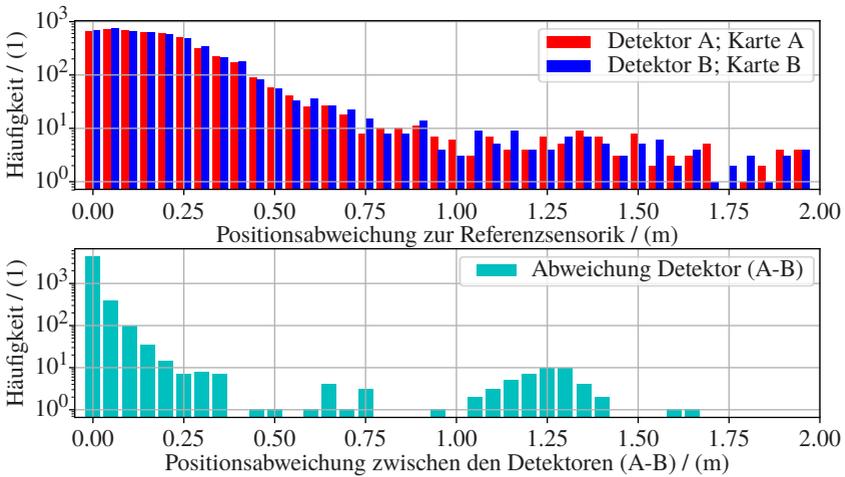


Abbildung 4.7: Oben: Häufigkeit der Positionsabweichung zwischen dem DIS (beim Stand-Alone-Ansatz mit einer Templatelänge von 15 m) und der Referenzposition für die Detektoren A und B. Unten: Häufigkeit der Positionsabweichung zwischen den Detektoren A und B.

aus einem der vorherigen Zeitschritte einbezogen. Der Stand-Alone-Ansatz stellt unter diesen Bedingungen das technisch anspruchsvollste Szenario dar. Um die ferromagnetischen Inhomogenitäten in die Ortsdomäne zu überführen, wird zunächst aus den zeitdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten die Geschwindigkeit (siehe Kapitel 3) des Schienenfahrzeugs bestimmt. Ausgehend von den Ergebnissen der Geschwindigkeitsbestimmung aus dem Kapitel 3.4 werden für das Template- und Imagesignal die Signallängen von 4 s bzw. 6 s verwendet. Über die Geschwindigkeit des DIS wird kontinuierlich die zurückgelegte Wegstrecke ermittelt und die zeitdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten in die Ortsdomäne überführt. Nachdem eine Strecke von einem Meter zurückgelegt wird, werden die letzten 15 Meter der ortsdiskreten ferromagnetischen Signatur der Schiene mit der ferromagnetischen Streckenkarte abgeglichen. Beim Abgleich mit der Streckenkarte wird auf eine Initialisierung der Position oder eine Einschränkung des Suchraums durch eine zuvor getätigte Position verzichtet. Das Lokalisierungsverfahren wird für beide Detektorsignale A und B des DIS durchgeführt. In der Abbildung 4.7 ist die Häufigkeit der Positionsabweichung des DIS zu der Referenzposition für die

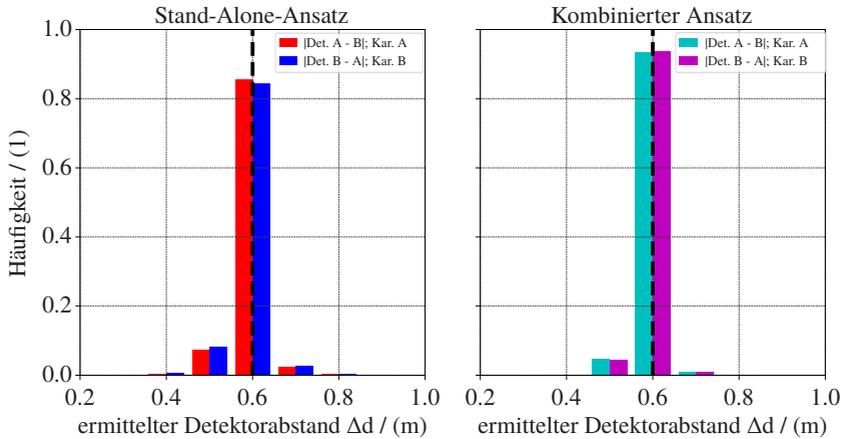


Abbildung 4.8: Häufigkeit des betragsmäßigen Positionsabstandes ermittelt aus den Absolutpositionen der Detektoren (Det. A und B). Links: Die ortsdiskreten ferromagnetischen Streckensegmente wurden aus der Geschwindigkeit des DIS abgeleitet. Rechts: Die ortsdiskreten ferromagnetische Streckensegmente wurden aus der Referenzgeschwindigkeit abgeleitet. In beiden Fällen wurde der Abgleich für beide Streckenkarten (Kar. A und B) durchgeführt. Der reale Montageabstand der Detektoren beträgt 0,6 m (schwarze vertikale Linie).

Fahrmanöver ID = 1-33 (siehe Abbildung 3.10) zu sehen. Für den Detektor A/B (rot/blau) wird der Abgleich mit der jeweiligen Streckenkarte durchgeführt, die mit dem dazugehörigen Detektor A/B erstellt wurde. In cyan ist die Häufigkeit der Positionsabweichung zwischen den Detektoren A und B zu sehen. Beim Stand-Alone-Ansatz, bei dem der gesamte Lokalisierungsprozess nur von dem DIS getätigt wird, besitzen 91 % aller ermittelten Positionen eine Positionsabweichung von unter 0,60 m zu der Referenzposition. Die Ergebnisse sind für die Detektoren A und B identisch. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der Positionsabweichung zwischen den Detektoren. In der Tabelle 4.1 ist eine detaillierte Übersicht der prozentualen Häufigkeit der Positionsabweichung des DIS zu der Referenzposition zu sehen.

4.4.3 Relative Positionsgenauigkeit des DIS

Für eine detailliertere Bewertung der Positionsgenauigkeit des DIS wird der Abstand zwischen den Beiden Detektoren A und B über die gemessene ferromagnetische Signatur an den beiden Detektoren bestimmt. Aufgrund des

Tabelle 4.1: Prozentuale Häufigkeit der Positionsdifferenz zwischen den Detektoren A/B des DIS zu der Referenzposition. Stand-Alone-Ansatz: Beim Stand-Alone-Ansatz wurde die Position ausschließlich über den DIS bestimmt. Kombiniertes Ansatz: Bei dem kombinierten Ansatz wurde die Geschwindigkeit aus der Referenzsensorik verwendet. Die Länge des ferromagnetischen Streckenelementes für den Abgleich mit der Streckenkarte betrug jeweils 15 m.

		Distanz / (m)	$\leq 1,0$	$\leq 0,6$	$\leq 0,5$	$\leq 0,4$	$\leq 0,3$
Stand-Alone-Ansatz	Detektor A		93	91	89	84	74
	Detektor B		93	91	89	84	73
Kombiniertes Ansatz	Detektor A		99	99	99	99	95
	Detektor B		99	99	99	99	95

räumlichen Abstandes der Detektoren am Schienenfahrzeug unterscheiden sich die gemessenen ferromagnetischen Signaturen an den Detektoren voneinander. Werden die Positionen über die ferromagnetische Streckenkarte korrekt ermittelt, muss der Abstand der ermittelten Position dem räumlichen Abstand der Detektoren entsprechen. In der Abbildung 4.8 ist die Häufigkeit der Positionsdifferenz der Detektoren unter Verwendung der jeweiligen ferromagnetischen Streckenkarte A und B zu sehen. Für die ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten wurde einmal die Geschwindigkeit über den DIS (links; Stand-Alone-Ansatz) und einmal die Referenzgeschwindigkeit (rechts; kombinierter Ansatz) verwendet. Die schwarze vertikale Linie kennzeichnet den reale Montageabstand der beiden Detektoren (0,6 m). Aus den Einzelpositionen des DIS konnte für 85 % (Stand-Alone-Ansatz) bzw. 94 % (kombinierter Ansatz) aller Positionen der Abstand der Detektoren zueinander korrekt ermittelt werden. Im Detail beträgt der ermittelte mittlere Abstand der Detektoren $\Delta d_{\text{Ref.}} = 0,63$ m, $\sigma_{\text{Ref.}} = 0,03$ m bzw. $\Delta d_{\text{DIS}} = 0,63$ m, $\sigma_{\text{DIS}} = 0,05$ m.

4.4.4 Ergebnisse der ferromagnetischen Lokalisierung

Für den Positionsabgleich werden die ferromagnetischen Signaturen der letzten 15 Streckenmeter in der hinterlegten Streckenkarte gesucht. Der Punkt mit der höchsten Übereinstimmung entspricht der Position des Schienenfahrzeugs. In der Tabelle 4.1 ist eine detaillierte Übersicht der prozentualen Häufigkeit der Positionsabweichung des DIS zu der Referenzposition für den Stand-Alone-Ansatz und den kombinierten Ansatz zu sehen. Für die Fahrmanöver ID 1 bis 33 liegt die Positionsabweichung des DIS in derselben Größenordnung

wie die Positionsunsicherheit der Referenzsensorik, vgl. Abbildung 4.9. Beim kombinierten Ansatz ist für 99 % aller ermittelten Positionen des DIS die Positionsdifferenz zu der Referenzposition kleiner als 0,40 m. Beim Stand-Alone-Ansatz ist für 91 % aller ermittelten Positionen des DIS die Positionsdifferenz zu der Referenzposition kleiner als 0,60 m. Aufgrund der häufigen Anfahrvorgänge (vgl. Abbildung 3.10) und der damit verbundenen geringen Signalvariabilität an den Detektoren ist die Positionsgenauigkeit beim Stand-Alone-Ansatz geringer. Mit der Verwendung eines längeren Templates oder einer Einschränkung der ferromagnetischen Streckenkarte kann dieses Verhalten kompensiert werden. Um detailliertere Aussagen über die Positionsgenauigkeit des DIS zu erhalten, wird die Positionsdifferenz der beiden Detektoren A und B zueinander betrachtet. Durch den Abstand der Detektoren zueinander unterscheiden sich die beiden ferromagnetischen Signalstrukturen geringfügig voneinander. Werden nun beide Signalstrukturen mit der Streckenkarte verglichen, muss die Positionsdifferenz der beiden Detektoren dem Abstand der Detektoren zueinander entsprechen. In der Abbildung 4.8 sind die Häufigkeiten der Positionsdifferenzen für den Stand-Alone-Ansatz (links) und den kombinierten Ansatz (rechts) zu sehen. Der reale Abstand der Detektoren² (0,60 m) liegt damit innerhalb der Standardabweichung von $\sigma_{\text{Ref.}} = 0,03$ m bzw. $\sigma_{\text{DIS}} = 0,05$ m des ferromagnetischen Lokalisierungsverfahrens des DIS.

Das ferromagnetische Lokalisierungsverfahren besitzt eine deutlich höhere Positionsgenauigkeit als Sensoren, die bisher für die fahrzeugseitige Positionsbestimmung im Schienenverkehr zum Einsatz kommen. Aus den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der DIS eine Positionsgenauigkeit aufweist, die mit denen der verwendeten Referenzsensorik (Galileo-GNSS und LASER-Tachymeter) vergleichbar ist. Dabei ist das hervorstechendste Merkmal die räumliche Trennung über die ferromagnetischen Signaturen der Schiene, worüber sich eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs ergibt.

4.5 Zusammenfassung Lokalisierung

Die einzigartigen ferromagnetischen Strukturen entlang der Schienen eignen sich für die Geschwindigkeits- und für die absolute Positionsbestimmung

² Wird die räumliche Ausdehnung der Detektoren berücksichtigt, beträgt der Abstand der Detektoren $(0,60 \pm 0,03)$ m.

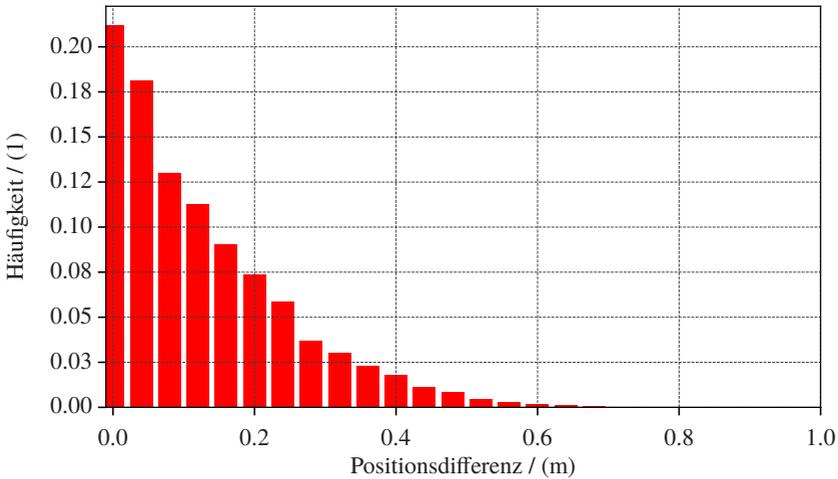


Abbildung 4.9: Histogramm der Häufigkeit der Positionsdifferenz zwischen dem Galileo GNSS-Receiver und dem LASER-Tachymeter.

eines Schienenfahrzeugs. Über eine Streckenkarte werden die ferromagnetischen Inhomogenitäten eines jeden Gleiselementes mit einer Ortsposition verbunden. Durch die Überführung der aktuell gemessenen ferromagnetischen Signalverläufe in die Ortsdomäne sowie einem anschließenden Vergleich der ferromagnetischen Signaturen mit denen der Streckenkarte, wird mit dem DIS die Grundlage für ein neuartiges Verfahren zur absoluten Positionsbestimmung für Schienenfahrzeuge geschaffen. Mit den ferromagnetischen Inhomogenitäten wird ein komplementäres Messverfahren bereitgestellt, welches die bisherigen Verfahren für die absolute Positionsbestimmung ergänzt. Die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene ermöglichen es, die Position eines Schienenfahrzeugs mit einer Genauigkeit anzugeben, die den Ansprüchen des ETCS³ für eine Fahrzeugseitige Positionsbestimmung entspricht. Der DIS ist dabei so konzipiert, dass eine absolute Positionsbestimmung ohne zusätzliche Sensoren durchgeführt werden kann. Ebenfalls kann auf eine Initialisierung der Position verzichtet werden. Die Positionsabweichung zwischen LASER-Tachymeter und

³ Die Distanzabweichung wird mit $\pm(5 \text{ m} + 5 \% s)$ angegeben, wobei s der zurückgelegten Distanz des Schienenfahrzeugs entspricht [7].

dem Galileo-GNSS-Receiver, vgl. Abbildung 4.9, die als Referenzsensoren verwendet wurden, liegt in der Größenordnung der Positionsabweichung des DIS zu der Referenzposition. Die Positionsgenauigkeit des DIS ist dadurch mit denen der Referenzsensoren vergleichbar. Im Gegensatz zu GNSS werden räumlich nahe beieinander liegende Positionen über die ferromagnetische Signatur der Schiene eindeutig voneinander getrennt. Dadurch ist es möglich, die rechte und linke Schiene eines Gleissegmentes eindeutig voneinander zu trennen. Insbesondere für Bereiche mit mehreren parallel zueinander verlaufenden Gleisen ist eine eindeutige Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs gegeben. Jeder der Detektoren des DIS ist dabei in der Lage, die Position zu bestimmen. Durch einen erweiterten Positionsabgleich in Verbindung mit einer zuvor ermittelten Positionen lässt sich die Positionsgenauigkeit des Verfahrens weiter steigern und die Länge der ferromagnetischen Streckenelemente verringern. Durch die Verwendung von längeren ferromagnetischen Signalstrukturen oder die simultanen Erfassung der ferromagnetischen Inhomogenitäten der rechten und linken Schiene kann die Positionsgenauigkeit weiter verbessert werden. Darüberhinaus können Abweichungen in den ferromagnetischen Strukturen aufgrund von baulichen Veränderungen an der Infrastruktur über die Streckenkarte erfasst werden.

5 Modell der ferromagnetischen Streckensignatur

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, wie mit Hilfe der ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Schienen und des DIS die Geschwindigkeit und die absolute Position eines Schienenfahrzeugs ermittelt werden kann. Für eine schnelle und vor allem effiziente Positionsbestimmung über das Template-Matching-Verfahren (siehe Kapitel 3.1) soll die Länge des Templates möglichst klein gewählt werden. Gleichzeitig muss das Template groß genug sein, um Mehrdeutigkeiten aufgrund von ähnlichen Signalstrukturen in großen ferromagnetischen Streckenkarten auszuschließen. Unter Berücksichtigung der verwendeten ferromagnetischen Streckenkarte wird im folgenden Kapitel die maximal benötigte Länge der ferromagnetischen Signalstruktur (Template), die für eine eindeutige Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs benötigt wird, abgeschätzt. Bei der Abschätzung werden Fehlmessungen, bspw. aufgrund von Inkonsistenzen in den ferromagnetischen Signalstrukturen, und das Messrauschen an den Detektoren, welches einen eindeutigen Abgleich mit der ferromagnetischen Streckenkarte erschwert, berücksichtigt. Zusätzlich wird ein erweitertes Suchverfahren vorgestellt, mit dem die benötigte Rechenzeit zum Auffinden korrespondierender Signalstrukturen in ausgedehnten ferromagnetischen Streckenkarten deutlich verringert wird.

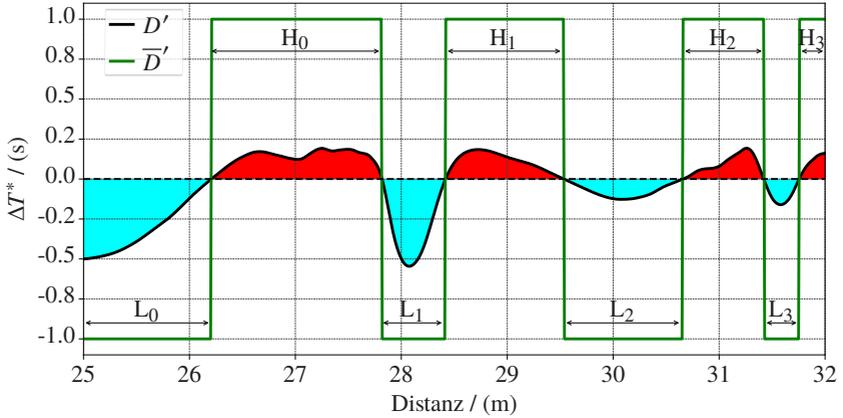


Abbildung 5.1: Darstellung der reduzierten ferromagnetischen Signalstruktur an einem Detektor. Komponenten mit $D' > 0$ besitzen den Zustand H (rot) mit der eingeschlossenen Gesamtfläche A_H , Komponenten mit $D' \leq 0$ besitzen den Zustand L (cyan) mit der eingeschlossenen Gesamtfläche A_L .

5.1 Vereinfachung der ferromagnetischen Signalstruktur

Zur Bestimmung der maximalen Templatelänge, die erforderlich ist, um eine eindeutige Positionsbestimmung zusammen mit der hinterlegten ferromagnetischen Streckenkarte zu ermöglichen, wird zunächst die Komplexität der ferromagnetischen Signalstruktur reduziert. Dabei muss die Struktur der ferromagnetischen Inhomogenitäten erhalten bleiben, um über das Template-Matching-Verfahren weiterhin die Geschwindigkeit und Position des Schienenfahrzeugs bestimmen zu können. Eine Methode zur Reduktion der Komplexität ist in der Abbildung 5.1 zu sehen. Die kontinuierliche ferromagnetische Signalstruktur D' wird über die Nulldurchgänge:

$$\overline{D}'_n = \begin{cases} H_n & D'_n > 0 \\ L_n & D'_n \leq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

in einen diskreten Zustand L bzw. H überführt. Wobei H_n bzw. L_n die Intervalllänge zwischen zwei Nulldurchgängen beschreibt. Über die Verkettung der

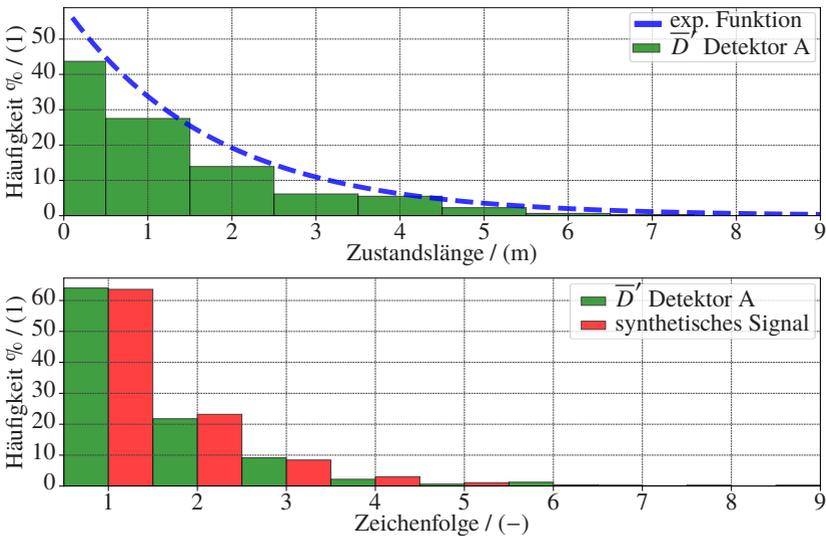


Abbildung 5.2: Oben: Längenhäufigkeitsverteilung der experimentell gewonnenen ferromagnetischen Zustände. Unten: Gegenüberstellung der Längenhäufigkeitsverteilung aus den experimentell erhobenen Messdaten (grün) und den synthetisch generierten Zeichenfolgen (rot). Vergleich beider Längenverteilungen über den Kolmogorov-Smirnov-Test.

einzelnen Zustände, bestehend aus L_n bzw. H_n , bleibt die einzigartige ferromagnetische Signalstruktur erhalten. Die reduzierte ortsdiskrete Signalstruktur ist dann durch:

$$\overline{D}' = \{H_0, L_0, H_1, L_1, \dots, H_{n-1}, L_{n-1}, H_n, L_n\} \quad (5.2)$$

gegeben. Über ein Histogramm mit den Klassen $\{0, 1, 2, \dots\}$ der Zustandslängen ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung, die der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion:

$$f(x) = \frac{1}{s} \cdot \exp\left(-\frac{(x - l_v)}{s}\right), \quad x \geq 0 \quad (5.3)$$

(blaue Kurve in der Abbildung 5.2 oben) entspricht. Über einen Parameterfit wird der Versatz $l_v \approx 0$ und der Skalierungsfaktor $s = 1,77$ ermittelt. Gleichung 5.3 kann dann geschrieben werden als:

$$f(x) = \lambda \cdot \exp(-x\lambda), \quad x \geq 0 \quad (5.4)$$

wobei $\lambda = 1/s$ die mittlere Anzahl der Nulldurchgänge pro Meter angibt. Die durchschnittliche Länge L (in Meter) der beiden Grundzustände H und L ist dann über die Gleichung 5.5 und 5.6 gegeben.

$$L(H) = \frac{1}{\lambda} = s \quad (5.5)$$

$$L(L) = \frac{1}{\lambda} = s \quad (5.6)$$

Auffällig ist, dass die die Verteilungsdichte (Gleichung 5.4) einer Exponentialverteilung folgt. Wiederum letztere entspricht bekanntermaßen der Verteilung der Abstände zwischen zwei Ereignissen eines Poisson-Prozesses. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Nulldurchgänge, gemäß eines Poisson-Prozesses, rein zufällig auftreten. Aus der exponentiell abfallenden Verteilung geht zudem hervor, dass längere Streckenabschnitte mit einem konstanten ferromagnetischen Zustand seltener auftreten als kürzere Streckenabschnitte. Von der Variation der ferromagnetischen Signalstrukturen profitiert insbesondere das Template-Matching-Verfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit und Position des Schienenfahrzeugs.

5.2 Abschätzung der ferromagnetischen Signallänge

Für die Untersuchung der ferromagnetischen Signalstrukturen, die sich entlang der Schiene befinden, wird die Komplexität auf die beiden diskreten Zustände H

und L reduziert. Aus der durchschnittlichen Länge der Zustände H und L (siehe Gleichung 5.5 und 5.6) und den dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten:

$$P(H) = \frac{A_H}{A_L + A_H} \approx \frac{7}{11} \quad (5.7)$$

$$P(L) = \frac{A_L}{A_L + A_H} = 1 - P(H), \quad (5.8)$$

die sich aus dem Verhältnis der Flächen A_H und A_L (vgl. Abbildung 5.1) zusammensetzen, lässt sich die reduzierte Signalstruktur als Bernoulli-Prozess beschreiben, wobei von einer festen Abtastrate von $1/s$ ausgegangen wird. Für ein seltenes Ereignis, bspw. eine konstante Zeichenfolge (HHHHHH), vgl. Abbildung 5.2, auf der ferromagnetischen Streckenkarte (Grundgesamtheit) lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit mit Hilfe der Poisson-Verteilung:

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x}{x!} \cdot \exp(-\lambda), \quad \text{mit:} \quad \lambda = n \cdot P(H)^k \quad (5.9)$$

ermitteln. Aus der Gleichung 5.9 geht hervor, dass für seltene Ereignisse (Zeichenfolgen mit $k \gg 1$) die Wahrscheinlichkeit gering ist, diese in den ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Gleisstrecke mehrmals ($x \geq 2$) vorzufinden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine beliebige Zeichenfolge, bspw. HLLHH... , ist über:

$$\begin{aligned} P(\text{HLLHH} \dots | \text{Modell}) \\ &= P(H) \cdot P(L|H) \cdot P(L|L) \cdot P(H|L) \cdot P(H|H) \dots \\ &= P(H)^{H_B} \cdot P(L)^{L_B} \end{aligned} \quad (5.10)$$

gegeben. Die Eintrittswahrscheinlichkeit hängt dabei nur von der Häufigkeit der Zustände (H_B und L_B) und nicht von der Abfolge der Zeichen innerhalb der Zeichenfolge oder einer vorherigen Zeichenfolge ab (vgl. Anhang A.5). Die synthetische Zeichenfolge (HHLH...LLHL) aus dem Modell besitzen damit, bis auf das Abtastintervall s , die gleiche Längenverteilung (vgl. Gleichung 5.2). Die Ähnlichkeit der synthetischen Zeichenfolge aus dem Modell mit der Zeichenfolge aus den experimentell gewonnenen Signalstrukturen wird mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Anpassungstest) und einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,2^1$ überprüft [72]. Das Testergebnis zeigt auf, dass keine

¹ Die Nullhypothese soll bestätigt werden.

signifikanten Unterschiede zwischen der synthetischen und der experimentell ermittelten Zeichenfolge bestehen: $Z(970k) = 0,02$, $p = 0,973$ (Bestätigung der Nullhypothese). Die synthetische Längenverteilung aus dem Modell und die experimentell gewonnene Längenverteilung stammen demnach mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von derselben Verteilungsform ab. Aus der Anzahl der enthaltenen Zeichen (H_B bzw. L_B) des H- und des L-Zustandes im Templatesignal und der Zeichenlänge der Streckenkarte (K_B) ergibt sich die erwartete Eintrittshäufigkeit für die Zeichenfolge des Templatesignals:

$$N(F) = (K_B - \underbrace{(H_B + L_B - 1)}_{\text{Term A}}) \cdot \underbrace{(P(H))^{H_B} (P(L))^{L_B}}_{\text{Term B}}$$

$$\leq K_B \cdot (P(H))^{H_B} (P(L))^{L_B} \stackrel{!}{\leq} 1 \quad (5.11)$$

Für ausgedehnte Streckenkarten ist die Anzahl der Zeichen in der Streckenkarte um ein vielfaches Größer als die Anzahl der Zeichen des gesuchten Templates (Term A). Für $K_B \gg (H_B + L_B - 1)$ kann der Term A vernachlässigt werden. Die Eintrittshäufigkeit, eine bestimmte Zeichenfolge (Template) in einer sehr großen Zeichenfolge (Streckenkarte) zu finden, hängt dann nur noch von den Eintrittswahrscheinlichkeiten $P(H)$ und $P(L)$ und der Anzahl der Zeichen H_B und L_B ab. Durch das Erfüllen der Ungleichung 5.11 ist die Zeichenfolge des Templates mit großer Wahrscheinlichkeit höchstens ein Mal in der Zeichenfolge der Streckenkarte enthalten, wodurch eine eindeutige Positionszuordnung des Schienenfahrzeugs gegeben ist. Mit dem Abtastintervall s ist die Länge des Templates (in Meter) durch:

$$T_L \approx (L_B + H_B) \cdot s \quad (5.12)$$

gegeben. Für die Abschätzung der maximalen Templatelänge wird die Zeichenfolge mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt (vgl. Gleichung 5.11 und Anhang A.5). Unabhängig von der Länge des Templates enthält die Zeichenfolge nur Zeichen des H-Zustandes (siehe Gleichung 5.11 und Abbildung A.7). Die Gleichung 5.12 vereinfacht sich dadurch und kann geschrieben werden als:

$$T_{\max}^* = T_L = H_B \cdot s. \quad (5.13)$$

Für eine konservative Abschätzung der erforderlichen maximalen Templatelänge wird der Skalierungsfaktor s auf den Wert $s^+ = 1,77 \rightarrow 2,00$ angehoben. Die maximale Templatelänge ist dann durch:

$$T_L^+ = H_B \cdot s^+ \geq T_{\max}^* \quad (5.14)$$

gegeben.

5.2.1 Maximale Templatelänge

Aus der Zeichenfolge mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit, dem Skalierungsfaktor und der Länge der Streckenkarte ergibt sich die maximale Templatelänge, die erforderlich ist, um ein Schienenfahrzeug auf einer gegebenen Streckenkarte eindeutig zu lokalisieren. In der Abbildung 5.3 ist auf der Ordi-

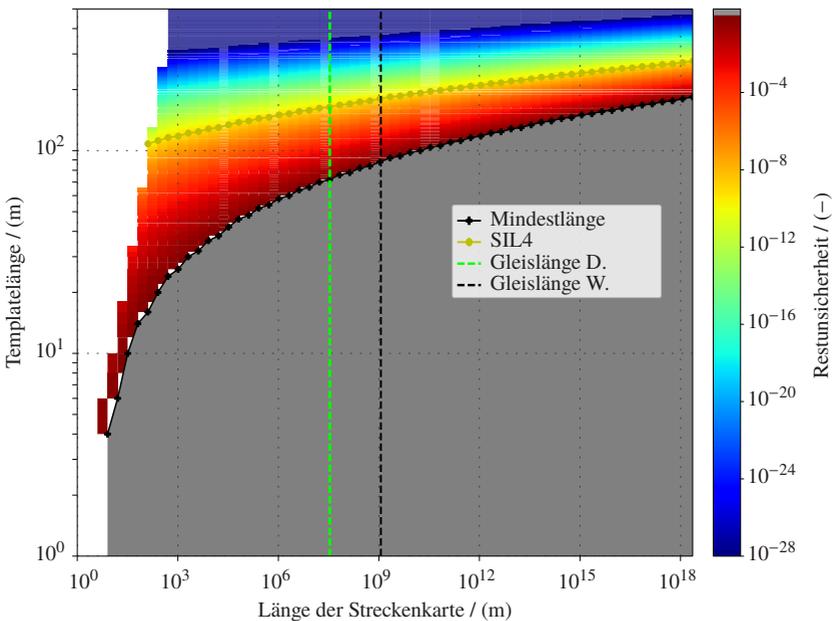


Abbildung 5.3: Templatelänge, die für eine eindeutige Positionsbestimmung erforderlich ist. Die vertikalen Linien entsprechen der gesamten deutschen (grün; ca. 61000 km) und weltweiten (schwarz; ca. 1148186 km) Gleisstreckenlänge [73], [74].

nenachse die Länge des Templates- und auf der Abszissenachse die Länge der Streckenkarte in Metern aufgetragen. Zu sehen sind die maximal benötigte Templatelängen mit den dazugehörigen Restunsicherheiten, die sich über die Gleichung 5.11 für unterschiedlich große Streckenkarten ergeben. Die schwarz durchgezogene Linie kennzeichnet dabei die untere Grenze der maximalen Templatelänge. An dieser Grenze ist die Länge des Templates ausreichend, um eine eindeutige Position des Schienenfahrzeugs über die gesamte Streckenkarte zu ermitteln. Der gelbe Bereich kennzeichnet die Grenzen, an dem die Restunsicherheit der Position 10^{-9} beträgt (vgl. Tabelle A.1). Die beiden vertikalen Linien entsprechen einer Streckenkarte, die der Größe des deutschen (grün; ca. 61000 km) bzw. des weltweiten Gleisnetzes (schwarz; ca. 1148186 km) entspricht [73], [74]. In dem grau hinterlegten Bereich kann es durch ein zu klein gewähltes Template bzw. eine zu große Streckenkarte zu Mehrdeutigkeiten bei der Positionsbestimmung kommen. Eine eindeutige Positionsbestimmung ist in diesem Bereich nicht mehr gegeben. Für die maximale globale Gleislänge ist eine Templatelänge von 200 m erforderlich, um einen eindeutigen Positionsabgleich mit einer Restunsicherheit von 10^{-12} zu erhalten.

5.2.2 Speichergröße der ferromagnetischen Streckenkarte

Für die Speicherung einer unkomprimierten ferromagnetischen Streckenkarte, bestehend aus den ferromagnetischen Inhomogenitäten der linken und rechten Schiene zusammen mit einem UTM32-Koordinatenpaar (E | N), müssen ca. 4,00 MB/km bei einer Streckenauflösung von $d_s = 0,01$ m abgespeichert werden. In der Tabelle 5.1 sind für unterschiedlich große ferromagnetische Streckenkarten die Datenraten und Datenmengen für die Streckenauflösung von 0,01 m und 0,10 m zu sehen. Das Speichervolumen des gesamten deutschen Streckennetzes in seiner höchsten Auflösung (0,01 m) beträgt dabei ca. 260 GB und ist durch handelsüblichen Speichermedien (Festplatte oder SD-Karte) realisierbar. Die größte Herausforderung bei der absoluten Positionsbestimmung besteht darin, möglichst effizient die aktuellen ferromagnetischen Signaturen mit denen der ferromagnetischen Streckenkarte abzugleichen.

Tabelle 5.1: Speicherbedarf der unkomprimierten ferromagnetischen Streckenkarten für unterschiedliche Auflösungen und Inhalte.

ferr. Streckenkarte	($\frac{MB}{km}$)	Deutschland / (TB)	Welt / (TB)
(E N) / Det.A / Det.B / Distanz / $\Delta d = 0,01$ m	4,00	$\approx 0,26$	$\approx 4,59$
(E N) / Det.A / Det.B / $\Delta d = 0,01$ m	3,20	$\approx 0,22$	$\approx 3,67$
(E N) / Det.A / Det.B / $\Delta d = 0,10$ m	0,32	$\approx 0,02$	$\approx 0,37$

5.3 Erweitertes Lokalisierungsverfahren

Abhängig von der Anzahl der Datenpunkte in der ferromagnetischen Streckenkarte steigt der Rechenaufwand und dadurch die Zeit, die für ein Positionsabgleich benötigt wird. Unter regulären Betriebsbedingungen ist der Suchraum bereits durch eine zuvor ermittelte Position, bspw. über den DIS, Bluetooth-, WLAN beacon, GNSS Empfänger oder Funkmasten entlang der Strecke, auf ein Teilsegment der ferromagnetischen Streckenkarte beschränkt. Eine ungefähre Position des Schienenfahrzeugs ist dabei ausreichend, um den Suchraum und damit die Berechnungszeit auf einen Bruchteil der ursprünglich benötigten Zeit zu reduzieren. Ist eine Einschränkung des Suchraumes, bspw. im Fall einer initialen Positionsbestimmung, nicht möglich, muss die aktuelle ferromagnetische Signatur der Schiene mit der gesamten ferromagnetischen Streckenkarte abgeglichen werden. Für eine ferromagnetische Streckenkarte mit der Länge von 10000 km benötigt der Abgleich mit einem Intel Core i7-3740QM @ 2.70 GHz zwei Minuten².

Um das Auswerteverfahren zu beschleunigen, werden über eine DWT

² Die Zeit, die für ein Abgleich benötigt wird, hängt entscheidend von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Hardware ab. Durch eine Aufteilung der ferromagnetischen Streckenkarte in mehrere Teilsegmente lässt sich der Suchprozess parallel auf mehreren Prozessorkerne verteilen. Die Suchdauer reduziert sich dabei um den Faktor, der der Anzahl an zur Verfügung stehenden Prozessorkernen entspricht.

die Approximationskoeffizienten der ferromagnetischen Inhomogenitäten bestimmt. Dabei verringert sich mit jedem Level die Anzahl der zu vergleichenden Datenpunkte. Werden anstelle der ferromagnetischen Inhomogenitäten die entsprechenden Approximationskoeffizienten der Signalstrukturen verwendet, verringert dies die Rechenzeit. Durch den äquivalenten Informationsgehalt der beiden Darstellungen sind unterschiedliche Detailgrade in einer gemeinsame ferromagnetischen Streckenkarte darstellbar, ohne dabei die Menge der zu speichernden Datenpunkte zu erhöhen, vgl. Kapitel 2.7.2.

5.3.1 Wavelet-basiertes Lokalisierungsverfahren

Das Wavelet-basierte Lokalisierungsverfahren fordert die Reduktion der Messdaten. Anstelle der ferromagnetischen Inhomogenitäten werden für den Streckenabgleich die Signalstrukturen der entsprechenden Approximationskoeffizienten aus dem jeweiligen Level l der DWT als Image- und Template für das Template-Matching-Verfahren verwendet (vgl. Kapitel 2.7.3 und 3.1). Der Index w_l , an dem die Approximationskoeffizienten des Templates die höchste Übereinstimmung mit den Approximationskoeffizienten der ferromagnetischen Streckenkarte besitzen, wird mit der Gleichung:

$$n = 2^l \cdot w_l \quad (l = 0) \quad (5.15)$$

$$n = 2^l \cdot w_l \pm 2^{(l-1)} \quad (l > 0) \quad (5.16)$$

auf den Positionsindex n der ursprünglichen ferromagnetischen Streckenkarte zurückgerechnet (Level $l=0$ entspricht der höchsten Auflösung). Die bei der Rücktransformation entstehende Unsicherheit ΔD beträgt je nach Level:

$$\Delta D = 0 \quad (l = 0) \quad (5.17)$$

$$\Delta D = \pm 2^{(l-1)} \cdot d_s \quad (l > 0). \quad (5.18)$$

Die maximale Positionsunsicherheit ΔD_{\max} ist dann durch:

$$\Delta D_{\max} = |\Delta D| = 2^{(l-1)} \cdot d_s \quad (l > 0) \quad (5.19)$$

gegeben und symmetrisch um die tatsächliche Position in der ferromagnetischen Streckenkarte verteilt. Bei einer Kompressionsrate von bspw. 256 (Level $l = 8$) entspricht dies einer maximalen Abweichung von $\Delta D_{\max} = 1,28$ m bei einer Auflösung der ferromagnetischen Streckenkarte von $d_s = 0,01$ m.

5.4 Simulationsaufbau

Zur Untersuchung des Wavelet-basierten Lokalisierungsverfahrens wird mit dem Modell der ferromagnetischen Inhomogenitäten zunächst eine ausgedehnte Streckenkarte generiert. Ein Teilsegment aus der Streckenkarte dient dabei als Template. Durch eine gezielte Manipulation des Templates werden unterschiedliche Störungen simuliert. Anschließend werden die Approximationskoeffizienten aus der Streckenkarte und des Templates ermittelt und miteinander verglichen. Aus der Berechnungszeit (Zeitspanne, die für den Abgleich mit der Streckenkarte benötigt wird) und der Abweichung zu der Referenzposition wird in Abhängigkeit des Level l und der Kompressionsrate k die jeweils maximal mögliche Kompressionsrate ermittelt, bei der ein sicherer Abgleich mit der Streckenkarte gegeben ist.

5.4.1 Abgleich idealer Signaturen

Mit dem Modell der ferromagnetischen Inhomogenitäten wird eine synthetische Streckenkarte mit einer Länge von ca. 1342 km generiert. Aus der Streckenkarte

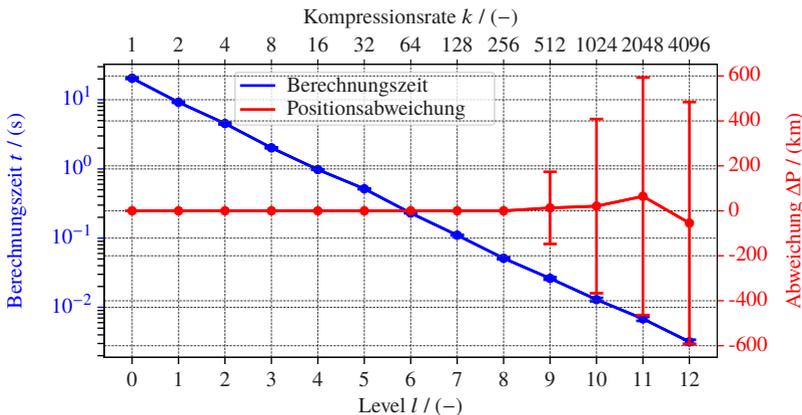


Abbildung 5.4: Berechnungszeit und Abweichung zur Referenzposition in Abhängigkeit der dazugehörigen Wavelet-Koeffizienten für das jeweilige Level l . Auf einer Streckenkarte von 1342 km wurden für jeweils 100 unterschiedliche Templates (mit einer Länge von jeweils 200 m) die Positionen ermittelt.

wird ein zufälliges Template mit einer Länge von 200 m ausgewählt. Das Template wird anschließend mit dem Lokalisierungsverfahren der unkomprimierten ferromagnetischen Inhomogenitäten (Level 0) und mit dem Lokalisierungsverfahren der Approximationskoeffizienten der Level 1 bis 12 in der Streckenkarte gesucht. Für jedes Level werden 100 Suchdurchläufe mit unterschiedlichen Templates an unterschiedlichen Positionen durchgeführt. In der Abbildung 5.4 sind der Mittelwert und die Standardabweichung für die Berechnungszeit (blau) und die Positionsabweichung zu der Referenzposition³ (rot) für die Approximationskoeffizienten (Level 0 bis 12) und der dazugehörigen Kompressionsrate zu sehen. Ohne die Abweichung zu der Referenzposition zu erhöhen, reduziert sich die Berechnungszeit und die zu speichernde Datenmenge der Streckenkarte um den Faktor 256.

5.4.2 Abgleich fehlerbehafteter Signaturen

Das zum Abgleich mit der Streckenkarte verwendet Template-Matching-Verfahren ist robust gegenüber Signalrauschen oder Skalierung der Messergebnisse. Kommt es jedoch zu baulichen Veränderungen an der Strecke, bspw. zum Austausch eines defekten Schienensegments, treten Inkonsistenzen zwischen den gemessenen- und den in der Streckenkarte hinterlegten ferromagnetischen Strukturen auf. Abhängig von der Länge des veränderten Streckenabschnitts ist eine Positionsbestimmung nur noch bedingt gegeben.⁴ Um die Auswirkungen von Messfehlern oder lokalen Veränderungen der ferromagnetischen Inhomogenitäten abzuschätzen, wird die in Kapitel 5.4.1 beschriebene Versuchsreihe mit einem modifizierte ferromagnetische Signatur als Template wiederholt. Jedem Template wird dabei an einer zufälligen Position ein modifiziertes 50 m langes ferromagnetisches Signalstück (entspricht 25 % der Gesamtlänge des Templates) zugewiesen. In der Abbildung 5.5 sind der Mittelwert und die Standardabweichung für die Berechnungszeit (blau) und die Positionsabweichung zu der Referenzposition (rot) für die Approximationskoeffizienten (Level 0 bis 12) und der dazugehörigen Kompressionsrate zu sehen. Mit den modifizierten

³ Die Referenzposition ist aus der zuvor extrahierte Position des Templates bekannt.

⁴ Gegebenenfalls muss die ferromagnetische Signatur des erneuerten Streckenabschnittes erneut ermittelt werden.

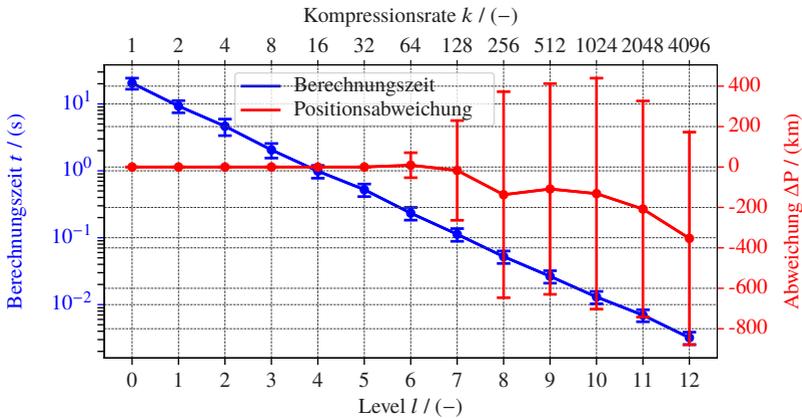


Abbildung 5.5: Berechnungszeit und Abweichung zur Referenzposition in Abhängigkeit der dazu gehörigen Wavelet-Koeffizienten für das jeweilige Level l . Auf einer Streckenkarte von 1342 km wurden für jeweils 100 unterschiedliche Templates (mit einer Länge von jeweils 200 m) die Positionen ermittelt. Für jedes Template wurden an einer zufälligen Positionen im Signal 50 m (25 % der Daten) der ursprünglichen Signalsignatur modifiziert.

ferromagnetischen Signaturen des Templates ist weiterhin eine eindeutige Position gegeben. Die Berechnungszeit und die zu speichernde Datenmenge der Streckenkarte kann in diesem Fall bis zum Faktor 32 reduziert werden.

5.4.3 Maximale Templatelänge

Die maximale Templatelänge, die für eine ferromagnetische Streckenkarte mit einer Länge von ca. 1342 km für eine eindeutige Positionsermittlung benötigt wird, beträgt 29 m, vgl. Gleichung 5.11. Durch die reduzierte Länge des Templates (vgl. Kapitel 5.4.1 und 5.4.2) verringert sich ebenfalls die maximal mögliche Kompressionsrate. Um die Auswirkungen auf die Positionsbestimmung zu untersuchen, wird die Versuchsreihe aus Kapitel 5.4.1 mit einer reduzierten Templatelänge von 29 m wiederholt. In der Abbildung 5.6 sind der Mittelwert und die Standardabweichung für die Berechnungszeit (blau) und die Positionsabweichung zu der Referenzposition (rot) für unterschiedliche Approximationskoeffizienten (Level 0 bis 10) und der dazugehörigen Kompressionsrate zu sehen. Ohne die Abweichung zu der Referenzposition zu erhöhen, kann die Berechnungszeit und die zu speichernde Datenmenge der Streckenkarte um bis zu 32 reduziert werden.

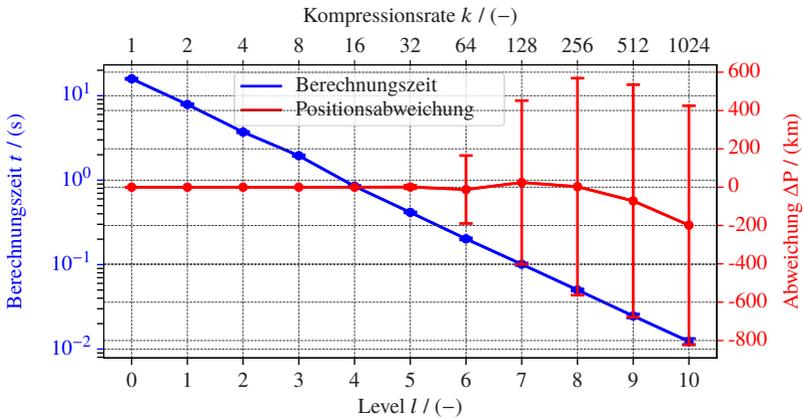


Abbildung 5.6: Berechnungszeit und Abweichung zur Referenzposition in Abhängigkeit der dazu gehörigen Wavelet-Koeffizienten für das jeweilige Level l . Auf einer Streckenkarte von 1342 km wurden für jeweils 100 unterschiedliche Templates (mit einer Länge von jeweils 29 m) die Positionen ermittelt.

5.4.4 Ergebnisse aus den Simulationen

Der initiale Positionsabgleich über die ferromagnetische Signalstruktur der Schiene stellt – bedingt durch den rechenintensiven Vorgang – die größte technische Herausforderung des Lokalisierungsverfahrens dar. Um den Abgleich mit der Streckenkarte zu beschleunigen, werden anstelle der ferromagnetischen Inhomogenitäten deren jeweiligen Approximationskoeffizienten aus der Wavelettransformation verwendet. Die simulierten Testszenarien ergeben eine konsequente Reduktion der Auswertzeit und Speicherkapazität. Selbst bei gezielter Manipulation des Templates kann die Position über die Approximationskoeffizienten der Streckenkarte eindeutig ermittelt werden. Die Zeit, die für den Abgleich erforderlich ist, kann dabei um das 256-fache reduziert werden, ohne dabei die Abweichung zu der Referenzposition zu erhöhen. Die längsseitige Unsicherheit, die bei der IDWT auftritt, beträgt dabei 2,56 m. Das Waveletbasierte Kompressionsverfahren liefert dadurch eine effiziente Möglichkeit, den Suchprozess auf ausgedehnten Streckenkarten zu beschleunigen, ohne dabei die Gleisselektivität durch die ferromagnetische Signatur der Schiene zu verlieren. In der Tabelle 5.2 können die benötigten Zeiten und Kompressionsraten abgelesen werden, die erforderlich sind, um auf den gegebenen Streckenkarten eine initiale Position des Schienenfahrzeugs ermitteln zu können.

Tabelle 5.2: Dauer in Sekunden, die für den Abgleich mit der Streckenkarte benötigt wird, um ein Template mit einer Länge von 200 m für verschieden lange Streckenkarten mit unterschiedlichen Kompressionsraten abzugleichen. Die Auflösung der Streckenkarte beträgt jeweils 0,01 m.

Kompressionsrate k	1000 km	Deutschland	Weltweit
1	$\approx 14,6$	$\approx 490,0$	$\approx 16766,8$
32	$\approx 0,5$	$\approx 15,3$	$\approx 524,0$
128	$\approx 0,1$	$\approx 3,8$	$\approx 131,0$
256	$\approx 0,1$	$\approx 2,0$	$\approx 65,5$

5.5 Zusammenfassung

Die ferromagnetischen Inhomogenitäten entlang der Schiene ergeben einzigartige Signalstrukturen, die als Landmarken für die Geschwindigkeits- und Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen verwendet werden können. Zur Abschätzung der maximalen Templatelänge, die für einen sicheren Abgleich mit der Streckenkarte erforderlich ist, wurde auf Basis der bisher gemessenen Signaturen ein Modell der ferromagnetischen Inhomogenitäten erstellt. Aus dem Modell wurde eine maximale Templatelänge von 200 m mit einer Restunsicherheit von 10^{-12} ermittelt. Diese Templatelänge erlaubt selbst auf ausgedehnten Streckenkarten einen eindeutigen Positionsabgleich. Über das Modell können zudem die ferromagnetischen Signalstrukturen für beliebig lange Streckenabschnitte simuliert werden. Die synthetischen Daten zeigen auf, wie mithilfe der DWT und den dazugehörigen Approximationskoeffizienten der Positionsabgleich der ferromagnetischen Signaturen mit der Streckenkarte beschleunigt werden kann. Dabei wird eine Reduktion der Rechenzeit und der zu speichernden Datenmenge um das 256-fache erreicht, ohne die Positionsgenauigkeit oder die Gleisselektivität des Lokalisierungsverfahrens zu beeinträchtigen. Somit kann selbst bei einer initialen Positionsbestimmung ein Abgleich mit der Streckenkarte in weniger als einer Sekunde erfolgen.

6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen des Differenz-Induktivitäts-Sensors (DIS) zusammengefasst und interpretiert. Neben den Möglichkeiten, die Geschwindigkeit und eine gleisselektive Position über die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene zu bestimmen, wird aufgezeigt, wie diese für bestehende und zukünftige Anwendungen genutzt werden können. Zusätzlich werden Vorteile des DIS gegenüber aktuellen Sensoren, die zur fahrzeugseitigen Geschwindigkeits- und Positionsbestimmung eingesetzt werden, aufgezeigt. Im Ausblick werden Erweiterungen und Verbesserungen an der Hardware des DIS vorgeschlagen. Im Anschluss wird auf die Notwendigkeit weiterer Kartierungs- und Lokalisierungsfahrten eingegangen.

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiges Verfahren zur bordautonomen Geschwindigkeits- und gleisselektiven Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen vorgestellt. Der eigens für diese Aufgabe entwickelte DIS verwendet dazu ausschließlich die bereits vorhandenen ferromagnetischen Infrastrukturelemente (Schienen, Radlenker, Herzstücke etc.) entlang der Gleisstrecke. In den ersten Kapiteln wurde der Aufbau, das elektromagnetische Messverfahren und die Funktionsweise des DIS erläutert und anschließend anhand von Simulationen und unterschiedlichen Experimenten validiert. Aus den zeitsynchronen Messwerten beider Detektoren konnte die DIS-Arbeitsfrequenz von 30 kHz bestätigt werden. Über ein Template-Matching-Verfahren wurde anschließend der zeitliche Versatz der zuvor über eine soft-thresholding (wavelet shrinkage) gefilterten ferromagnetischen Signaturen der beiden Detektoren bestimmt. Mit dem Abstand der Detektoren wurde die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs ermittelt. Über das berührungslose Messverfahren ist die Geschwindigkeit unempfindlich gegenüber Verschleiß und Schlupf zwischen Rad und Schiene.

Gleichzeitig ergibt sich aus den einzigartigen ferromagnetischen Signaturen, die sich entlang der Gleisstrecke befinden, und der ferromagnetischen Streckenkarte eine Methode zur gleisselektiven Bestimmung der Position von Schienenfahrzeugen. Die Leistungsfähigkeit des DIS zur Bestimmung der Geschwindigkeit und der gleisselektiven Position wurde auf der Teststrecke des PCW (T4) untersucht. Für den anspruchsvollen Niedriggeschwindigkeitsbereich (< 2 m/s) liegt die mittlere Geschwindigkeitsabweichung des DIS zur Referenzgeschwindigkeit bei $\Delta v = 0,02$ m/s. 97 % aller Geschwindigkeiten, die mit dem DIS ermittelt wurden, besitzen eine Abweichung zur Referenzgeschwindigkeit von weniger als $\pm 0,5$ m/s. Der DIS erfüllt dadurch die Anforderungen des ETCS zur Geschwindigkeitsbestimmung im Niedriggeschwindigkeitsbereich. Zusätzlich zu der Gleisselektivität besitzen 99 % der ermittelten Positionen des DIS eine Positionsabweichung zu der Referenzposition von unter 0,60 m. Die relative Positionsabweichung beträgt weniger als 0,05 m. Aus den Messergebnissen des DIS wurde ein Modell entwickelt, welches die Struktur der ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schienen wiedergibt. Basierend auf diesem Modell wurde eine maximale Templatelänge von 200 m abgeleitet, mit der eine eindeutige Position auf einer ferromagnetischen Streckenkarte mit einer Länge von mehr als einer Millionen km ermittelt werden kann. Um den Abgleich auf solch einer ausgedehnten ferromagnetischen Streckenkarte zu beschleunigen, werden anstelle der ferromagnetischen Inhomogenitäten die dazugehörigen Approximationskoeffizienten für den Abgleich verwendet. Dadurch wird die Rechenzeit und die Datenmenge um das 256-fache reduziert, ohne dabei die Positionsgenauigkeit oder die Gleisselektivität des Verfahrens zu verlieren.

6.2 Fazit

Anhand der bisherigen Untersuchungen wurde gezeigt, wie ausschließlich über die ferromagnetischen Signaturen der Schiene und mit dem DIS berührungslos die Geschwindigkeit und eine gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs ermittelt werden kann. Im Vergleich zu den etablierten Verfahren bietet der DIS zusammen mit den ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene diverse Vorteile. Das berührungslose Messverfahren liefert stets die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Schienenfahrzeug und der Gleisstrecke. Dadurch ist das Messverfahren unempfindlich gegenüber Verschleiß des Radumfangs oder Schlupf zwischen Rad und Schiene. Für die gleisselektive Positionsbestimmung des Schienenfahrzeugs sind weder zusätzliche Infrastrukturelemente

entlang der Gleisstrecke, noch eine freie Sicht auf Satelliten, klare Sichtverhältnisse oder eine Initialisierung der Position erforderlich. Der Aufbau des DIS und das zugrunde liegende Messverfahren sind dabei so konzipiert, dass ausschließlich der Abstand der Detektoren für die Bestimmung der Geschwindigkeit und eine ferromagnetische Streckenkarte für die Bestimmung der Position erforderlich ist. Ein Abgleich oder eine Kalibrierung der Detektoren untereinander ist nicht notwendig. Der Aufbau der ferromagnetischen Streckenkarte profitiert dabei von der starken Bindung des Schienenfahrzeugs an die Gleisstrecke. Die ferromagnetische Streckenkarte ist so konzipiert, dass diese die Struktur der Schienen durch einen Liniennetzplan widerspiegelt. Hochauflösende und geografisch exakte Streckenkarten bzw. eine aufwendige Vermessung der Gleisstrecke entfallen. Ungeachtet dessen sind die linke und rechte Schiene eines Gleissegmentes eindeutig über die ferromagnetischen Inhomogenitäten voneinander unterscheidbar. Dadurch sind geografisch dicht beieinander liegende Streckenabschnitte eindeutig voneinander trennbar. Zur Validierung des DIS wurden ein LASER-Tachymeter und ein Galileo GNSS-Receiver als Referenzsensoren verwendet. Diese weisen eine wesentlich höhere Genauigkeit auf als Sensoren, die üblicherweise für die fahrzeugseitige Bestimmung der Geschwindigkeit und Position im Schienenverkehr zum Einsatz kommen. Die Positionsabweichung des DIS zu der Referenzsensorik liegt dabei in der Größenordnung der Positionsungenauigkeit der verwendeten Referenzsensoren. Der DIS erfüllt somit die Anforderungen des ETCS für die fahrzeugseitige Geschwindigkeits- und Positionsbestimmung. Verglichen mit dem ECS besitzt der DIS ein deutlich leistungsfähigeres Verfahren, um die absolute Position des Schienenfahrzeugs zu bestimmen. Im Gegensatz zu optischen Messverfahren ist das verwendete elektromagnetische Messverfahren des DIS unempfindlich gegenüber Verschmutzung der optischen Bauteile oder den vorherrschenden Lichtverhältnissen. Die Ergebnisse zeigen deutlich, welches Potenzial die ferromagnetischen Inhomogenitäten der Schiene und der DIS besitzen. Es ergeben sich viele Vorzüge, wie eine autarke Arbeitsweise unter der alleinigen Verwendung des DIS (Stand-Alone-Ansatz), eine berührungslose Erfassung der ferromagnetischen Inhomogenitäten, eine gleisselektive Positionsbestimmung sowie ein Messverfahren, dessen Messprinzip sich von den bisherigen Ansätzen und Sensoren abgrenzt (vgl. Tabelle 1.1). Hieraus ergeben sich Anwendungen, um bestehende Lokalisierungsverfahren zu ergänzen oder völlig neue Verfahren im Bahnbereich zu etablieren.

6.3 Ausblick

Wie bereits aus den Untersuchungen hervorgeht, besitzen sowohl die linke als auch die rechte Schiene eines Gleissegmentes eine einzigartige ferromagnetische Signatur, mit der die Geschwindigkeit und gleisselektive Position des Schienenfahrzeugs ermittelt werden kann. Um das bisherige Messverfahren weiter zu verbessern, ist eine Erweiterung des DIS von zwei auf vier oder mehr Detektorspulen, welche die ferromagnetischen Signaturen beider Schienen zur selben Zeit erfassen, erstrebenswert. Durch die zusätzlichen Messungen und die Möglichkeit, unterschiedliche Abstände zwischen den Detektorspulen zu realisieren, steigt die Signalvariation mit jedem zusätzlichen Detektor an. Davon profitiert die Genauigkeit und Robustheit zur Bestimmung der Geschwindigkeit und Position des Schienenfahrzeugs.

Neben der hardwareseitigen Erweiterung des DIS sind zusätzliche Kartierungsfahrten erforderlich, um die bestehenden ferromagnetischen Streckenkarten weiter auszubauen. Im Rahmen des Localization Reference Train¹ (LRT) [8], dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.² (DLR) und des Living Lab³ [75] bestehen bereits konkrete Vorhaben, bei denen bereits Streckenabschnitte zwischen Annaberg-Buchholz und Schwarzenberg (im Erzgebirge) kartiert wurden. Zukünftig ist eine permanente Installation des DIS auf einem Schienenfahrzeug vorgesehen, um kontinuierlich die Position des Schienenfahrzeugs zu ermitteln und die Langzeitstabilität der ferromagnetischen Signaturen entlang der Gleisstrecke zu untersuchen.

¹ TU Braunschweig, RWTH Aachen, Thales Deutschland GmbH, DLR Institut für Verkehrstechnik, Hörmann Vehicle Engineering Chemnitz, TU Darmstadt.

² Institut für Verkehrstechnik.

³ In Kooperation mit Thales Deutschland GmbH.

A Induktivitätsmessung

A.1 Phasenverschiebung

Induktivitäten L und Kapazitäten C an Wechselspannungen verursachen in elektrischen Schaltungen eine Phasenverschiebung φ zwischen der Spannung und der Stromstärke. Im allgemeinen Fall kann deshalb in der Wechselstromtechnik nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Spannung und Stromstärke zu jedem Zeitpunkt dieselbe Phase besitzen. Für den harmonischen Verlauf wird der Momentanwert der Spannung U und des Stroms I durch

$$U(t) = U_0 e^{i\omega t} \quad (\text{A.1})$$

$$I(t) = I_0 e^{i\omega t - \varphi}, \quad \omega = 2\pi f_0 \quad (\text{A.2})$$

mit den Extremwerten U_0 bzw. I_0 und der Kreisfrequenz ω , dargestellt. Die Verschiebung der Phase hat zur Folge, dass die Extremwerte und Nulldurchgänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchlaufen werden. Ist die Frequenz und der Versatz in der elektrischen Schaltung bekannt, lässt sich die Phase präzise ermitteln. Für den Fall einer idealen Induktivität (elektrische Spule), die an einer idealen Wechselspannungsquelle angeschlossen ist, wird durch die zeitliche Änderung der Stromstärke eine Spannung

$$U_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (\text{A.3})$$

in der Spule induzierte, die der anliegenden äußeren elektrischen Spannung entgegengerichtet ist. Das 2. Kirchhoffsches Gesetz besagt, dass die Summe aller Teilspannungen gleich Null sein muss:

$$U + U_L = U - L \frac{dI}{dt} = 0. \quad (\text{A.4})$$

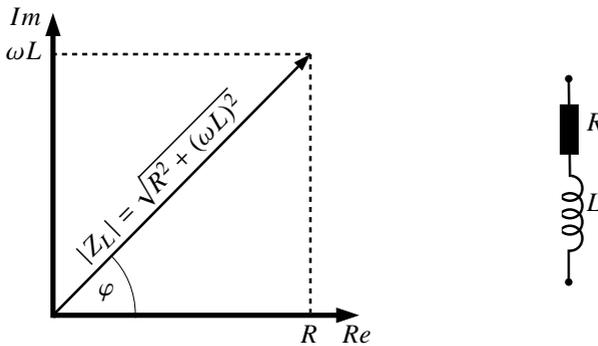


Abbildung A.1: Links: Zeigerdiagramm einer realen Spule. Rechts: Ersatzschaltbild einer realen Spule.

Die Gleichung A.4 geht zusammen mit A.2 über in

$$U = i\omega LI \quad (\text{A.5})$$

$$= \omega LI_0 e^{i(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})}. \quad (\text{A.6})$$

Wird Gleichung A.5 durch den Strom I dividiert, ergibt sich der induktive Widerstand der Spule

$$Z_L = \frac{U}{I} = i\omega L. \quad (\text{A.7})$$

Aus der imaginären Einheit i (siehe Gleichung A.5 bzw. A.6) folgt, dass für eine reine induktive Last die Spannung gegenüber dem Strom um $\pi/2 = 90^\circ$ vorausleitet. Für eine reale Spule, bestehend aus einem langen Draht der um einen Spulenkörper gewickelt wird (siehe Gleichung 2.1), ergibt sich auch immer ein reellwertiger ohmscher Widerstand. Die Spule kann dadurch nicht mehr als reine Induktivität aufgefasst werden. Das Ersatzschaltbild einer realen Spule ist in der Abbildung A.1 zu sehen und besteht aus einem idealen ohmschen Widerstand der mit einer idealen Induktivität in Serie geschaltet ist. Daraus ergibt sich ein Gesamtwiderstand bestehend aus einem Realteil (ohmscher Widerstand) R und einem komplexen (induktiven Widerstand) Z_L (siehe Gleichung A.8).

$$Z = R + i\omega L. \quad (\text{A.8})$$

Aus dem Zeigerdiagramm (siehe Abbildung A.1 links) ergibt sich durch die vektorielle Addition von Realteil und Imaginärteil der Scheinwiderstand:

$$|Z_L| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (\text{A.9})$$

Der von dem Scheinwiderstand und der reellen Achse eingeschlossene Winkel:

$$\tan(\varphi_{u,i}) = \frac{\omega L}{R} \quad (\text{A.10})$$

gibt den Phasenwinkel zwischen der Spannung und der Stromstärke an. Für einen festen Widerstand R und eine konstante Kreisfrequenz ω lässt sich die Phase nur über die Induktivität L bzw. Permeabilitätszahl μ_r verändern.

$$\frac{d\varphi}{dL} = \frac{R\omega_0}{R^2 + L^2\omega_0^2} \quad (\text{A.11})$$

In der Abbildung A.2 ist die Änderung der Phase $\frac{d\varphi}{dL}$ über die Gleichung A.11, in Abhängigkeit von der Messfrequenz der Spule, zu sehen. Die rote Linie kennzeichnet den Bereich mit einer Messfrequenz von $f_0 = 30$ kHz und einem Serienwiderstand von $R = 10 \Omega$. Unabhängig von der Detektorfrequenz ($f > 0$ Hz) und dem Serienwiderstand ($R > 0 \Omega$) ergibt sich eine maximale Änderung der Phase für eine Induktivität der Spule $L \mapsto 0$ H. Durch das Einbringen einer zusätzlichen Kapazität C (in Serie zu der Spule) lässt sich der Arbeitspunkt der maximalen Empfindlichkeit einstellen und dadurch die vorhandene Grundinduktivität L_G kompensieren. Die effektive Induktivität der Spule wird durch die Gleichung A.12 beschrieben.

$$L = L_G + \Delta L \quad (\text{A.12})$$

Dadurch ist gewährleistet, dass eine kleine Induktivitätsänderung ΔL zu einer großen Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke führt.

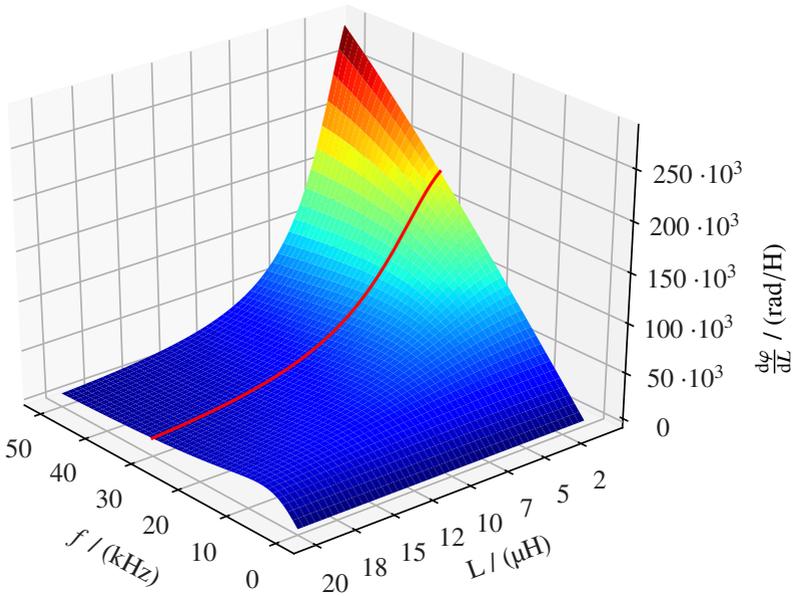


Abbildung A.2: Änderung der Phase $\frac{d\varphi}{dL}$ für verschiedene Induktivitäten L . Die rote Linie markiert die Messfrequenz bei 30 kHz.

A.2 Erzwungene elektrische Schwingung

Durch das Einbringen einer zusätzlichen Kapazität, die in Serie zu dem Widerstand und der Spule geschaltet wird, ergibt sich ein Serienschwingkreis (siehe Abbildung A.3 rechts). Aus den Teilspannungen:

$$U_R = I \cdot R \quad (\text{A.13})$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int I dt \quad (\text{A.14})$$

$$U_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (\text{A.15})$$

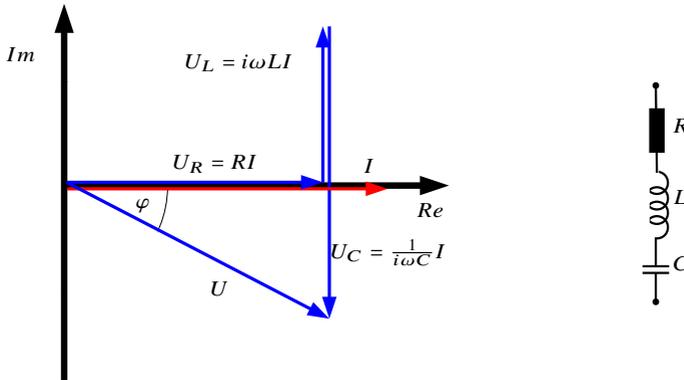


Abbildung A.3: Links: Zeigerdiagramm für den Serienschwingkreis bestehend aus einer realen Spule und einem Kondensator. Rechts: Ersatzschaltbild des Serienschwingkreises.

der harmonischen Eingangsspannung (siehe Gleichung A.1) und dem 2. Kirchhoffschen Gesetz:

$$U_R + U_C = U + U_L \quad (\text{A.16})$$

ergibt sich durch Differentiation nach der Zeit die Schwingungsgleichung:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = i\omega \frac{U_0}{L} e^{i\omega t} \quad (\text{A.17})$$

$$-\omega^2 + i\omega \frac{R}{L} + \frac{1}{LC} = i\omega \frac{U_0}{I_0 L} e^{i\varphi} \quad (\text{A.18})$$

$$= i\omega \frac{U_0}{I_0 L} \cos(\varphi) + i \sin(\varphi) \quad (\text{A.19})$$

für den Serienschwingkreis. Nach dem Einschwingvorgang stellt Gleichung A.2 eine Lösung der seriellen Schwingungsgleichung dar. Werden die zeitlichen Ableitungen:

$$\frac{dI}{dt} = i\omega I_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} = -\omega^2 I_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (\text{A.21})$$

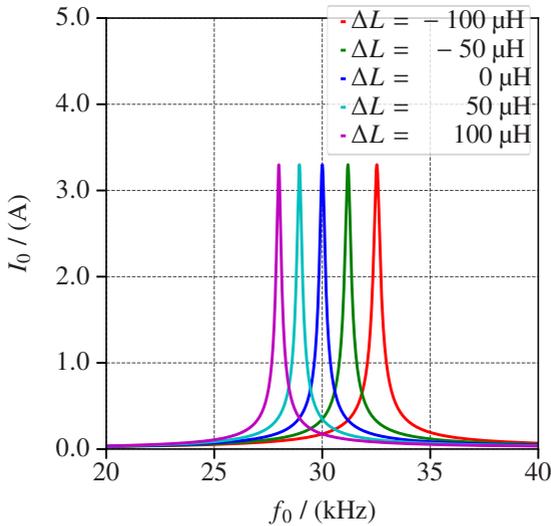


Abbildung A.4: Stromamplitude eines Serienschwingkreises (Grundinduktivität $L_G = 670 \mu\text{H}$, Serienwiderstand $R = 1 \Omega$ und Kapazität $C = 42 \text{ nF}$) für unterschiedliche Induktivitätsänderungen ΔL .

in die Gleichung A.17 eingesetzt, müssen Realteil und Imaginärteil:

$$\text{Re :} \quad \omega^2 - \frac{1}{LC} = \frac{U_0\omega}{I_0L} \sin(\varphi) \quad (\text{A.22})$$

$$\text{Im :} \quad \frac{R}{L}\omega = \frac{U_0\omega}{I_0L} \cos(\varphi) \quad (\text{A.23})$$

erfüllt sein. Durch Addition der Quadrate (Gleichungen A.22 und A.23) ist die partikuläre Lösung:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (\text{A.24})$$

$$= \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (\text{A.25})$$

für die Stromamplitude des eingeschwungenen Zustandes gegeben. In der Abbildung A.4 sind die Stromamplituden für verschiedene Induktivitäten des

Serienschwingkreises zu sehen. Bei einer festen Messfrequenz führt bereits eine geringe Änderung der Spuleninduktivität zu einer großen Änderung der Stromamplitude. Die Impedanz des Serienschwingkreises ergibt sich aus:

$$|Z_{RLC}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (\text{A.26})$$

und besteht aus dem Blindwiderstand der Induktivität $X_L = \omega L$ und der Kapazität $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Die Gleichung A.25 besitzt die Form des ohmschen Gesetzes. Für die Resonanzfrequenz:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{A.27})$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (\text{A.28})$$

bei der sich X_L und X_C gegenseitig aufheben, ist die maximal aufnehmbare Stromstärke im Serienschwingkreis durch den Serienwiderstand R begrenzt. Die Phase zwischen Spannung und Stromstärke im Serienschwingkreis ist aus dem Zeigerdiagramm (siehe Abbildung A.3 links) gegeben:

$$\tan(\varphi_{u,i}) = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{\omega(L_G + \Delta L) - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (\text{A.29})$$

Die Grundinduktivität¹ L_G der Spule wird durch die zusätzliche Kapazität kompensiert. Kommt es nun zu einer Änderung der ferromagnetischen Zusammensetzung entlang der Schiene, verändert sich die Permeabilitätszahl und dadurch die Induktivität der Detektorspule (Induktivitätsänderungen ΔL). Mit der Arbeitsfrequenz lässt sich die Phase auch als Laufzeitdifferenz (zeitlicher Versatz) zwischen Spannung und Stromstärke ausdrücken. Die Gleichung A.29 geht dann über in:

$$\Delta t = \frac{\varphi_{u,i}}{\omega_0} = \frac{\varphi_{u,i}}{2\pi f_0} \quad (\text{A.30})$$

$$\approx \left(\frac{L_G + \Delta L}{R} \right) \quad (\text{A.31})$$

¹ Die Grundinduktivität der Detektorspule sollte so gewählt werden, dass ein möglichst großer Arbeitsbereich entsteht. Denkbar wäre die mittlere Induktivität \bar{L} bzw. mittlere Permeabilität $\bar{\mu}$, entlang der Schiene.

A.3 Bestückungsplan der Messschaltung

Der Bestückungsplan aus der Abbildung A.5 zeigt die jeweiligen Positionen der einzelnen Baugruppen für eine der beiden Messschaltungen (vgl. Abbildung 2.3).

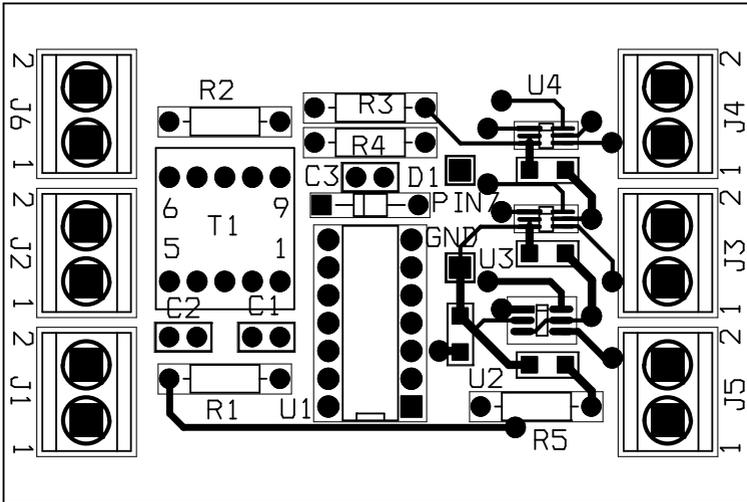


Abbildung A.5: Bestückungsplan für einen der beiden Messschaltungen des DIS.

A.4 Montageposition des DIS

In der technischen Zeichnung der Abbildung A.6 ist die Montageposition des DIS und der Detektoren A/B über dem Schienenkopf zu sehen (Zeichnung mit freundlicher Genehmigung von Bernd Kröper).

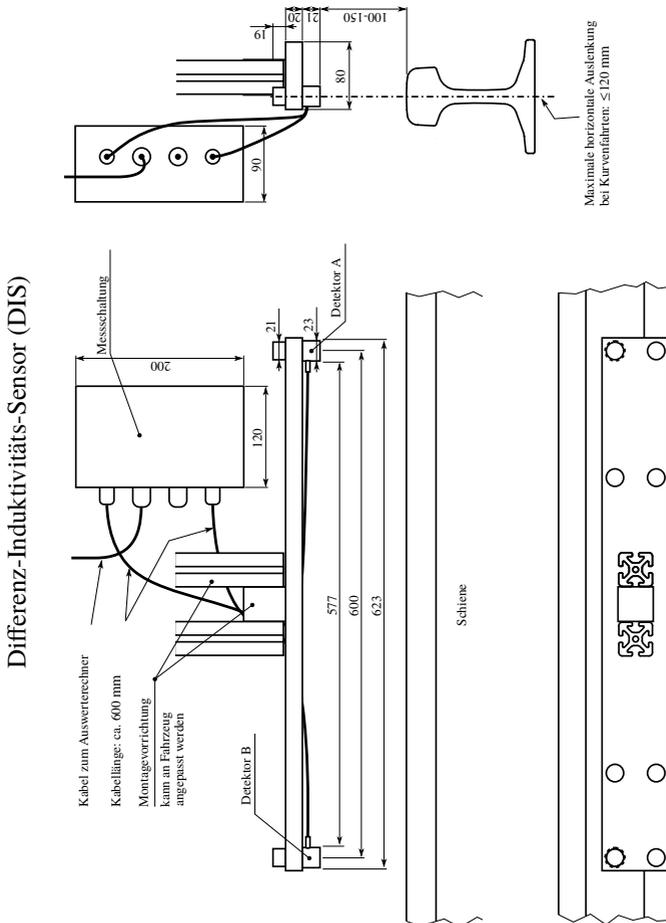


Abbildung A.6: Technische Zeichnung des DIS (mit freundlicher freundlicher Genehmigung von Bernd Kröper).

A.6 Safety Integrity Level SIL

Für den sicheren Betrieb von Maschinen und Anlagen sind sogenannte Risikoanalysen erforderlich. Zur Quantifizierung der Risikoreduzierung wird mit Risikobewertungsmethoden die jeweilige SIL-Anforderung erstellt. In der Tabelle A.1 ist die Tolerierbare Gefährdungsrate (THR) und die dazugehörige Sicherheitsanforderungsstufe zu sehen [76].

Tabelle A.1: Tolerierbare Gefährdungsrate (THR) und Sicherheitsanforderungsstufe (SIL) (EN 50129, zitiert nach [77]).

Tolerierbare Gefährdungsrate (THR) pro Stunde und pro Funktion	Sicherheitsanforderungsstufe (SIL)
$10^{-9} \leq \text{THR} \leq 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq \text{THR} \leq 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq \text{THR} \leq 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq \text{THR} \leq 10^{-5}$	1

B Ferromagnetische Signaturen

Darstellung der ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten für die Fahrmanöver ID = 1 bis 33 (vgl. Abbildung 3.10) zusammen mit den superpositionierten ferromagnetischen Inhomogenitäten der rechten Schiene (ID = 1-7), der linken Schien (ID = 12-33) und der inneren Schiene (ID = 8-11).

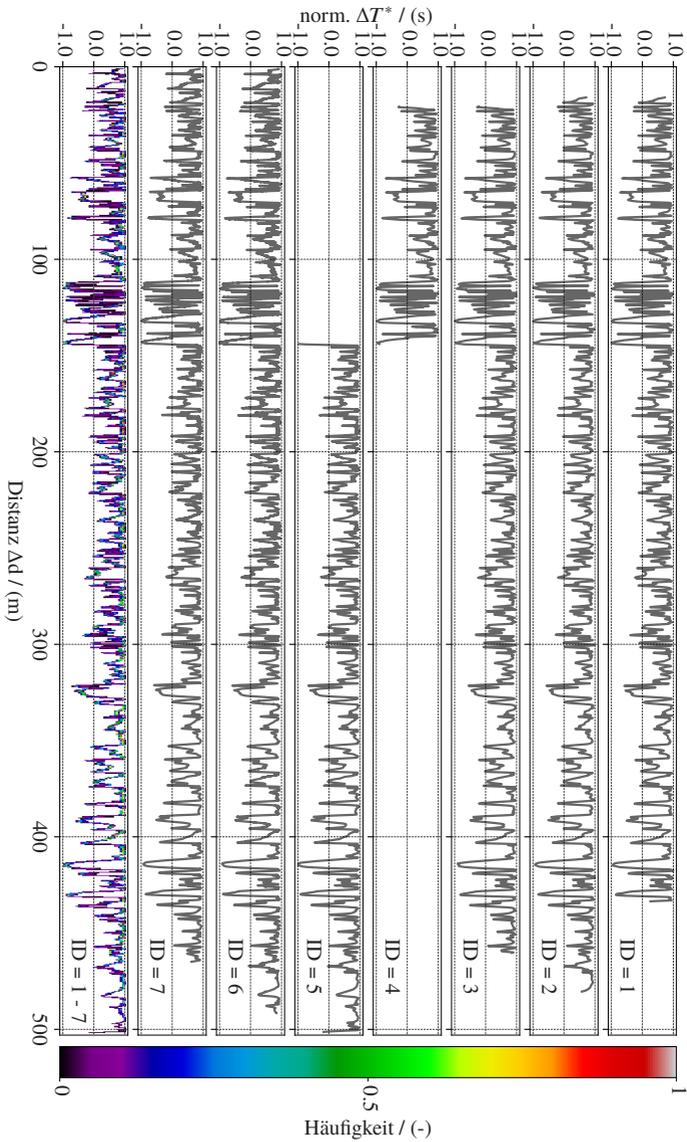


Abbildung B.1: Darstellung der ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten der Fahrmanöver ID = 1 bis 7 (vgl. Abbildung 3.10) und der Superposition aus ID = 1-7.

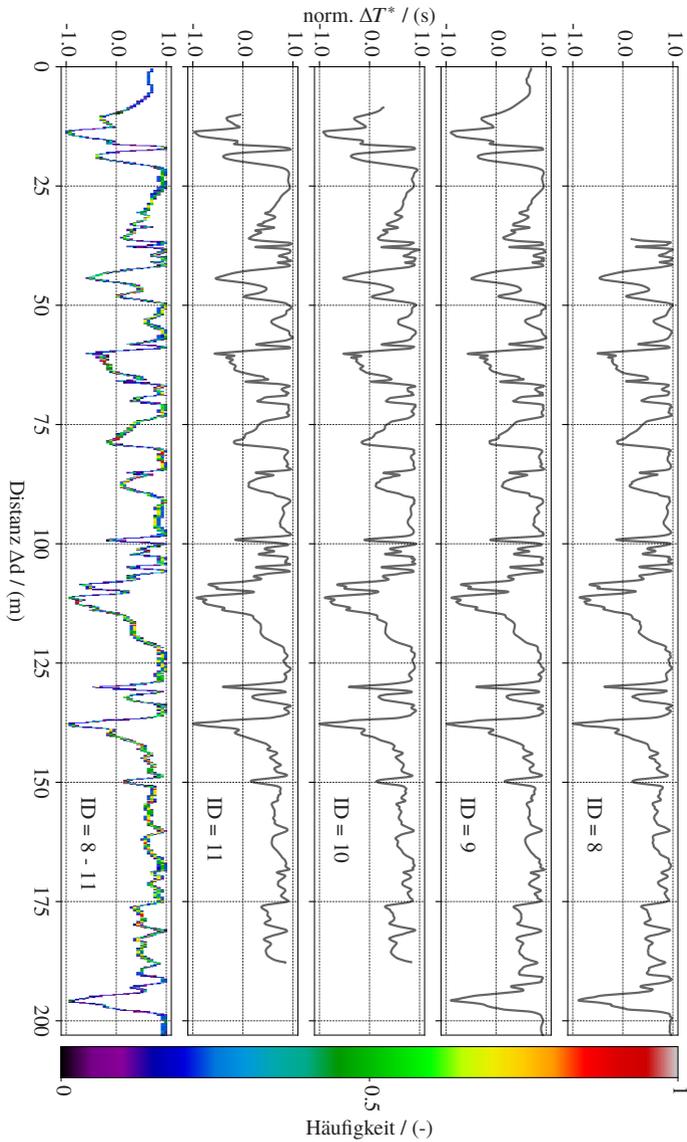


Abbildung B.2: Darstellung der ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten der Fahrmanöver ID = 8 bis 11 (vgl. Abbildung 3.10) und der Superposition aus ID = 8-11.

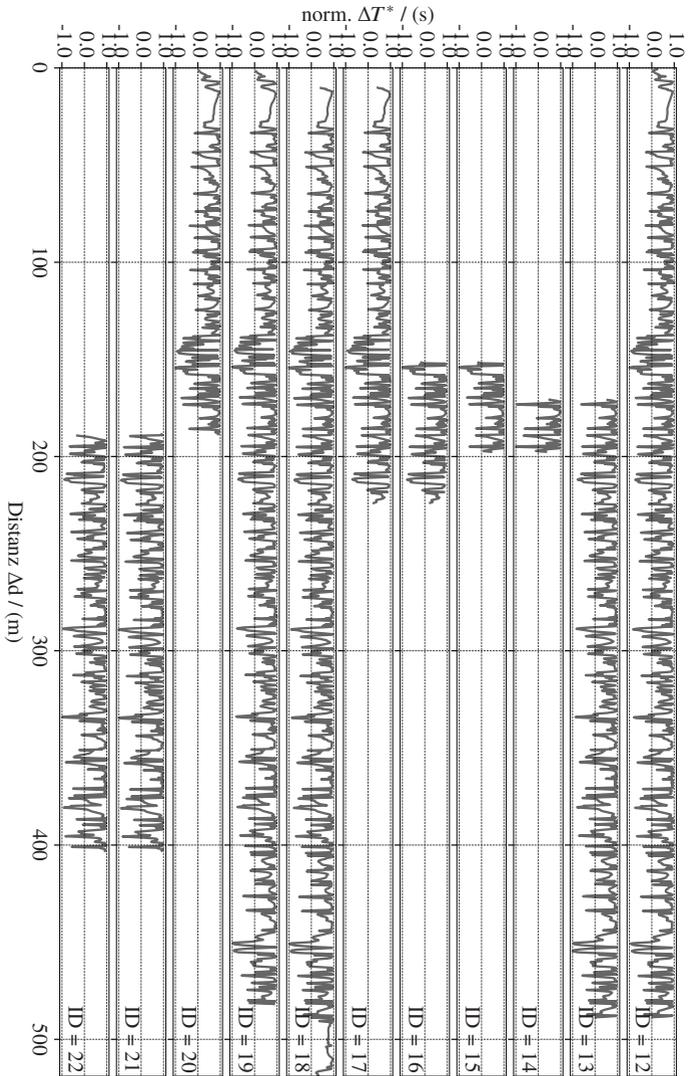


Abbildung B.3: Darstellung der ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten der Fahrmanöver ID = 12 bis 22 (vgl. Abbildung 3.10).

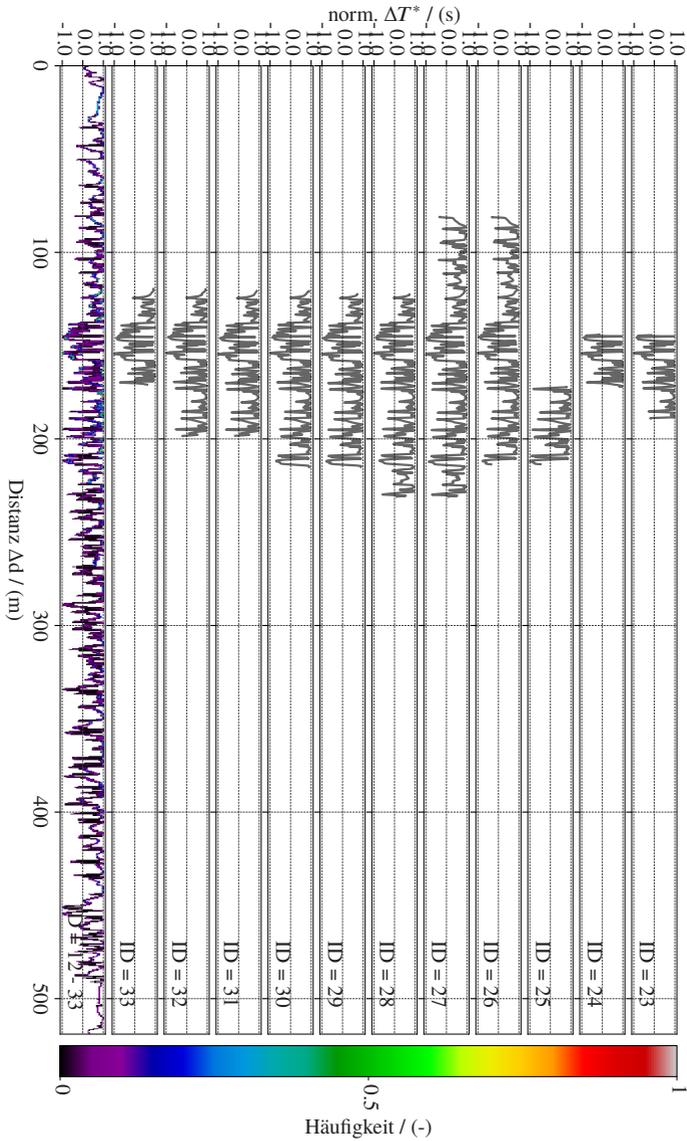


Abbildung B.4: Darstellung der ortsdiskreten ferromagnetischen Inhomogenitäten der Fahrmanöver ID = 23 bis 33 (vgl. Abbildung 3.10) und der Superposition aus ID = 12-33.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Schach, P. Jehle und R. Naumann, *Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbahn: Ein gesamtheitlicher Systemvergleich*. Heidelberg: Springer, 2006.
- [2] I. Vorndran, “Unfallstatistik - Verkehrsmittel im Risikovergleich”, *Wirtschaft und Statistik*, Nr. 12, S. 1083–1088, Dez. 2010.
- [3] E. Schnieder, *Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs*. Heidelberg: Springer, 2007.
- [4] Shift2Rail, *Multi - annual action plan executive view*, https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2018/04/Maap_2018_FINAL_2.pdf, 2018 (letzter Zugriff: 03 Januar, 2019).
- [5] M. S. Durmus, K. Ucak, G. Oke und M. T. Soylemez, “Train speed control in moving-block railway systems: An online adaptive pd controller design”, *Intelligent Components for Vehicles (IFAC)*, Bd. 46, Nr. 25, S. 7–12, 2013.
- [6] D. Lu, D. Spiegel, U. Becker, B. Cai u. a., “Repeatability test method of GNSS for safe train localisation in real and simulated environments”, in *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Apr. 2016, S. 687–692.
- [7] A. Chiappini, *ERTMS/ETCS Performance Requirements for Interoperability*, <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Set-2-Index014-SUBSET-041%20v310.pdf>, 2012 (letzter Zugriff: 19 November, 2018).
- [9] A. Albanese und L. Marradi, “The RUNE project: the integrity performances of GNSS-based railway user navigation equipment”, in *ASME/IEEE Joint Rail Conference (JRC)*, März 2005, S. 211–218.
- [10] J. Otegui, A. Bahillo, I. Lopetegi und L. E. Díez, “A survey of train positioning solutions”, *IEEE Sensors Journal*, Bd. 17, Nr. 20, S. 6788–6797, Okt. 2017.

- [12] O. Heirich, B. Siebler und E. Hedberg, “Study of train-side passive magnetic measurements with applications to train localization”, *Journal of Sensors*, Bd. 2017, (ID 8073982), S. 1–10, Juni 2017.
- [15] J. Wohlfeil, “Vision based rail track and switch recognition for self-localization of trains in a rail network”, in *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Juni 2011, S. 1025–1030.
- [16] T. Engelberg und F. Mesch, “Eddy current sensor system for non-contact speed and distance measurement of rail vehicles”, *Computers in Railways*, *WIT Press*, Bd. 7, S. 1261–1270, Jan. 2000.
- [17] T. Engelberg, “Geschwindigkeitsmessung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren”, Diss., Universität (TH) Karlsruhe. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001.
- [18] D. H. Murillas und L. Poncet, “Safe odometry for high-speed trains”, in *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Aug. 2016, S. 244–248.
- [19] H. Laqua, “Berührungslose Geschwindigkeitsmessung von Straßen- und Schienenfahrzeugen mit Mikrowellensensoren”, Diss., Universität (TH) Karlsruhe. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [20] T. Hackel, D. Stein, I. Maindorfer, M. Lauer u. a., “Track detection in 3D laser scanning data of railway infrastructure”, in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Mai 2015, S. 693–698.
- [21] F. Kaleli und Y. S. Akgul, “Vision-based railroad track extraction using dynamic programming”, in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Okt. 2009, S. 1–6.
- [22] R. Ross, “Track and turnout detection in video-signals using probabilistic spline curves”, in *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Sep. 2012, S. 294–299.
- [23] A. Geistler, “Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren”, Diss., Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2007.
- [25] O. Heirich und B. Siebler, “Train-side passive magnetic measurements”, in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Mai 2015, S. 687–692.

-
- [26] A. Buffi und P. Nepa, “An RFID-based technique for train localization with passive tags”, in *IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Mai 2017, S. 155–160.
- [27] S. S. Saab, “A map matching approach for train positioning. I. Development and analysis”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology (TVT)*, Bd. 49, Nr. 2, S. 467–475, März 2000.
- [28] —, “A map matching approach for train positioning. II. Application and experimentation”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology (TVT)*, Bd. 49, Nr. 2, S. 476–484, März 2000.
- [29] O. Heirich, A. Steingass, A. Lehner und T. Strang, “Velocity and location information from onboard vibration measurements of rail vehicles”, in *IEEE International Conference on Information Fusion (FUSION)*, Juli 2013, S. 1835–1840.
- [30] O. Heirich, P. Robertson und T. Strang, “RailSLAM - Localization of rail vehicles and mapping of geometric railway tracks”, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Mai 2013, S. 5212–5219.
- [31] H. Winter, V. Willert und J. Adamy, “Increasing accuracy in train localization exploiting track-geometry constraints”, in *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Nov. 2018, S. 1572–1579.
- [32] F. Mesch, F. Puente León und T. Engelberg, “Train-based location by detecting rail switches”, *Computers in Railways, WIT Press*, 2000.
- [33] S. Hensel, C. Hasberg und C. Stiller, “Probabilistic rail vehicle localization with eddy current sensors in topological maps”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 12, Nr. 4, S. 1525–1536, Dez. 2011, issn: 1524-9050.
- [34] S. Hensel, “Wirbelstromsensorbasierte Lokalisierung von Schienenfahrzeugen in topologischen Karten”, Diss., Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011.
- [39] P. Löw, R. Pabst und E. Petry, *Funktionale Sicherheit in der Praxis: Anwendung von DIN EN 61508 und ISO/DIS 26262 bei der Entwicklung von Serienprodukten*. dpunkt.verlag, 2011.

- [40] Microelectronics ST, *STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced Arm®-based 32-bit MCUs - Reference manual*, https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf, 2014 (letzter Zugriff: 20 März, 2019).
- [41] D. George, D. Sanchez und T. Jorge, “Porting of MicroPython to LEON Platforms”, *Data Systems in Aerospace (DASIA)*, 2016.
- [42] M. Dümig und H. Wild, “Schneller Testen mit MicroPython”, *Elektronik Fachmedium für industrielle Anwender und Entwickler*, Nr. 07, S. 26–29, Apr. 2018.
- [43] A. Steimel, *Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung: Grundlagen und Praxis*. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2006.
- [44] C. Gerthsen, *Gerthsen Physik*. Heidelberg: Springer, 2013.
- [45] Texas Instruments, *LMx39x, LM2901xx Quad Differential Comparators datasheet (Rev. T)*, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2901.pdf>, 2015 (letzter Zugriff: 20 März, 2019).
- [46] O. Semiconductor, *Configurable Multifunction Gate*, <http://www.amarketplaceofideas.com/wp-content/uploads/2015/05/AND8408-D1.pdf>, 2009 (letzter Zugriff: 20 März, 2019).
- [47] B. Alsberg, A. Woodward und D. Kell, “An introduction to wavelet transforms for chemometricians: A time- frequency approach”, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems (Chemometrics Intell. Lab. Sys.)*, Bd. 37, Nr. 2, S. 215–239, 1997.
- [48] V. J. Barclay, R. F. Bonner und I. P. Hamilton, “Application of wavelet transforms to experimental spectra: Smoothing, denoising, and data set compression”, *Analytical Chemistry (ACS)*, Bd. 69, Nr. 1, S. 78–90, 1997.
- [49] H. Adeli, Z. Zhou und N. Dadmehr, “Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform”, *Journal of Neuroscience Methods*, Bd. 123, Nr. 1, S. 69–87, 2003.
- [50] N. Hazarika, J. Z. Chen und A. Sergejew, “Classification of EEG signals using the wavelet transform”, in *IEEE International Conference on Digital Signal Processing (ICDSP)*, 1997, 89–92 vol.1.

-
- [51] P. Addison, *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Florida: CRC Press, 2017.
- [52] M. V. Wickerhauser, *Adaptive Wavelet-Analysis: Theorie und Software*, Ser. Vieweg-Lehrbuch Mathematik. Braunschweig: Vieweg+Teubner, 1996.
- [53] D. Sundararajan, *Discrete Wavelet Transform: A Signal Processing Approach*. New York: John Wiley & Sons, 2016.
- [54] D. L. Donoho und J. M. Johnstone, “Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage”, *Biometrika*, Bd. 81, Nr. 3, S. 425–455, 1994.
- [55] M. Jansen, *Noise Reduction by Wavelet Thresholding*. New York: Springer, 2012.
- [56] B. Walczak und D. Massart, “Noise suppression and signal compression using the wavelet packet transform”, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Bd. 36, Nr. 2, S. 81–94, 1997.
- [57] P. S. Addison, *The illustrated wavelet transform handbook : Introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*. New York: Taylor & Francis, 2002.
- [58] N. Levanon und E. Mozeson, *Radar Signals*. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [59] K. Briechle und U. Hanebeck, “Template matching using fast normalized cross correlation”, *The International Society for Optical Engineering (SPIE)*, Bd. 4387, März 2001.
- [60] H. Jörg und L. Norbert, “Optische Gitter: Die Abbildung der Realität – 75 Jahre berührungslose dynamische Meßtechnik auf der Basis optischer Gitter”, *Laser Technik Journal (LTJ)*, Bd. 4, Nr. 2, S. 43–47, 2007.
- [61] S. D. Wei und S. H. Lai, “Fast template matching based on normalized cross correlation with adaptive multilevel winner update”, *IEEE Transactions on Image Processing (TIP)*, Bd. 17, Nr. 11, S. 2227–2235, 2008.
- [62] S. K. Jayaweera, *Signal Processing for Cognitive Radios*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [63] V. Matthews, *Bahnbau*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.

- [64] M. Altyntsev, A. Ivanov, O. Schuster, H.-F. Schuster u. a., “Application of Laser Scanning in the REDUS Layout”, *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, Bd. 6, 2016.
- [65] R. Ruetters, B. Schaefer, M. Baier und D. Abel, “Validation of satellite-based railway application systems using the galileo testbed railgate exemplified by automated train formation facilities”, in *IEEE International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST)*, Okt. 2009, S. 337–342.
- [66] M. Pölöskey, O. Ludwig, O. Schuster, M. Baumker u. a., “Galil-eu: An approach for testing geo-informatics in a large field demonstrator”, *International Symposium on Certification of GNSS Systems & Services*, 2014.
- [67] *Leica Viva TS15 Datasheet*, http://ptd.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/Viva%20TS15/brochures-datasheet/Leica%20Viva%20TS15%20Datasheet_en.pdf, Leica Geosystems AG Heerbrugg, Switzerland, 2017 (letzter Zugriff: 20 März, 2019).
- [68] *GPS-703-GGG Datasheet*, <https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/GPS-703-GGG.pdf>, NovAtel Inc. Calgary, Alberta, Canada, 2015 (letzter Zugriff: 20 März, 2019).
- [69] R. Zweigel, M. Hoppe, T. Engelhardt, F.-J. Heßeler u. a., “Galileo-Testzentren GATEs in Deutschland: Fit für Europas zukünftiges Satellitennavigationssystem Galileo”, *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, Bd. 4, S. 223–230, 2016.
- [70] M. Sons, M. Lauer, C. G. Keller und C. Stiller, “Mapping and localization using surround view”, in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Juni 2017, S. 1158–1163.
- [71] K. Gerlach und C. Rahmig, “Multi-hypothesis based map-matching algorithm for precise train positioning”, in *IEEE International Conference on Information Fusion (ICIF)*, Juli 2009, S. 1363–1369.
- [72] M. Eid, M. Gollwitzer und M. Schmitt, *Statistik und Forschungsmethoden - Lehrbuch. Mit Online-Materialien*. Langensalza: Beltz, 2010.
- [73] *Deutsche Bahn Integrierter Bericht 2018 Auf dem Weg zu einer besseren Bahn*, https://ib.deutschebahn.com/ib2018/fileadmin/PDF/IB18_d_web_03.pdf, Deutsche Bahn AG, 2019 (letzter Zugriff: 20 März, 2019).

- [74] Central Intelligence Agency, *The World Factbook; total route length of the railway network*, Central Intelligence Agency, Hrsg., <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2121rank.html>, 2014 (letzter Zugriff: 25 März, 2019).
- [75] C. Ostermann, *Like Lucy train - vom Abstellgleis ins Living Lab*, <https://www.thalesgroup.com/en/germany/news/lucy-train-vom-abstellgleis-ins-living-lab>, 2018 (letzter Zugriff: 20 März, 2019).
- [76] *EN 50159:2010 Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Sicherheitsrelevante Kommunikation in Übertragungssystemen; Deutsche Fassung*, 2011.
- [77] L. Fendrich und W. Fengler, *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin: Springer, 2007.

Veröffentlichungen des Autors

- [8] H. Winter, V. Willert, M. Spindler, J. Adamy u. a., “Localization Reference Train - Sichere Ortung für den Schienenverkehr”, in *Scientific Railway Signalling Symposium (SRSS)*, Juli 2017, S. 17–26.
- [11] D. Stein, M. Spindler und M. Lauer, “Model-based rail detection in mobile laser scanning data”, in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Juni 2016, S. 654–661.
- [13] D. Stein, M. Lauer und M. Spindler, “An analysis of different sensors for turnout detection for train-borne localization systems”, *WIT Transactions on The Built Environment*, Bd. 135, S. 827–838, 2014.
- [14] D. Stein, M. Spindler, J. Kuper und M. Lauer, “Rail detection using lidar sensors”, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Bd. 11, Nr. 1, S. 65–78, 2016.
- [24] H. Manz, E. Schnieder, D. Stein, M. Spindler u. a., “GaLoROI. Satellite based localization in railways”, in *International Congress on Advanced Railway Engineering (IC-ARE)*, März 2015.
- [35] M. Spindler, *Geschwindigkeitsmessverfahren und Geschwindigkeitsmessanordnung*, D. Patent, DE102016105413A1, Aug. 2019.
- [36] M. Spindler und M. Lauer, “High accuracy estimation of velocity and position for railway vehicles using ferromagnetic inhomogeneities”, in *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Nov. 2018, S. 1202–1207.
- [37] M. Spindler, D. Stein und M. Lauer, “Difference-Inductance-Sensor zur berührungslosen Geschwindigkeitsbestimmung von Zügen”, in *XXX. Messtechnisches Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik e.V.*, S. Zimmermann, Hrsg., Berlin: De Gruyter, 2016.
- [38] —, “Low power and low cost sensor for train velocity estimation”, in *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Aug. 2016, S. 259–264.