

# **Sensorkonzept zur direkten Bestimmung von Zustandsgrößen an aktiv gelenkten Fahrwerken für Straßenbahnen**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Franz Jost, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Januar 2020  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller



## Kurzfassung

Mechatronische Fahrwerke mit aktiver Spurführung können Verschleiß und Lärm im Vergleich zu konventionellen Fahrwerken durch Vermeidung des Spurkranzanlaufs reduzieren. Trotz wissenschaftlicher Untersuchungen, die das Potential aufzeigen, wird eine technische Umsetzung selten vorgenommen. Dies liegt unter anderem an unzureichender Verfügbarkeit von geeigneter Messtechnik, insbesondere von Sensoren. Zur Regelung des Spurführungsverhaltens benötigen mechatronische Fahrwerke Kenntnisse über ihren aktuellen Zustand. Am Markt erhältliche Sensoren sind oft ungeeignet, wichtige Zustandsgrößen am Fahrwerk während der Fahrt direkt zu messen. Alternative Ansätze, die interessierenden Größen über Zustandsschätzer ableiten, sind oft unzureichend genau.

In dieser Arbeit wird anhand eines aktiv gelenkten Radpaars ein neues Sensorkonzept zur direkten Bestimmung der Zustandsgrößen Anlaufwinkel und Lateralversatz vorgestellt.

Aus den Anforderungen mechatronischer Fahrwerke wird mittels des V-Modells in drei Makrozyklen ein Sensorkonzept entwickelt und prototypisch aufgebaut. Das Sensorkonzept nutzt dabei die ferromagnetischen Eigenschaften der Schiene. Ein durch den Sensor künstlich erzeugtes Magnetfeld wird durch die Schiene verändert, und Hallsensorelemente messen diese Veränderungen. Aus den Messdaten wird die Lateralposition der Schiene unter dem Sensor über einen Luftspalt von 20 mm mit ausreichender Genauigkeit berechnet.

Der Sensorprototyp wird mittels einer Simulation des aktiv gelenkten Radpaars in verschiedenen Testszenarien validiert. Mit zusätzlichen Hardware-

in-the-loop-Versuchen wird gezeigt, dass das Sensorkonzept für die mechatronische Spurführung eignet ist.

## **Abstract**

Mechatronic track guidance can reduce both wear and noise in comparison to conventional running gears by preventing flange contact between wheel and rail. Despite scientific research, technical implementation is rarely done. One reason is the inavailability of suitable measurement systems and sensors. For active track guidance the current state variables of the vehicle are needed but commercial sensors are often unable to measure these states while driving. Alternatives like state estimation are often inaccurate.

This thesis presents the development and implementation of a new sensor concept to measure angle of attack and lateral displacement.

Based on the requirements of mechatronic track guidance, a new sensor concept is derived and implemented as a prototype. The sensor concept is based on the disturbance by the ferromagnetic rail in an artificially generated magnetic field. To calculate the lateral position of the rail below the sensor, the disturbance is measured by 40 hallsensor elements. The sensor is tested on a test rig with an air gap of 20 mm and shows sufficient accuracy.

The prototype is validated using a simulation of the active steered wheel-set in a hardware-in-the-loop test setup.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Teilinstitut Bahnsystemtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie.

Für die kompetente wissenschaftliche Betreuung und Übernahme des Hauptreferats möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld herzlich bedanken. Der mir für diese Arbeit eingeräumte Freiraum am Institut ist nicht selbstverständlich. Neben der fachlichen Entwicklung kann ich zusätzlich auf eine Zeit der persönlichen Entwicklung zurückschauen. Auch hierfür vielen Dank für das entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller, Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik (KIT), danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferats. Weiterhin möchte ich Prof. Dr. M. J. Hoffmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danken.

Bei Frau Ivana Kramer möchte ich mich für die allzeit kompetente und schnelle Unterstützung bedanken. Ohne sie wäre unser Teilinstitut nicht das, was ich die letzten Jahre kennenlernen durfte. Meinen Kollegen des Erdgeschosses gilt mein Dank für die angenehme Atmosphäre und Unterstützung, den Austausch in allen Fragen sowie der Toleranz meines Musikgeschmacks.

Die technische Umsetzung des Sensors sowie des Prüfstands wäre ohne tatkräftige studentische Mitarbeit nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gilt Florian Krief, Dominik Pflumm, Alexander Stein, Carlos Dos Santos Coutinho sowie Samuel Eichhorn.

Meiner Familie danke ich für den bedingungslosen Rückhalt während der Dissertation. Meinen Eltern möchte ich besonders für die Möglichkeit des

## Danksagung

---

Studiums und der damit verbundenen unvergesslichen Zeit in Karlsruhe danken. Nike Trudel danke ich für ihr Verständnis in der Zeit des Schreibens, das Korrekturlesen meiner Arbeit und vor allem für die tatkräftige Unterstützung vor der Prüfung.

Karlsruhe, im Januar 2020

*Franz Jost*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Aufbau der Arbeit	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Aktive Fahrwerke als mechatronisches System	7
2.2	Messtechnik	9
2.2.1	Multisensordatenfusion	10
2.2.2	Smarte Sensoren	11
2.3	Zustandserfassung für aktive Spurführung	13
2.3.1	Implementierungsstatus	15
2.3.2	Flexx Tronic Drehgestell	24
2.4	Hallsensoren	25
2.5	Entwicklungsmethodik nach VDI 2206	27
2.5.1	Verifikation und Validierung	32
<b>3</b>	<b>Sensorentwicklung</b>	<b>35</b>
3.1	Vorgehensweise	35
3.2	Situationsanalyse	38
3.2.1	Aktiv gelenktes Radpaar	39
3.2.2	Messkonzept	42
3.3	Anforderungen und Problemdefinition	50
3.3.1	Anforderungen	50
3.3.2	Problemdefinition	54
3.4	Makrozyklus I	55

3.4.1	Systementwurf . . . . .	55
3.4.2	Modellbildung Sensorkonzept . . . . .	58
3.4.3	Nachweis Funktionsprinzip Sensorkonzept . . . . .	60
3.5	Makrozyklus II . . . . .	63
3.5.1	Neubewertung der Anforderungen . . . . .	63
3.5.2	Systementwurf Hallsensorarray . . . . .	67
3.5.3	Modellbildung Hallsensorarray . . . . .	70
3.5.4	Funktionsnachweis Hallsensorarray . . . . .	71
3.6	Makrozyklus III . . . . .	77
3.6.1	Neubewertung der Anforderungen . . . . .	77
3.6.2	Systementwurf Prototyp . . . . .	78
3.6.3	Domänenspezifischer Entwurf . . . . .	79
3.6.4	Systemintegration . . . . .	85
3.6.5	Durchgehendes parametrisches Simulationsmodell . . . . .	85
3.6.6	Prüfstand zur Verifikation und Validierung . . . . .	87
3.7	Ergebnisse . . . . .	90
3.7.1	Funktionsüberprüfung . . . . .	90
3.7.2	Messrauschen . . . . .	91
3.7.3	Einfluss Erdmagnetfeld . . . . .	95
3.7.4	Modellverifikation . . . . .	96
3.7.5	Materialkosten Sensor . . . . .	107
<b>4</b>	<b>Algorithmenentwicklung . . . . .</b>	<b>109</b>
4.1	Messdatenaufbereitung . . . . .	110
4.1.1	Kompensation der Erregerspulenform . . . . .	110
4.1.2	Normierung . . . . .	112
4.2	Klassifizierung des Schienenprofils . . . . .	116
4.3	Lateralpositionsbestimmung . . . . .	119
4.3.1	Algorithmen unter Verwendung von $\bar{B}_y$ . . . . .	120
4.3.2	Algorithmen unter Verwendung von $\bar{B}_z$ . . . . .	123
4.3.3	Neuronale Netze . . . . .	125

4.3.4	Vergleich der Algorithmen . . . . .	126
4.4	Messgüteindex . . . . .	131
4.4.1	Ablauf . . . . .	133
4.4.2	Berechnung Einzelmessgüteindex $i_{MG,y}$ . . . . .	135
4.4.3	Berechnung Einzelmessgüteindex $i_{MG,z}$ . . . . .	137
4.5	Störeinflüsse . . . . .	137
<b>5</b>	<b>Validierung . . . . .</b>	<b>141</b>
5.1	Validierung der Zustandsmessung . . . . .	142
5.1.1	Methodik . . . . .	142
5.1.2	Rauschverhalten . . . . .	145
5.1.3	Messabweichungen . . . . .	147
5.2	Validierung des Sensors mittels Fahrscenarien . . . . .	150
5.2.1	Methodik . . . . .	150
5.2.2	Implementierung der Zustandsmessung . . . . .	151
5.2.3	Kennzahlen zur Auswertung . . . . .	154
5.2.4	Auswertung der Fahrscenarien . . . . .	156
5.3	Überprüfung der Ergebnisse mittels Hardware-in-the-loop . . . . .	163
5.3.1	Methodik . . . . .	163
5.3.2	Auswertung ausgewählter Szenarien . . . . .	166
5.4	Bewertung . . . . .	170
5.4.1	Reglerneuauslegung . . . . .	173
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>175</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	175
6.2	Ausblick . . . . .	177
<b>A</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>181</b>
A.1	Störeinflüsse . . . . .	181



# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Formelzeichen

$\alpha$	Anlaufwinkel	rad
$\sigma_e$	Standardabweichung der Messabweichung $e$	
$\psi_L$	Lenkwinkel	rad
$b$	Breite des quadratischen Spulenquerschnitts	m
$\vec{B}$	magnetische Flussdichte	T
$B_{Erde}$	magnetische Flussdichte des Erdmagnetfelds	T
$B_x$	magnetische Flussdichtekomponente in x-Richtung	T
$B_y$	magnetische Flussdichtekomponente in y-Richtung	T
$B_{y,Null}$	Kompensationsvektor in y-Richtung	T
$B_z$	magnetische Flussdichtekomponente in z-Richtung	T
$B_{z,Null}$	Kompensationsvektor in z-Richtung	T
$d$	Drahtdurchmesser Kupferlackdraht	m
$e_{max}$	Maximale betragsmäßige Messabweichung	
$h$	Luftspalt	m
$\vec{H}$	magnetische Feldstärke	A m <sup>-1</sup>
$I_D$	Stromstärke im Kupferlackdraht der Erregerspule	A
$I_S$	Stromstärke der Erregerspule in der Simulation	A
$i_{MG}$	Messgüteindex	[0, 1]

$i_{MG,y}$	Einzelmessgüteindex der y-Komponente	[0, 1]
$i_{MG,z}$	Einzelmessgüteindex der z-Komponente	[0, 1]
$n$	Windungszahl der Erregerspule	
$n_{Sensor}$	Anzahl der Hallelemente auf der Platine	
$R$	Kurvenradius	m
$L$	Einbauabstand der Sensoren im Lenkhebelsystem	m
$s$	Sollwert der Hilfsmessgröße	m
$\hat{s}$	Messwert der Hilfsmessgröße	m
$s_{L1}$	Linker vorderer Sensor des Messkonzepts	
$s_{L2}$	Linker hinterer Sensor des Messkonzepts	
$s_{R1}$	Rechter vorderer Sensor des Messkonzepts	
$s_{R2}$	Rechter hinterer Sensor des Messkonzepts	
$v$	Lateralversatz	m
$v_0$	Geschwindigkeit des Fahrwerks	kmh <sup>-1</sup>
$x_S$	x-Position im Schienenkoordinatensystem	m
$y_S$	y-Position im Schienenkoordinatensystem	m
$z_S$	z-Position im Schienenkoordinatensystem	m

### Kennzahlen

$v_{max}$	Maximaler betragsmäßiger Lateralversatz	m
$v_{rms}$	Quadratischer Mittelwert Lateralversatz	m
$\Delta v$	Messabweichung Lateralversatz	m
$\alpha_{max}$	Maximaler betragsmäßiger Anlaufwinkel	rad
$\alpha_{rms}$	Quadratischer Mittelwert Anlaufwinkel	rad
$\Delta\alpha$	Messabweichung Anlaufwinkel	rad
$F_{A,max}$	Maximale betragsmäßige Aktorkraft	N
$F_{A,rms}$	Quadratischer Mittelwert Aktorkraft	N

### Konstanten

$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante im Vakuum $\approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$	
---------	----------------------------------------------------------------------------------	--

### Abkürzungen und Begriffe

ADC, ADU	Analog-Digital-Converter, Analog-Digital-Umsetzer
AGR	Aktiv gelenktes Radpaar nach Wei
ARS	Active Radial Steering and Stability
BK	Buskoppler
CAN	Controller-Area-Network
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EEF	Einzelrad-Einzel-Fahrwerk
HIL	Hardware-in-the-loop
KNN	Künstliches Neuronales Netz
LSQ	Least-Square, Methode der kleinsten Fehlerquadrate
IC	Integrated Curcuit
NGT	Next Generation Train
NR	normal-verteiltetes Rauschen
RMS	Root Mean Square, Quadratisches Mittel
Ri59N	Rillenschienenprofil
S49	Vignolschienenprofil
Spline	Aus Polynomen zusammengesetzte Ausgleichskurve
$\mu\text{C}$	Microcontroller, Mikroprozessor
USB	Universal Serial Bus
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

### Bezeichnungsgrundsätze

$\hat{x}$	Messwert
$\bar{x}$	Kompensierte, normierte Größe
$x_*$	Platzhalterindex für die Sensorposition





# 1 Einleitung

Mit dem Einzug der Mechatronik in die Bahnsystemtechnik sind die technischen Gestaltungsmöglichkeiten weiter gestiegen. Dieser technische Fortschritt zeigt sich auch bei Straßenbahnen und eröffnet Ingenieuren neue Ansätze zur Ideenfindung und Weiterentwicklung bestehender Lösungen. Bei Straßenbahnen mit ihren besonderen Anforderungen an die Spurführung können mechatronische Fahrwerke Verbesserungen bieten, denn die durch das Stadtbild vorgegebene enge Gleisführung hat zur Folge, dass konventionelle Fahrwerke mit Starrachsätzen an ihre kinematische Begrenzung stoßen. Der schwer vermeidbare Spurkranzschliff in engen Bögen senkt den Fahrkomfort, erzeugt störenden Lärm, und der entstehende Verschleiß hat betreiberseitig hohe Instandhaltungskosten zur Folge. Eine Maßnahme gegen Lärm ist die selektive Spurkranzschmierung, die lediglich die Lautstärke mildert, einen Anlauf aber nicht verhindern kann. Der Einsatz von Losachsätzen bietet ein besseres Kurvenverhalten trotz Spurkranzschliff, besitzt jedoch kein selbst zentrierendes Verhalten im Gleis. Eine aktive Spurführung kann dagegen durch gezieltes Eingreifen in die Querdynamik des Schienenfahrzeugs den Spurkranzschliff verhindern und somit die Lärm- und Verschleißursache wirksam angehen.

Mechatronische Fahrwerkkonzepte in wissenschaftlichen Untersuchungen zeigen grundsätzlich eine Verbesserung des Laufverhaltens. Diese Konzepte werden meist simulativ mittels Mehrkörpermodellen untersucht, und der Fokus liegt auf dem Laufverhalten, dem mechanischem Aufbau sowie der Regelstrategie des Fahrwerks. Die unzureichende experimentelle Umsetzung aktiver Fahrwerke kann unter anderem auf fehlende Möglichkeiten der Messtechnik zurückgeführt werden. Da mechatronische Systeme

zur Zustandserfassung Messgrößen benötigen, muss ebenso ein passendes Messkonzept am Fahrwerk mitentwickelt werden. Heute verfügbare Sensoren im Bahnbereich konzentrieren sich auf die Bestimmung von Betriebsgrößen am Fahrzeug selbst, wie z.B. Drehgeschwindigkeiten der Räder zur Schlupfregelung, oder vermessen die Gleislage zu Instandhaltungszwecken. Wichtige Zustandsgrößen wie die relative Position von Rad und Schiene sind nur schwierig robust zu messen. Besonders die Querverschiebung des Fahrwerks im Gleis, der Lateralversatz, ist für viele Regelstrategien aktiver Fahrwerke eine wichtige Eingangsgröße.

Das Ergebnis der Literaturrecherche hebt die verwendeten Messkonzepte als einen essentiellen Bestandteil der aktiven Spurführung hervor. Eine aktive Spurführung ohne geeignete Messkonzepte zur Erfassung wesentlicher Zustandsgrößen ist nicht oder nur eingeschränkt möglich. Die betrachteten Messkonzepte setzen teilweise Sensoren voraus, die nicht in geeigneter Form verfügbar sind oder nur unter Einschränkungen betrieben werden können. Alternativen wie Zustandsbeobachter können die gewünschten Größen nur schätzen, und die Möglichkeit der direkten Messung wird somit bereits im Konzeptstadium ausgeschlossen. Die Herausforderungen einer direkten Messung und die damit einhergehende Entwicklung eines Sensorkonzepts unter Einsatz eines neuartigen Sensors werden nicht betrachtet. Hier setzt diese Arbeit an und zeigt ein neuartiges Sensorkonzept, das in der Lage ist, den Lateralversatz sowie den Anlaufwinkel der Räder direkt am Fahrwerk zu bestimmen und damit die Basis für eine direkte Zustandsbestimmung an aktiven Fahrwerken legt.

### 1.1 Zielsetzung

Der Erfolg aktiver Fahrwerkskonzepte unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren. Allgemein gibt Abbildung 1.1 einen Überblick über das Spannungsfeld zwischen Markt, Gesellschaft, Funktion und Sicherheit innerhalb dessen ein Sensorkonzept unter Erfüllung vielfältiger Anforderungen zuverlässig

sig arbeiten muss. Der Fahrgast als Nutzer nimmt die Qualität der Fahrt als seinen Reisekomfort wahr, während der Betreiber als Käufer der Fahrzeuge durch Kosten- und Verschleißminimierung Vorteile sieht. Einen weiteren Akteur stellt innerhalb der Gesellschaft die Gesetzgebung dar, welche mit Vorschriften zum Lärmschutz oder barrierefreiem Zugang (Niederflurfahrzeuge) die Ausgestaltung der Fahrzeuge aktiv mit beeinflusst. Die Funktion wird durch die technische Ausgestaltung ermöglicht, soll jedoch die genannten Anforderungen mit erfüllen und unterliegt aber zusätzlich ihren eigenen Einschränkungen der Machbarkeit. Dies sind Bauraumproblematiken, die Sensortechnik selbst und die Anbindung der Sensoren am Fahrwerk.

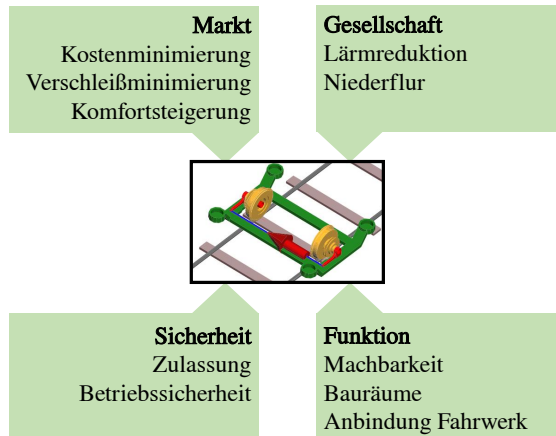


Bild 1.1: Einflussfaktoren auf Straßenbahnen mit mechatronischen Fahrwerken. Bild des Fahrwerks aus [54].

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein geeignetes Sensorkonzept für das Spurführungskonzept *aktiv gelenktes Radpaar* nach Wei [54] (Abschnitt 3.2.1) zu entwickeln und prototypisch aufzubauen. Grundvoraussetzung der Realisierung ist eine direkte Messung der Größen Lateralversatz und Anlaufwinkel am Fahrwerk, die nach aktuellem Stand der Technik schwer umzusetzen ist, jedoch die Möglichkeit bessere Regelgüten zu erreichen bietet. Das Sen-

sorkonzept soll berührungslos arbeiten und keine infrastrukturellen Veränderungen mit sich ziehen. Die Messgrößen sollen dabei robust, idealerweise mit großem Luftspalt zwischen Sensor und Schiene, und unter der Berücksichtigung von ungewollten Luftspaltänderungen sicher gemessen werden. Ein gleichzeitig mit zu bestimmendes Gütekriterium gibt über die Zuverlässigkeit sowie Qualität der Messung Auskunft und ermöglicht im Fehlerfall ein sicheres Fahrverhalten in einem Fail-Operational-Modus. Die verschiedenen Schienenprofile im Fahrweg, welche innerstädtisch zwischen Vignol- und Rillenschiene wechseln können, sollen keinen Einfluss auf die Messung haben. Abschließend sollen wesentliche Kennwerte des Sensorkonzepts erfasst und das Gesamtsystem bestehend aus Fahrwerk, Sensorkonzept und Teststrecken anhand realer Szenarien validiert werden. Damit soll das Potential des Konzepts nachgewiesen und gezeigt und die Erfüllung der Regleranforderungen an die Sensorik gezeigt werden.

### 1.2 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung mit Zielsetzung werden in Kapitel 2 aktive Fahrwerke abstrakt systemtechnisch beschrieben. Anschließend wird kurz auf die Messtechnik allgemein eingegangen und die Zustandserfassung von Messgrößen an aktiven Fahrwerken diskutiert. Der Fokus wird dabei auf den Einsatz von Sensoren an aktiven Fahrwerken gelegt. Alternativen zur direkten Erfassung von Zustandsgrößen wie Lateralversatz und Anlaufwinkel mit Methoden der Zustandsschätzung werden ebenfalls vorgestellt. Zur systematischen Lösungsfindung wird die VDI 2206 als Entwicklungsmethodik mit Methoden zur Verifikation und Validierung zusammengefasst, wobei moderne Validierungsverfahren wie Hardware-in-the-loop vorgestellt werden.

In Kapitel 3 wird zunächst als Fahrwerk das *aktiv gelenkte Radpaar* nach Wei vorgestellt und in seiner Systemumgebung eingeordnet. Die Funktionsweise als mechatronisches System wird erläutert, und äußere sowie

innere Einflüsse und Anforderungen werden zusammengestellt. Als Entwicklungsmethodik wird das V-Modell nach VDI 2206 verwendet, welches dreimal im Makrozyklus durchlaufen wird. Innerhalb der Makrozyklen findet die Lösungskonkretisierung durch passende Mikrozyklen in den Bereichen der Elektronik, Softwareentwicklung und Mechanik statt. Eine kontinuierliche Modellbildung und Simulation der Sensorlösung begleitet als Auslegungs- und Nachweiswerkzeug den gesamten Prozess durchgängig. Die abgeschlossene iterative Konkretisierung liefert als Ergebnis einen Prototyp des Sensors.

Auf Basis der Rohsensordaten wird in Kapitel 4 die Berechnung der Position des Sensors relativ zur Schiene vorgestellt. Dabei werden verschiedene Ansätze untersucht und bzgl. ihrer Genauigkeit verglichen. Das ebenfalls aus diesen Daten berechnete zusätzliche Gütekriterium gibt über die Messqualität Auskunft. Zusätzlich wird der Schientyp, Rillenschiene oder Vignolschiene, über ein Klassifikationsverfahren ermittelt. Weiterführend werden systembedingte Einflüsse wie Weichen oder Kreuzungen sowie Störgrößen durch Objekte im Fahrweg diskutiert.

In Kapitel 5 wird die Validierung des entwickelten Sensorprototyps mittels Co-Simulation durchgeführt. Der Sensor wird in den Regelkreis der aktiven Spurführung integriert und das Fahrverhalten des aktiv gelenkten Radpaars ausgewertet. Aus dem Fahrverhalten kann auf die Anwendungseignung des Sensors zur Zustandsbestimmung in aktiven Fahrwerken geschlossen werden.



## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst aktive Fahrwerkskonzepte lösungsneutral als mechatronische Systeme beschrieben (Abschnitt 2.1). Anschließend werden in Abschnitt 2.2 die Messtechnik als wichtiger Bestandteil der Zustandserfassung eingeführt und Begriffe der Sensortechnik erläutert. In Abschnitt 2.3 werden Messkonzepte und die dort verwendeten Sensoren zusammengefasst. Hierbei wird auch die Möglichkeit der indirekten Messung über Zustandsbeobachter und Schätzverfahren beschrieben. Abschnitt 2.4 erklärt grundlegend den Halleffekt und stellt technische Umsetzungen von Hallsensorelementen und integrierten Hallsensoren vor. Abschließend wird in Abschnitt 2.5 die VDI 2206 als unterstützende Entwicklungsmethodik zusammengefasst. Der Fokus liegt dabei auf den Elementen Makrozyklus, Mikrozyklus sowie Verifikation und Validierung. Mit dem X-in-the-Loop-Ansatz wird ein Verfahren zur Validierung von Teilsystemen unter Zuhilfenahme von Simulationen vorgestellt.

### 2.1 Aktive Fahrwerke als mechatronisches System

Die Verbesserung der Eigenschaften von Fahrwerken wird systematisch und intensiv in der Wissenschaft untersucht sowie in Produktlösungen der Industrie bereits umgesetzt. Klassische Fahrwerke und Drehgestelle mit Starrachsätzen besitzen bei mäßiger Geschwindigkeit und großen Bogenradien gute Laufeigenschaften. In engen Kurven oder bei höheren Geschwindigkeiten treten allerdings erhöhter Verschleiß und verminderte Laufstabilität auf [42]. Alternative Fahrwerkkonzepte wie Einzelradeinzelfahrwerke sind prinzipiell in der Lage dem zu begegnen, benötigen aber oft eine Regelung zur Er-

reichung einer geeigneten Laufstabilität [25]. Mechatronische Eingriffe in das Laufverhalten von Schienenfahrzeugen lassen sich grundsätzlich in die Bereiche der aktiven Spurführung, der Verbesserung der Kurvengängigkeit und Stabilität einordnen. Regelstrategien aktiver Fahrwerke verfolgen mindestens eines dieser Ziele. [54]

Verwandte Themenfelder sind aktive Federungen in Primär- und Sekundärstufe, die der Steigerung des Fahrkomforts dienen und Belastungen auf den Oberbau reduzieren [10].

Zum besseren Verständnis technischer Systeme lassen sich diese durch die Systemtechnik in einer allgemeinen, lösungsneutralen Form darstellen [11]. Für den Fall eines mechatronischen Systems schlägt die VDI 2206 die Unterteilung in zunächst vier Teilsysteme vor [2]: *Grundsystem*, *Zustandserfassung*, *Informationsverarbeitung* und *Aktoren*. Abbildung 2.1 zeigt ein aktives Fahrwerk in der Systemdarstellung wobei Energie- und Informationsflüsse farblich hervorgehoben sind. Das Grundsystem bildet die elek-

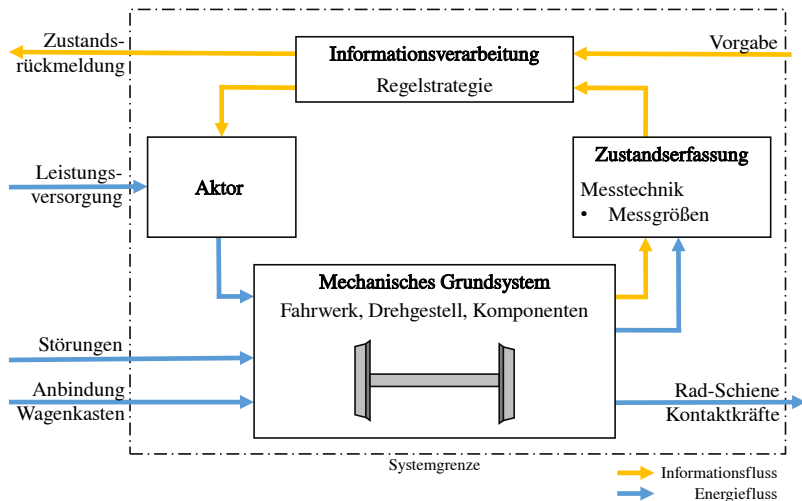


Bild 2.1: Aktive Fahrwerke als mechatronisches System, nach [2]



tromechanische Grundstruktur und wird durch Drehgestell, Fahrwerk und deren Komponenten gebildet. Das Grundsystem wird durch eine Verbindung an den Wagenkasten, meist über die Sekundärfederung, angebunden. Im Fahrwerk verbaute Sensoren liefern Informationen über den aktuellen Zustand des Fahrwerks und leiten diese weiter. Die Informationsverarbeitung wird meist als Mikroprozessor ausgeführt und berechnet auf Basis der Sensordaten die notwendigen Stelleingriffe. Die rückwirkende Beeinflussung auf das Grundsystem wird durch Aktoren abgebildet, sodass das gewünschte Laufverhalten eingestellt werden kann. [54]

Im Weiteren wird der Fokus auf die Messtechnik (Abschnitt 2.2) und Zustandserfassung (Abschnitt 2.3) gelegt, da diese für jedes aktive Fahrwerk benötigt werden. Unterschiede mechanischer Ausgestaltungen der Fahrwerke und Aktoren sind explizit nicht Teil dieser Arbeit. Eine zusammenfassende Betrachtung aktiver Fahrwerkkonzepte findet sich in [18] und [54]. Als Aktor schlägt Wei einen elektro-hydraulischen Aktor vor, dessen Dynamik für die Reglerauslegung bekannt ist [54].

## 2.2 Messtechnik

Die Erfassung von Messgrößen als Eingangsgrößen der Regelung wird durch die Messtechnik beschrieben. Darunter wird neben dem Erfassen ebenfalls das anschließende Verarbeiten physikalischer Größen verstanden, um am Ende der Messkette die Messgröße zu erhalten [50]. Zu Beginn der Messkette steht das Messprinzip [45], welches als Sensorelement neben physikalischen Größen auch chemische oder biologische Messgrößen in ein elektrisches Strom- oder Spannungssignal überführt [51]. Dabei besteht zwischen der Messgröße und dem elektrischen Signal ein bekannter Zusammenhang. Das elektrische Signal wird anschließend verarbeitet, analog verstärkt und normiert [51]. Ist die Messkette bis zu diesem Punkt direkt in der Sensorkomponente vereint, so spricht man auch von einem *integrierten* Sensor [51]. Wird mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers (ADU, ADC)

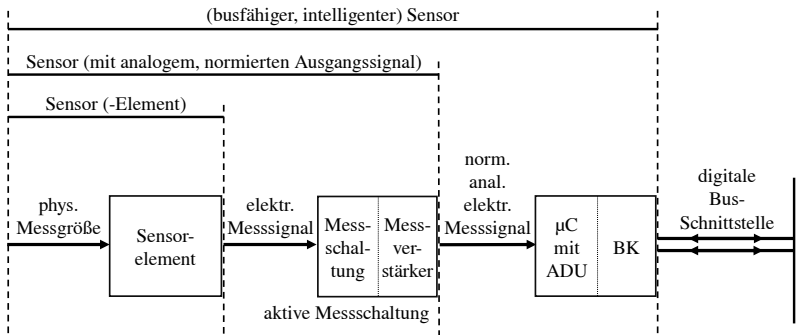


Bild 2.2: Abgrenzungen zum Sensorbegriff. Bild nach [51]

das Signal quantisiert und als digitaler Wert einem Mikroprozessor ( $\mu\text{C}$ ) zugeführt, welcher die digitale Messgröße mittels eines Buskopplers (BK) auf einem Bus ausgibt, so wird dies als „busfähiger, intelligenter“ [51] Sensor bezeichnet. Heutzutage geschieht die Digitalisierung oft direkt an der Messstelle, sodass äußere Störeinflüsse auf den Analogteil des Sensors gering gehalten werden können. Die Übertragung durch ein digitales Bussystem hat zudem den Vorteil, Werte auch über weite Strecken unverfälscht übertragen zu können. Durch die heutige verfügbare Rechenleistung mit kleinem Bauraum kann zudem auch eine performante digitale Signalaufbereitung im Sensor erfolgen.

### 2.2.1 Multisensordatenfusion

Multisensordatenfusion beschreibt eine Vorgehensweise zur Verbesserung der Qualität von Messungen durch den Einsatz mehrerer Sensordatenquellen. Dabei stützt sich die Bestimmung der Messgröße auf zusätzliche Informationen weiterer Sensoren. Eingesetzt wird die Sensordatenfusion oft dort, wo komplementäre Signale vorliegen. Beispiele sind Navigationssysteme autonomer Fahrzeuge oder auch Anwendungen im Bereich der Robotik [6]. Die Sensordatenfusion kann auch zur Zustandsschätzung herangezogen

werden. Ein prominenter Vertreter ist dabei das Kalman-Filter. Das Filter benutzt ein Prädiktionsmodell zur Vorhersage des nächsten Wertes und korrigiert diese dann mit rauschbehafteten Beobachtungen von Sensoren. Das Ergebnis besitzt dabei dann ein reduziertes Rauschen und damit eine höhere Qualität (Abschnitt 2.3.1). Es können dabei zwei Arten der Fusion unterschieden werden. Die zentralisierte Fusion, bei der alle Daten an eine zentrale Stelle weitergeleitet werden und dort fusioniert werden. Dies ist jedoch nur bedingt skalierbar und setzt bei vielen Sensoren eine hohe Bandbreite der Datenübertragung voraus. Als Alternative können Informationen bereits dezentral fusioniert werden, um nur noch einen bereits reduzierten Datensatz übertragen zu müssen. [6]

Die Tiefe der Fusion spiegelt sich über den Grad der Abstraktion wider. In der Literatur werden vier Level, die aufsteigend jeweils eine höhere Abstraktion der Daten bieten, beschrieben. Level 0 beschreibt die reine Vorverarbeitung der Sensordaten durch einfache Filter. In Level 1 kann dann bereits eine Klassifikation der Daten und eine Zustandsschätzung erfolgen. In den weiteren Leveln folgen die Situationsbeurteilung (Level 2) und abschließend die Lagebewertung (Level 3). Jeder Fusionsschritt ist mit einer Informationsreduktion verbunden. Damit ist die Rückgewinnung der originalen Sensorrohdaten aus den fusionierten Daten ausgeschlossen. [51]

### **2.2.2 Smarte Sensoren**

Neben der eigentlichen Bereitstellung des Messsignals können *Smarte Sensoren* durch die gestiegene Rechenleistung auf dem Sensor selbst auch weiterführende Aufgaben erledigen, beziehungsweise übergeordnete Systeme mit zusätzlichen Informationen versorgen. Als Vorstufe dazu kann die Temperaturkompensation angesehen werden, die in der aktuellen Sensorgeneration oft Standard ist. Denn wird die Temperatur durch den Sensor ebenfalls gemessen, so kann durch den bekannten Zusammenhang zwischen Messgröße und Temperaturdrift eine Kompensation durchgeführt werden, be-

vor das Messsignal den Sensor verlässt. Ebenfalls Vorläufer Smarter Sensoren sind aktuell Inertialsensorsysteme, die sich durch eine Datenfusion verschiedener Quellen (Beschleunigungs- und Drehratensensoren sowie Magnetfeldsensoren) mit der aufwändigen Berechnung direkt im Sensorsystem auszeichnen und dem Endnutzer bereits aufbereitete Daten von hoher Qualität zur Verfügung stellen. [9]

Ein Anwendungsbeispiel findet sich in der Objekterkennung der Automobilindustrie für Assistenzsysteme. Auf Radarsensoren wird die Punktwolke mit Tiefeninformation direkt ausgewertet und Objekte mit deren Eigenschaften erkannt. Die Objektinformationen werden über die digitale Busschnittstelle (CAN-Bus oder FlexRay) an die übergeordneten Steuersysteme ausgegeben. Die Übertragung des gesamten Datenstroms der Punktwolke findet nicht statt und senkt die verwendete Datenrate erheblich. [40]

### **Definition Smarter Sensor**

Die Intelligenz und Komplexität bestehender Sensoren wird stets erweitert und erhöht, und für diese Generation neuer Sensoren ist es schwierig, einen einheitlichen Begriff festzuhalten, der die Eigenschaften zuverlässig beschreibt. Aus der Literatur lässt sich kein allgemein gültiger Begriff des *Smarten Sensors* bestimmen und wird daher für diese Arbeit im Folgenden abgeleitet.

Ein *Smarter Sensor* verknüpft mehrere integrierte oder intelligente Sensorelemente zu einer gesamthaften Sensoreinheit (Abbildung 2.3). Diese Einheit besitzt eine Intelligenz zur Datenverarbeitung, welche aus den Sensorrohdaten die gewünschte Messgröße durch Algorithmen sowie Zusatzgrößen ableitet. Der Unterschied zu klassischen Sensoren ist, dass die Messgröße zu keiner Zeit von den einzelnen Sensorelementen allein bestimmt werden kann. Dies unterscheidet einen Smarten Sensor von einer reinen Sensordatenfusion, die lediglich die Unsicherheit einer Messgröße reduziert oder redundante Informationen fusioniert.

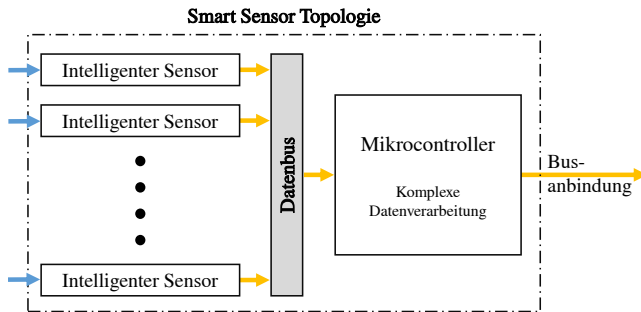


Bild 2.3: Smart Sensor Topologie

Abschließend werden die Signale durch eine digitale Schnittstelle ausgegeben und bedürfen keiner weiteren Verarbeitung in daran angeschlossenen Systemen mehr. Zusätzlich können weitere Größen, wie aktuelle Messgenauigkeit oder Sensorzustände, berechnet und mit ausgegeben werden, und der Smarte Sensor entwickelt sich zu einem integralen Bestandteil der Gesamtintelligenz.

## 2.3 Zustandserfassung für aktive Spurführung

Eine genaue Beeinflussung des Grundsystems kann nur durch ausreichende Kenntnis des Systemzustands erfolgen, welcher kontinuierlich erfasst werden muss. Wird als Regelziel eine aktive Spurführung verfolgt, so eignen sich in der Domäne der aktiven Fahrwerke die Rad-Schiene-Stellung sowie die Zustandsgrößen des Fahrwerks als mögliche Regelgrößen [10] [24]. Die Rad-Schiene-Stellung beschreibt hierbei den Lateralversatz, den Anlaufwinkel und die Berührungslage im Kontaktbereich mit eventuellem Spurkranz anlauf [24]. Als primäre Regelgröße wird oft der Lateralversatz verwendet, da ein kleiner Lateralversatz den Spurkranz anlauf effektiv verhindern kann [27]. Der Anlaufwinkel, die Berührungslage und eine Spurkranz anlaufdetektion eignen sich nach Kraft [24] prinzipiell auch als Re-

gelgrößen. Unter Fahrwerkszustände fallen unter anderem der Drehwinkel und die Drehgeschwindigkeit um die Hochachse des Fahrwerks sowie Beschleunigungen und Relativgeschwindigkeiten von Fahrwerkskomponenten untereinander (vgl. [10] [17] [27] [31] [37]).

Die beschriebenen Größen sind oft auch Zustandsgrößen des Fahrwerks, und deren Bestimmung wird fahrwerkspezifisch durch geeignete Messkonzepte umgesetzt. Ein Messkonzept beschreibt dabei die technische Umsetzung zur Bestimmung mindestens einer Messgröße durch mindestens ein Sensor(-element), wobei Konzepte auch aus mehreren eingesetzten Sensoren bestehen können, die gemeinsam eine Messgröße ableiten. Eine Zusammenfassung der Fahrwerkskonzepte sowie die dabei eingesetzten Messkonzepte und Sensoren findet sich in [10].

Die technische Umsetzung passender Messkonzepte für die untersuchten Fahrwerkskonzepte wird in der betrachteten Literatur nicht ausreichend dargestellt. Neuartige Konzepte werden überwiegend simulativ untersucht, wobei die Messgrößen direkt aus Daten einer Mehrkörpersimulation abgeleitet werden und damit keine technische Umsetzung in ihrer Funktion abbilden. Werden Konzepte an Prototypen umgesetzt, so kommen am Markt verfügbare Sensoren zum Einsatz, und auf die Entwicklung neuer Sensoren wird verzichtet. [10] [19] [21] [30] [38] [41] [53] [54]

Grundsätzlich lassen sich die verwendeten Messkonzepte in zwei Kategorien unterscheiden: die direkte Messung der gewünschten Größe am System selbst und die indirekte Messung. Bei letzterem wird die Messgröße aus anderen, leichter zu bestimmenden Sensorinformationen durch einen (modellbasierten) Beobachteransatz geschätzt. Dieses Verfahren wird dann verwendet, wenn die direkte Messung nicht möglich oder nur mit großem Aufwand verbunden ist. [10]

Geeignete, robuste Sensoren für neue Fahrwerkskonzepte zu entwickeln, ist eine Hauptherausforderung, da die fehlende Verfügbarkeit von Sensoren in der Vergangenheit die technische Umsetzung von Messkonzepten verhinderte. Die direkte Messung unter den erweiterten Randbedingungen des

Bahnverkehrs wird insgesamt als schwierig eingeschätzt. [25] [27]  
Gerade bei der Messung des Lateralversatzes ist eine hohe Abtastrate erforderlich, um neben den niederfrequenten Anteil durch die Fahrzeugbewegung auch die hochfrequenten Gleislagefehler sicher messen zu können [25]. Weiterhin führt Kraft [24] allgemein Kosten- und Sicherheitsgründe an, die gegen die Realisierung von aktiven Fahrwerken sprechen.

### 2.3.1 Implementierungsstatus

Im Folgenden werden ausgewählte Messkonzepte vorgestellt und die verwendeten Sensoren beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf der Messung der Rad-Schiene-Stellung, da sich diese für die mechatronische Spurführung gut eignet und oft bei der Regelauslegung Anwendung findet [10] [24]. Abschließend werden alternative Ansätze, wie der Beobachteransatz, erläutert.

Allgemein kann am Fahrzeug an den Komponenten Radsatz, Drehgestell und Wagenkasten gemessen werden, und weitere Größen gegenüber der Systemumwelt lassen sich über die Position im Gleis ableiten. Eine Zusammenfassung findet sich in [10]. Der Lateralversatz eignet sich gut zur Umsetzung einer aktiven Spurführung und wird als direkte Messung in [26] [38] [53] [54] und als Schätzung in [19] [27] [29] diskutiert. Dessen Bestimmung ist daher auch der Hauptfokus dieser Arbeit.

### Messkonzepte

In den nächsten Abschnitten werden Messkonzepte anhand der verwendeten Sensoren zusammengefasst. Nicht alle physikalisch und technisch mögliche Sensoren werden betrachtet. Kapazitive Sensoren haben sich als unzureichend für den Bahnbereich erwiesen und bieten gegenüber anderen Sensoren keinen Vorteil [24]. Binäre Sensoren können zwar einen Spurkranzauflauf detektieren, jedoch erst dann, wenn dieser bereits eingetreten ist [24]. Zur Regelung sind diese daher nicht geeignet. Nicht näher betrachtet werden

Magnetfeldsensoren, da sie primär zur Messung von Magnetfeldern eingesetzt werden. Sensoren, die nach diesem Prinzip die Schienenposition messen können, sind nicht bekannt. Vielmehr kann ein Magnetfeldsensor nach [4] in Kombination mit anderen Elementen ein Messkonzept darstellen.

**Induktive Sensoren** Eine Möglichkeit die Rad-Schiene-Stellung direkt zu messen wurde bereits 1992 vorgestellt [4]. Ein eigens entwickelter Wirbelstromsensor wird dabei ca. 30 mm über der Schiene am Drehgestell befestigt. Die Primärspule prägt mit einem sinusförmigen Strom ein Feld mit 250 kHz auf die Schiene auf, und die Dämpfung durch Wirbelstromverluste wird mit Empfängerspulen gemessen (siehe Abbildung 2.4). Das Differenzspulenpaar ist dabei in Lateralrichtung versetzt angeordnet, um die Querposition der Schiene aus dem Differenzsignal der Spulen abzuleiten. Die Sensorkennlinie wird mit dem Signal der Summenspule linearisiert und ist damit größtenteils luftspaltunabhängig. Zur magnetischen Flussführung werden Ferritkerne in den Spulen verwendet und durch eine Aluminiumummantelung eingehaust. Als Einsatzgebiet wird die Messung der Spurweite

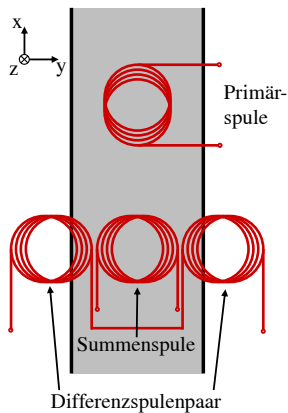


Bild 2.4: Wirbelstromsenaufbau nach [4] in Draufsicht (ohne Ferrit und Aluminiumummantelung)



vorgeschlagen und auf einer realen Strecke mit einem mechanischen Taster getestet. Die Vergleichsmessungen der Strecke ergeben eine gute Übereinstimmung zwischen Wirbelstromsensor und Referenzaster. Weiterhin wird der Einsatz an einem aktiv gelenkten Fahrwerk auf einem Rollenprüfstand vorgestellt. Das aktive Fahrwerk zeigt bei der Durchfahrt einer 19 m Kurve eine geringe Belastung der Strecke, und die Autoren ermuntern zu weiteren Einsatzmöglichkeiten. [4]

Ein weiteres Sensorkonzept nutzt zwei handelsübliche, induktive Näherungssensoren nach dem Wirbelstromprinzip (siehe Abbildung 2.5). Ein

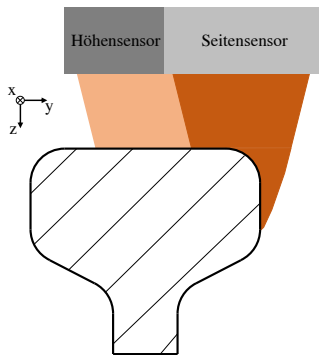


Bild 2.5: Wirbelstromsensorenanordnung nach [24]

Sensor misst stets den Abstand zur Schiene und wird daher über der Profilfläche der Schiene positioniert (Höhensensor). Ein dazu leicht lateral versetzt angeordneter, weiterer Sensor (Seitensensor) wird oberhalb Schienenprofilkante positioniert. Je nach Fahrwerksstellung im Gleis wird der aktive Bereich mehr oder weniger durch die Schiene überstrichen. Die partielle Verdeckung durch die Schiene gibt der Sensor als Abstandsänderung zurück. Die Kombination der beiden Messsignale führt dann zur Querposition der Schiene in Relation zur Sensoraufhängung am Drehgestell. Durch den Abstandssensor können Luftspaltänderungen kompensiert werden. [24]

**Kraft-Momenten-Sensoren** Die Berührungslage im Rad-Schiene-Kontakt kann ebenfalls zur Lateralversatzbestimmung herangezogen werden. Sind die Berührungslagen beider Räder einer Achse bekannt, so kann über die Spurweite der Lateralversatz berechnet werden. Die Berührungslage kann über die Kraft- und Momentenverteilung an der Radachse berechnet werden. Hierzu wird ein Kraft-Momenten-Sensor zwischen Achse und Rad eingesetzt, der dort die Kräfte und das Momente erfasst (siehe Abbildung 2.6). Verschiebt sich die Achse im Gleis, so verändert sich die Last-

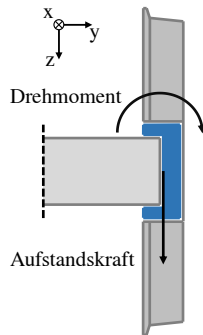


Bild 2.6: Kraft-Momenten-Sensor (blau) im Rad

verteilung der Achse. Die Belastungsverschiebung wird zur Berechnung der Berührungslage verwendet. Durch eine zusätzliche Drehzahlmessung der Räder kann die Genauigkeit verbessert werden. [24] [25]

Probleme können sich jedoch aus der Profilgeometrie, wenn diese nicht genau bekannt ist, ergeben, da über die äquivalente Konizität der Berührungspunkt bestimmt wird. Gerade durch unbekanntem Verschleiß am Rad kann die Messgenauigkeit beeinträchtigt werden. [25]

Der oben genannte Ansatz wird experimentell durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) untersucht. Ein Forschungsprojekt des DLR entwickelt gemeinschaftlich den *Next Generation Train* (NGT) als Vision eines modernen Hochgeschwindigkeitszuges. Ein Teilgebiet ist die ak-

tive Spurführung der teilweise als Einzelradeinzelfahrwerke ausgeführten Mittelwagen. Dort kommen integrierte Antriebseinheiten zum Einsatz, die Brems- und Traktionskräfte aufbringen. Durch diese Ausführung ist es jedoch nötig, die Fahrwerke aktiv gleismittig zu halten. Zur Auslegung und Validierung des Fahrwerks wurde ein 1:5 Prototyp aufgebaut und auf einem Rollenprüfstand untersucht. Im Prototypen sind Kraft-Momenten-Sensoren verbaut, womit indirekt der Lateralversatz berechnet wird. Entsteht ein Lateralversatz, so zentriert ein additives Differenzmoment in den Einzelradantrieben das Fahrwerk durch die daraus resultierende Gierbewegung. Weiterhin soll dieser Modellaufbau mit Prüfstand auch zur Untersuchung anderer Sensorkonzepte, wie beispielsweise optischer Sensoren, dienen. [25]

**Optische Sensoren** Der 1:5 Prüfstand des NGT ist zusätzlich mit Laserdistanzsensoren ausgestattet, und die Querverschiebung der Achsen kann auch direkt gemessen werden. Hiermit können Regelstrategien basierend auf dem Drehwinkel und des Lateralversatzes auf ihre Einsatzfähigkeit getestet und auch die Messwerte der Kraft-Momenten-Sensorik bezüglich der Messgenauigkeit hin überprüft werden. [43]

In einem japanischen Projekt zur Evaluierung von Entgleisungsdynamik kommen ebenfalls Laserdistanzsensoren zum Einsatz. Da der Anlaufwinkel in engen Kurven ausschlaggebend für die Sicherheitsbetrachtung ist, wird dieser durch einen eigens entwickelten Messaufbau während der Fahrt aufgezeichnet. Laserdistanzsensoren im vorderen und hinteren Radschatten messen den Abstand zum Schienenkopf, und die Auswertungslogik berechnet daraus den Anlaufwinkel. Da Lasermessungen stark von den verwendeten Materialien und deren Reflexionseigenschaften abhängig sind, wird zusätzlich eine Kamera verbaut. Mit dieser Kamera wird kontinuierlich überprüft, ob die Lasersensoren sicher arbeiten, oder ob durch Weichen und Pflanzenwuchs die Messung gestört ist. Das Projekt geht nicht auf eine Nutzung für aktive Spurführung ein, zeigt jedoch, welche Herausforderungen bei der Nutzung von optischen Sensoren bestehen. [22]

Auch Kraft [24] untersucht Lasertriangulationssensoren auf die Tauglichkeit zur aktiven Spurführung. Im Fokus stehen dabei zunächst Verfahren zur optischen Spurweitenmessung, wobei die Schiene durch einen Laserstrahl horizontal bzw. schräg von oben beleuchtet wird. Probleme ergeben sich dabei in Rillenschienen durch Abreißgefahr des Sensors bei horizontaler Abtastung und durch nachgewiesene Messfehler bei verschmutzten Schienen. Ein Laserschnittverfahren wird ebenfalls diskutiert.

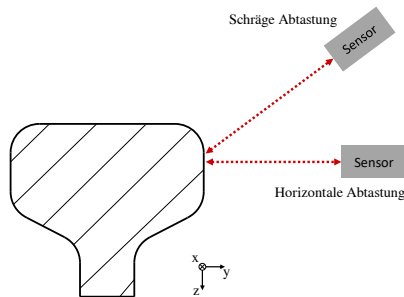


Bild 2.7: Schräge und horizontale Abtastung mit optischen Abstandssensoren

Fremdlicht, wie eine tiefstehende Sonne, kann das Messsystem beeinträchtigen. Allgemein zieht die Verwendung optischer Sensoren einen größeren Aufwand nach sich, da Maßnahmen gegen Beschlagen der Optik (Reinigung der Linsen) und gegen Schmutz (Sperrluft) ergriffen werden müssen. Zusätzlich dazu wird auf die hohen Anschaffungskosten hingewiesen, die sich für bahntaugliche optische Lasersensoren ergeben. Prinzipiell ist diese Sensorik aber für die Messung des Lateralversatzes geeignet. [24]

Auch Powell [38] schlägt die Nutzung von Lasersensoren vor, da diese zur Hochgeschwindigkeitsmessung von Gleislagen bereits eingesetzt werden. Die technische Umsetzung wird dabei nicht direkt betrachtet, jedoch wird der Einbauort diskutiert. Wird das Messsystem vor der Primärfederung angebracht, so muss es für die rauen Bedingungen dort ausgelegt sein. Eine Befestigung am Drehgestell selbst hat jedoch zur Folge, dass die Verschie-

bungen aus der Federstufe mit gemessen werden. Abschließend wird noch auf die Möglichkeit verwiesen, den Zustand des Fahrwerks vollumfänglich zu schätzen (Kalman-Filter), um so einen Messaufbau mit direkter Messung zu vermeiden. [38]

Als Basis für seine Reglerauslegung diskutiert auch Wei [54] verschiedene Ansätze zur Lateralversatz- und Anlaufwinkelbestimmung. Als praktikabel sieht er Laserdistanzsensoren an und untersucht einen Laserdistanzsensor auf einem Schienenprüfstand. Dabei charakterisiert Wei den Sensor bezüglich Rauschverhalten und Genauigkeit, welches für die Auslegung des Regelkreises von großer Bedeutung ist, da solche Störungen direkt modelliert werden können. Durch Abstandssensoren vor und hinter dem Rad bestimmt er den Anlaufwinkel und mit Abstandssensoren am Fahrwerk den Lateralversatz. Der genaue Aufbau des Messkonzepts wird in Unterabschnitt 3.2.2 beschrieben.

**Drehzahlmessung** Perez [35] beschreibt ein indirektes Verfahren, welches von Wei [54] aufgegriffen wird. Sind die Drehgeschwindigkeiten der Räder, die genaue Geometrie der Profile von Rad und Schiene (äquivalente Konizität) sowie die aktuelle Kurvenkrümmung bekannt, so kann über die geometrisch und kinematisch vorgegebene Beziehung der Räder der aktuell herrschende Lateralversatz berechnet werden. Die Kurvenkrümmung muss dabei allerdings extern vorgegeben werden. Bei Neigezügen wird durch eine Positionsbestimmung des Zuges mit dem Wissen über den Streckenverlauf dies bereits eingesetzt. Alternativ kann auch diese Größe geschätzt werden. [38]

Dieses Verfahren ist von Zustandsschätzern abzugrenzen, da die Berechnung der Zustandsgrößen durch eine einfache mathematische Beziehung zwischen den Eingangsgrößen erfolgt. Eine Modellierung der Systemdynamik ist nicht erforderlich.

### Zustandsschätzer

Eine weitere Möglichkeit, Systemzustände indirekt zu bestimmen, stellen sogenannte Zustandsschätzer, insbesondere das Kalman-Filter, dar [27].

Das Kalman-Filter wurde für zeitinvariante lineare Systeme entwickelt, um mit verrauschten Sensordaten auf innere Zustände zurückzuschließen. Die Basis für das Kalman-Filter stellt die Zustandsraumbeschreibung des Systems dar. Mit Differentialgleichungen wird darin das dynamische Verhalten im Zeitbereich beschrieben und grenzt sich damit von anderen Verfahren ab, die im Frequenzbereich arbeiten. Durch diese Beschreibung wird allerdings eine genaue Modellierung der Systemdynamik vorausgesetzt, die nicht bei allen Systemen einfach zu bestimmen ist. [28]

Kern des Filters stellen zwei aufeinanderfolgende Berechnungsschritte dar. Zunächst wird anhand der Zustandsraumbeschreibung basierend auf dem letzten Zustand eine Prädiktion des neuen Zustands berechnet (Prädiktions-schritt). Anschließend wird der prädizierte Zustand mit den Informationen der Messung korrigiert (Korrekturschritt). Parallel werden ebenfalls die Unsicherheiten mit berücksichtigt. Sowohl bei der Systemdynamik als auch bei den Messungen muss die charakteristische Varianz bekannt sein. Es wird ein mittelwertfreies, normal-verteiltes Rauschen angenommen. Im Prädiktions-schritt erhöht sich durch die Anwendung der Systemdynamik die Unsicherheit des prädizierten Zustandes (Prädiktionsfehler), wird aber durch den Korrekturschritt wieder verringert. [28]

Das Filter kann bei zeitdiskreten Problemen angewendet werden, indem die zwei Schritte jeweils im Wechsel kontinuierlich durchgeführt werden. Dadurch ist ebenfalls sichergestellt, dass alle vergangenen Messwerte im aktuellen, geschätzten Zustand mit berücksichtigt werden, da sie im aktuellen Zustand enthalten sind. Weiterhin können mit dem Erweiterten-Kalman-Filter auch nicht-lineare Systeme geschätzt werden. [28]

Im Kontext der Zustandsschätzer in Zustandsraumdarstellung ist die Beobachtbarkeit von Systemen ein wichtiger Faktor. Kann aus der Beobach-

tion der Ein- und Ausgänge des Systems vollständig auf den Zustandsvektor geschlossen werden, so gilt das System als *beobachtbar* [28]. Ist an einem Fahrwerk eine beliebige Kombination aus Sensoren vorhanden, bedeutet dies nicht zwangsläufig eine vollständige Beobachtbarkeit des Zustands und die damit verbundene Einsatzmöglichkeit eines Zustandsreglers. Vielmehr muss durch die gewählte Sensorkombination eine Beobachtbarkeit der gewünschten Systemzustände gegeben sein.

**Anwendungen** Als Alternative zur direkten Messung wird in der Literatur auf die einfacher umzusetzende Zustandsschätzung verwiesen [10] [18] [37]. Grundsätzlich eignet sich ein Kalman-Filter dafür, es ist jedoch schwierig diesen als Zustandsbeobachter zu implementieren, da nicht immer alle Parameter zur Modellbildung ausreichend genau bekannt sind [29]. Anhand zweier Drehgestelltypen jeweils mit Starrrad- und Losradsätzen wird in [27] die Entwicklung eines Kalman-Filters beschrieben. Gleislagefehler können gut mit dem Filter abgebildet werden, da es stochastische Größen sind. Aus der Kontaktkinematik wird ein linearisiertes Modell abgeleitet und der Lateralversatz und der Gierwinkel als Systemzustände identifiziert. Die laterale Beschleunigung der Räder sowie die Giergeschwindigkeit werden als Messgrößen verwendet. Im ersten Schritt zeigt sich eine gute Schätzung der Zustände für stochastische Eingangsgrößen (Gleislagefehler). Wirkt allerdings der Gleisverlauf als eine deterministische Größe auf das System, liefert das Filter keine guten Ergebnisse. Bessere Ergebnisse liefert eine Erweiterung des Zustandsvektors um die Kurvenkrümmung und die Überhöhung, die das Modell vorher nicht abgebildet hat. Im Gegensatz zu Drehgestellen mit starren Achsen liefert das Filter für Losradsätze allgemein bessere Ergebnisse. [27]

Eine Erweiterung des Kalman-Filters auf einen Wagen mit zwei Starrachsen stellt [31] vor. Insgesamt sollen 18 Zustände aus 8 Eingangsgrößen geschätzt werden. Die Messungen sind als Inertialmesssystem ausgeführt und werden durch 3 Accelerometer und 5 Gyroskope durchgeführt. Die La-

teralbeschleunigung und Giergeschwindigkeit werden an Wagenkasten sowie Radsätzen gemessen. An den Rädern wird zusätzlich die Rollgeschwindigkeit gemessen. Neben den Fahrzeugzuständen selbst wird wie in [27] ebenfalls der Kurvenradius und die Überhöhung geschätzt. Die Simulation mit einem optimalen Regler zeigt sehr gute Ergebnisse und die Regelgüte wird durch den Einsatz des Filters kaum beeinträchtigt. [30] [31]

### 2.3.2 Flexx Tronic Drehgestell

Die Firma Bombardier setzt mit dem *FLEXX Tronic* Drehgestell als einer der ersten Hersteller eine aktive Spurführung technisch um. Mit einer aktiven Radialsteuerung und Stabilitätsregelung (engl. *Active Radial Steering and Stability*, kurz *ARS*) soll der heutige Kompromiss aus Kurvengängigkeit und Laufstabilität bei höheren Geschwindigkeiten begegnet werden. Dazu sind die zwei Achsen im Drehgestell unabhängig voneinander radial einstellbar gelagert. Eine Sensorbox erfasst den aktuellen Fahrzustand des Drehgestells und korrigiert über zwei hochdynamische Aktuatoren die Anlaufwinkel der Radachsen. Gemessen werden dabei die Gleislagefehler in Lateralrichtung sowie die aktuell herrschende Kurvenkrümmung auf Grundlage von Beschleunigungs- und Kreiselsensoren [39].

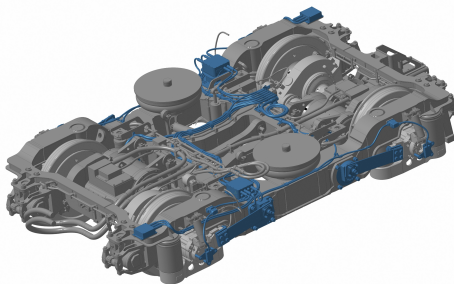


Bild 2.8: Flexx Tronic Drehgestell von Bombardier [8]



Vorteile verspricht sich der Hersteller durch eine höhere Stabilität bei hohen Geschwindigkeiten sowie eine geringere Belastung des Oberbaus und die damit einhergehende Reduktion des Verschleißes an Rad und Schiene. Weiterhin können zusätzlich durch die hohe Aktordynamik passive Dämpfungselemente entfallen. Das ursprüngliche Drehgestell besitzt eine Zulassung bis  $160 \text{ km h}^{-1}$  und wurde nach dem Einbau des ARS bis  $400 \text{ km h}^{-1}$  auf einem Rollenprüfstand erfolgreich getestet. [42]

## 2.4 Hallsensoren

Ähnlich den induktiven Sensoren können Hallsensoren dazu eingesetzt werden, Änderungen in magnetischen Kreisen zu detektieren. Hallsensoren messen dabei die magnetische Feldstärke. Eine technische Nutzung von Hallsensoren in der Anwendung bei aktiven Fahrwerken ist nicht bekannt, wird aber als möglich erachtet [4]. Da dieser Arbeit Hallsensoren zu Grunde liegen, werden im folgenden Abschnitt zunächst der Halleffekt erklärt und Industrielösungen von Hallsensoren aufgezeigt.

Das grundlegende physikalische Prinzip ist nach dessen Entdecker E. H. Hall benannt. Durch den Halleffekt können Magnetfelder in eine proportionale elektrische Spannung umgewandelt und somit quantitativ gemessen werden. [51]

Hallsensoren bestehen aus einem leitenden Material, welches im einfachsten Fall als Quader ausgeführt ist (siehe Abbildung 2.9). Zwei gegenüberliegende Elektroden prägen einen konstanten Strom bekannter Stärke auf das Material ein. Wirkt nun ein dazu senkrecht Magnetfeld, so werden die fließenden Elektronen durch die Lorentzkraft zu den Seitenflächen abgelenkt. An den parallel zum Elektronenstrom liegenden Seiten sind ebenfalls Elektroden angebracht, und die Ladungsverschiebung durch die Elektronen erzeugt ein Potential zwischen diesen. Das entstehende elektrische Feld ist idealerweise proportional zum Magnetfeld. Die messbare Spannung wird Hallspannung genannt. Mit diesem Aufbau kann jedoch nur die Magnet-

feldkomponente gemessen werden, die sowohl senkrecht zu den stromaufprägenden als auch zu den Messelektroden steht. Soll das Magnetfeld dreidimensional bestimmt werden, sind mindestens drei Hallelemente, ausgerichtet an den jeweiligen drei Raumrichtungen, notwendig. [51]

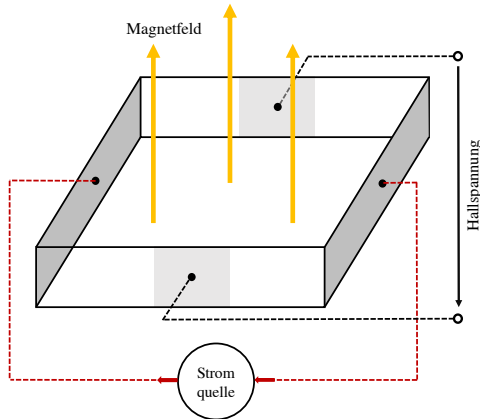


Bild 2.9: Schematischer Aufbau eines Hallelements, nach [51]

## Anwendungsgebiete

Der Halleffekt wird heutzutage meist direkt in integrierten Sensorlösungen eingesetzt, die sich durch unterschiedliche Ausstattungen und Eigenschaften unterscheiden. Am Markt verfügbare Sensoren reichen von einfachen binären Schaltelementen [47], über Hallelemente mit Analogausgang [48] bis hin zu voll integrierten Sensoren mit digitaler Busanbindung [32].

Innerhalb der integrierten Schaltungen (IC) unterscheiden sich die Sensoren bezüglich räumlicher Auflösung. So existieren neben einfachen eindimensional messenden Sensoren ebenfalls 3D-Hallelemente, die das Magnetfeld in alle drei Raumrichtungen erfassen. Zusätzlich beinhalten die ICs bereits eine vollständige analoge und digitale Signalverarbeitung, verschiedene Filter und Kompensationseinrichtungen ermöglichen genaue Messun-

gen auch bei Veränderungen der Temperatur. Die Ausgabe erfolgt bei diesen Typen fast ausschließlich über ein digitales Bussystem. Die Einsatzgebiete sind vielfältig und reichen von Automotiveanwendungen bis hin zur Erfassung von Nutzereingaben durch Drehgeber mit magnetischer Abtastung [32]. Magnetfeldsensoren sind oft auch direkt mit Beschleunigungssensoren und Gyroskopen gekoppelt, welche in modernen Mobiltelefonen zur Inertialnavigation eingesetzt werden [23].

## 2.5 Entwicklungsmethodik nach VDI 2206

Zur Entwicklung mechatronischer Systeme bietet die VDI 2206 [2] eine Möglichkeit der systematischen und methodengestützten Vorgehensweise. Die Richtlinie als Norm bietet einen anerkannten Leitfaden zur Gestaltung mechatronischer Produkte und unterstreicht dabei die Notwendigkeit der systematischen Vorgehensweise in allen Phasen, die sich durch die Komplexität der Produkte ergibt. Sie verbindet dabei die drei Domänen der Mechatronik: Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik [2].

Die Richtlinie erhebt nicht den Anspruch, vorhandene und etablierte Verfahren der Einzeldomänen zu ersetzen. Vielmehr handelt es sich um eine Ergänzung bzw. eine Dachstrategie zur Produktfindung. Die Entwicklung der Systemkomponenten und Teilsysteme erfolgt in den Einzeldomänen mit den dort gängigen Prozessen.

Die VDI 2206 setzt sich aus drei Kernelementen zusammen: dem Makrozyklus, dem Mikrozyklus und den Prozessbausteinen. In den nachfolgenden Absätzen werden die darin enthaltenen für diese Arbeit wichtigen Informationen, zusammengefasst. Abschließend wird noch auf die Verifikation und Validierung eingegangen.

**Makrozyklus** Die Vorgehensweise innerhalb der Richtlinie entstammt ursprünglich der Softwareentwicklung und beschreibt einen generischen Ablauf zur Problemlösung [2]. Abbildung 2.10 zeigt die allgemeine Vor-

gehensweise im Makrozyklus, dessen Darstellung auch für die Alternativbezeichnung *V-Modell* namensgebend ist. Zu Beginn sind Anforderungen

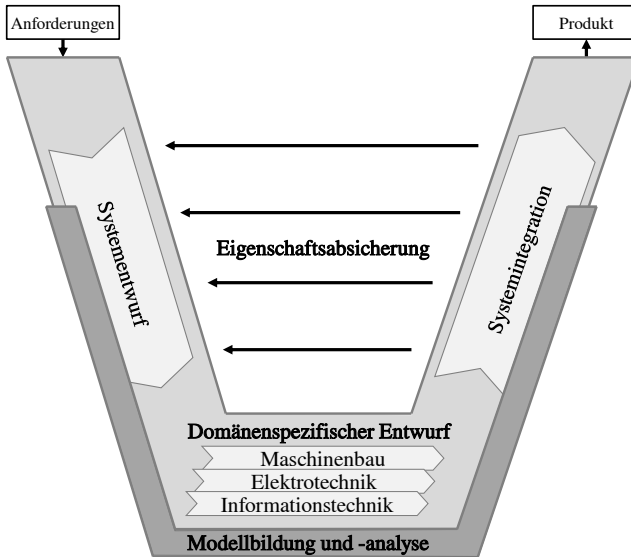


Bild 2.10: Makrozyklus (V-Modell) nach [2]

aufzustellen, welche sich im industriellen Umfeld aus den Produkthanforderungen oder dem Kontext einer präzisen Aufgabenstellung ergeben. Im Nachfolgenden schließt sich der Systementwurf an. Domänenübergreifend wird zu den Anforderungen ein Lösungskonzept entworfen, wobei die Komplexität durch die Bildung von Teilsystemen sowie Teilfunktionen reduziert wird. Die Beschreibung des Gesamtsystems sowie der Teilsysteme können, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, als mechatronische Systeme aufgefasst werden. Den Teilsystemen werden geeignete Wirkprinzipien und Lösungselemente zugewiesen, wobei stetig die Funktionserfüllung des Gesamtsystems sichergestellt wird [2]. Im domänenspezifischen Entwurf werden nach den Fachrichtungen getrennte Entwicklungsprozesse angestoßen. Jede Domäne nutzt die eigenen etablierten Verfahren zur Lösungsfindung und ar-

beitet die Lösungselemente weiter aus. In der Systemintegration werden die nun konkreten Lösungssteile zum Gesamtsystem zusammengeführt. Die Eigenschaftsabsicherung überprüft dabei stetig, ob alle definierten Anforderungen erfüllt werden. Sie ist ein wesentlicher Bestandteil der Produktfindung und wird durch Verifikations- und Validierungsstrategien abgebildet. Modellbildung und -analyse begleiten dabei den Makrozyklus nicht nur bei der Lösungsfindung sondern auch bei der Lösungsüberprüfung. Die Eigenschaftsabsicherung kann bereits bei Teilsystemen angewendet werden und spart durch frühe Erkennung von Entwicklungsfehlern Zeit und Kosten. [2] Ergebnis des Makrozyklus ist das Produkt, entweder materieller oder immaterieller Natur (Dienstleistung, Softwareprodukt). Mit Produkt können auch unterschiedliche Konkretisierungsgrade (z.B. Labormuster, Funktionsmuster oder Vorserienprodukt) des gewünschten Endproduktes gemeint sein. Das V-Modell kann hierbei mehrfach durchlaufen werden, um so stetig aber überschaubar die Produktqualität zu steigern (siehe Abbildung 2.11). Gerade bei komplexen Produkten sind mehrere Durchläufe nötig, wobei sich deren Anzahl aus der spezifischen Aufgabenstellung und Komplexität ableitet. [2]

**Mikrozyklus** Der Mikrozyklus wird auch als Problemlösungszyklus verstanden und soll als Grundlage für eine Vorgehensweise zur allgemeinen Lösungsfindung dienen. Durch die Unterteilung des Gesamtprozesses in kleinere Teile soll die Bearbeitung anhand strukturierter, planbarer Teilaufgaben stattfinden. Neben der in der Richtlinie vorgeschlagenen allgemeinen Vorgehensweise können auch andere Produktfindungsmethodiken wie SPALTEN [5] oder die integrierte Produktentwicklung nach Ehrlenspiel [11] angewendet werden. Für rein mechanische Komponenten bietet sich die VDI 2221 an [1].

Die VDI 2206 kennt folgende Schritte im Mikrozyklus:

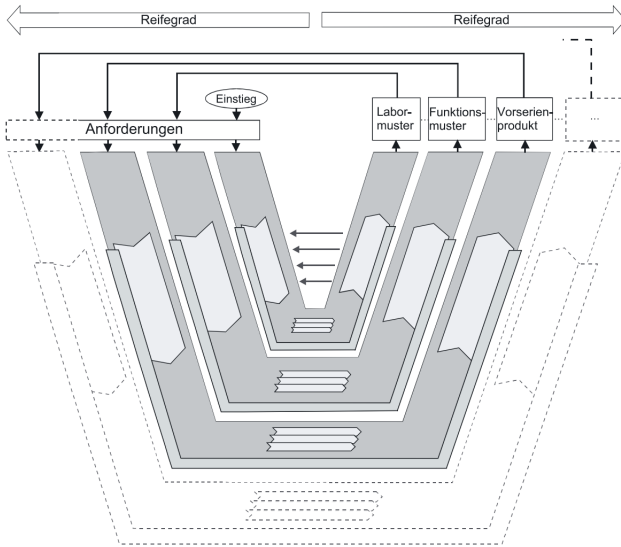


Bild 2.11: Mehrfache Durchläufe des V-Modells aus [2]

- Situationsanalyse bzw. Zielübernahme  
Zielformulierung entweder durch externe Vorgabe (Soll-Vorgabe) oder durch interne Analyse des Ist-Zustandes
- Analyse und Synthese  
Abwechseln der Schritte Analyse und Synthese zur Findung von Lösungen. Rücksprung bei neu erkannten Aspekten der Zielformulierung möglich.
- Analyse und Bewertung  
Evaluation der gefundenen Lösungselemente unterstützt durch Simulationen oder Versuche. Erstellen einer Entscheidungsgrundlage.
- Entscheidung  
Auf Basis der gewonnenen Informationen und Lösungsvarianten Ent-

scheidung über Fortführung mit ausgewählter Variante oder Rücksprung zur Situationsanalyse.

- Planen des weiteren Vorgehens bzw. Lernen  
Rückblick auf den Mikrozyklus und Identifikation von positiven sowie negativen Teilschritten. Ziel ist die kontinuierliche Verbesserung zukünftiger Mikrozyklen.

**Prozessbausteine** Die Richtlinie bietet vordefinierte Prozessbausteine für die Teilschritte *Systementwurf, Modellbildung und -analyse, domänen-spezifischer Entwurf, Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung* [2]. Im Folgenden soll auf den Bereich der Modellbildung und -analyse genauer eingegangen werden, da diese einen wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist. Der modellbasierte Systementwurf nach VDI 2206 gliedert sich dabei wie folgt:

- Zielformulierung  
Welchem Zweck dienen die Modelle?  
Hervorzuheben ist hier die „*Reduzierung des Prototypenaufwands durch vorausgehende Simulationen*“ und die „*Hardware-in-the-Loop-Simulationen zur Funktionsüberprüfung*“ [2]
- Modellbildung  
Wahl der Modellierungstiefe und Art der Modellbildung (theoretisch, experimentell)
- Modellanalyse  
Ableiten der Eigenschaften und des Verhaltens des Modells durch geeignete Tools (Simulationen). Basis für Synthesephase.
- Systemsynthese  
Übertragung der Erkenntnisse aus der Analysephase auf das zu entwickelnde System.

- Systemanalyse  
Analyse des verbesserten Systems hinsichtlich der Zielformulierung des Gesamtsystems.

Innerhalb des modellbasierten Systementwurfs wird auf die *Durchgängigkeit* der Modelle hingewiesen. Dies bedeutet, dass Modelle aus vorherigen Phasen erweitert werden und somit zunehmend an Abstraktionsgrad verlieren. Durch Nutzung von Software zur Simulation dieser Modelle kann ein Zeit- und Kostenvorteil erreicht werden. Die Anforderungen an das Produkt können damit ebenfalls frühzeitig überprüft werden, und es kann bereits vor dem ersten realen Prototyp eine grundlegende Aussage über das Verhalten des Gesamtsystems getroffen werden. Der erste Prototyp besitzt dann eine hohe technische Reife. [2]

**Virtual Prototyping** Reale Modelle und Prototypen sind ein wichtiger Bestandteil auf dem Weg zur Produktreife. Da Prototypen im Aufbau und Test zeit- und kostenintensiv sind, wird versucht, die nötige Anzahl weitestgehend zu minimieren. Im Gegensatz zu realen Prototypen sind virtuelle Prototypen schnell umsetzbar, liefern zeitnahe Ergebnisse und senken somit Kosten. Gerade die Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen oder dem Gesamtsystem und der Umwelt werden durch Parameterstudien schnell erkannt. Umrüstzeiten auf Prüfständen entfallen, und verschiedene Ansätze z.B. bei der Reglerauslegung können schnell untersucht werden. Durch die Interdisziplinarität der Mechatronik ist eine Herausforderung die Kopplung der spezialisierten Simulationstools in den einzelnen Domänen. [2]

### 2.5.1 Verifikation und Validierung

Die Verifikation prüft ab, ob die Anforderungen an das Produkt, das Modell oder die Lösung formal erfüllt werden. Gerade bei modellbasierten Entwicklungsmethoden, wie Simulationen, ist eine stetige Plausibilitätsprüfung nötig, sodass sichergestellt ist, dass das Modell die wesentlichen Aspekte



der Realität widerspiegelt. Die Verifikation kann nicht prüfen, ob das Produkt die Kundenzufriedenheit erfüllt, und nicht erfasste Anforderungen werden nicht entdeckt. [2]

Mit der Validierung wird die Produktlösung am Kunden und Anwender überprüft. Das Produkt muss sich für den beschriebenen Einsatzzweck eignen und die Erwartungshaltung der Anwender erfüllen. Übertragen lässt sich dieser Schritt auch auf die Modellbildung. Wird das Simulationsmodell mit Daten eines realen Versuchs auf Kohärenz überprüft und zeigt eine gute Übereinstimmung, so ist das Modell validiert. Aussagen, die an validierten Modellen abgeleitet werden, besitzen eine höhere Aussagekraft bezogen auf die spätere reale Umsetzung. Der modellbasierte Systementwurf gliedert sich als Validierungswerkzeug hier ein. [2]

**X-in-the-loop** Die modellbasierte Systementwicklung ermöglicht zusätzlich das frühe Testen von Teilsystemen unter realen Bedingungen. Dabei wird das Teilsystem in einer speziellen Testumgebung installiert und über seine Schnittstellen mit einer Simulation der restlichen Komponenten verbunden. So können Prototypen real aufgebaut und getestet werden, während der Rest des Gesamtsystems sich in einer Simulation befindet. Diese Tests sind in kürzerer Zeit zu verwirklichen und erlauben reproduzierbare Parameterstudien. Gerade bei komplexen oder großen Systemen bietet sich diese Vorgehensweise an. Eine Verifikation und Validierung ist damit möglich. [2] Das X wird je nach Art des Testaufbaus durch die zu überprüfende Komponente ersetzt. Bei Hardware-in-the-loop werden reale Prototypen aufgebaut und getestet. Bei Software-in-the-loop wird die Software von Steuergeräten oder Reglern in einer simulierten Umgebung ausgelegt und validiert. [2]



## 3 Sensorentwicklung

Wie in Kapitel 1 beschrieben wird anhand des aktiv gelenkten Radpaars (AGR) nach Wei [54] aus bestehenden Messkonzepten ein geeignetes Messkonzept abgeleitet. Für das Messkonzept wird ein neuartiger Sensor, der in dieser Form noch nicht umgesetzt wurde, definiert und entwickelt. Das Messkonzept wird im Rahmen des AGRs entwickelt, ist aber für andere aktive Fahrwerke, die den Anlaufwinkel oder Lateralversatz als Eingangsgröße benötigen, gleichermaßen verwendbar. Das Sensorkonzept kann auch in weiteren Gebieten wie der Spurweitenvermessung eingesetzt werden und ist nicht auf den Einsatz an aktiven Fahrwerken beschränkt.

### 3.1 Vorgehensweise

Die Entwicklung des Sensorkonzepts wird durch eine problemspezifische Vorgehensweise unterstützt und begleitet. Die konkrete Prozessausgestaltung hat dabei einen maßgeblichen Einfluss auf die Lösungsqualität. Für diese Arbeit wird aus der VDI 2206 als Richtlinie zur Entwicklung mechatronischer Produkte eine an die Problemstellung angepasste Vorgehensweise abgeleitet. Die Vorgehensweise wird dabei um Elemente des SPALTEN-Prozesses, der den Produktentwicklungsprozess als Problemlösungsprozess auffasst, ergänzt. Methodiken werden darin pragmatisch angewendet und auf das aktuelle Problem der jeweiligen Phase anpasst. Im Folgenden wird die Vorgehensweise als angepasster Problemlösungsprozess beschrieben. [5] [11]

Im ersten Schritt wird die Ausgangssituation erfasst. Diese Situationsanalyse orientiert sich am SPALTEN-Modell und an der VDI 2221 und lie-

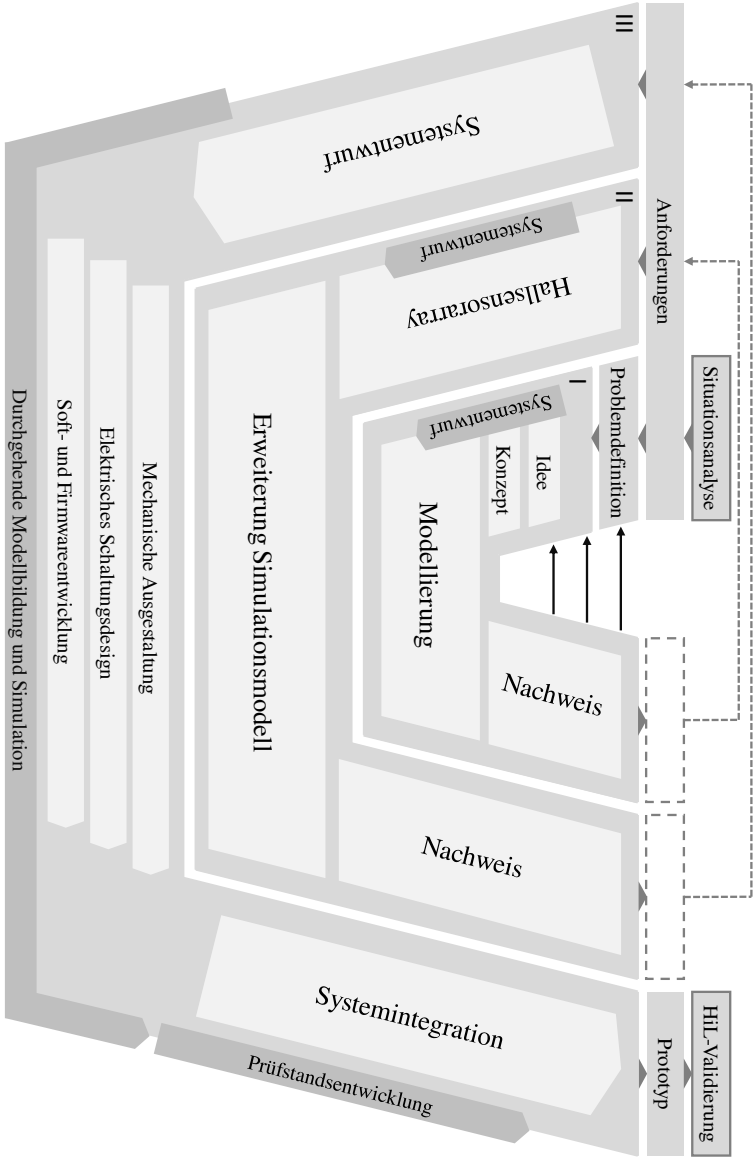


Bild 3.1: Übersicht der Vorgehensweise nach [2] mit Ergänzungen aus [5]

fert Informationen zum Systemverständnis [5] [1]. Hierzu wird in Abschnitt 3.2.1 der Aufbau und die Funktionsweise des AGRs untersucht. Wesentliche Funktionen und Randbedingungen werden identifiziert. Anschließend wird das Messkonzept in Abschnitt 3.2.2 abgeleitet, erweitert und evaluiert. Die gewonnenen Informationen werden im nächsten Schritt zu Anforderungen an das Sensorkonzept zusammengefasst und zu einer Problemdefinition (Abschnitt 3.3) verdichtet [5]. Das Ergebnis der Problemdefinition ist eine abstrakte, lösungsneutrale Beschreibung des zu entwickelnden Sensorkonzepts.

Abbildung 3.1 zeigt die Vorgehensweise mit der Situationsanalyse als Einstiegspunkt. Die folgende Kapitelstruktur und -abfolge entspricht dabei der abgebildeten Vorgehensweise beginnend mit der Situationsanalyse und endend mit der Hardware-in-the-loop-Validierung.

Nach der Problemdefinition wird das V-Modell der VDI 2206 als Makrozyklus eingesetzt. Es beschreibt übergeordnet das grundsätzliche Vorgehen, um aus der abstrakten Problembeschreibung zur prototypischen Sensorumsetzung zu gelangen. Zur Lösungsfindung in den Einzeldomänen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik werden passende Entwicklungsmethodiken und Softwaretools eingesetzt. Die Entwicklung und Eigenschaftsabsicherung wird durch eine durchgehende Modellbildung und -analyse der VDI 2206 begleitet. Kritische Aspekte können damit früh identifiziert werden. Durch das hohe technologische Risiko, welches die Neuentwicklung des Sensorkonzepts darstellt, ist eine frühzeitige Eigenschaftsabsicherung wichtig um ein valides Produkt zu erhalten. [2]

Der Makrozyklus wird insgesamt dreimal durchlaufen. Mit jedem Schritt wird der Reifegrad der Lösung erhöht, und die Anforderungen werden gegebenenfalls angepasst. Dies entspricht dem Informationscheck im SPALTEN-Modell. Der Informationscheck prüft, ob sich durch zusätzliche Informationen zur Lösung oder durch die ausgewählte Lösung selbst neue Anforderungen ergeben oder bestehende abgewandelt werden müssen.

Im ersten Durchlauf (Makrozyklus I) wird aus der Problemdefinition eine Lösungsidee generiert. Die Lösungsidee wird zu einem Lösungskonzept erweitert und zunächst rein simulativ untersucht. Die prinzipielle physikalische Machbarkeit der Lösung wird nachgewiesen.

Im zweiten Durchlauf (Makrozyklus II) wird das Lösungskonzept zu einem Sensorkonzept auf der Idee eines Hallsensorarrays weiterentwickelt. Die Modelle werden entsprechend angepasst und nun hinsichtlich der technischen Machbarkeit überprüft.

Abschließend wird im dritten Durchlauf (Makrozyklus III) ein Sensorprototyp ausgestaltet. Im domänenspezifischen Entwurf werden die Teilkomponenten aus Mechanik, Elektrotechnik und Softwareentwicklung simultan entwickelt und in der Systemintegration zusammengeführt. Innerhalb dieses Makrozykluses wird zudem iterativ die Lösungsqualität verbessert. Die durchgehende Modellbildung und Simulation sichert die Funktionsweise des Sensors in seiner konkreten technischen Gestalt zu jeder Zeit ab. Parallel zur Sensorentwicklung wird ein Prüfstand aufgebaut. Der Prüfstand dient zunächst der Sensorcharakterisierung und Modellverifikation.

Nach Inbetriebnahme des Prototyps wird der Prüfstand in Kapitel 5 verwendet, um den Sensor in eine Gesamtsystemsimulation einzubinden. Der Sensor wird dabei mittels Hardware-in-the-loop in verschiedenen Fahrscenarien getestet und validiert.

Nicht dargestellt ist die Entwicklung der Sensoralgorithmen zur Bestimmung der Hilfsmessgröße. Dieser Prozess erstreckt sich über die Makrozyklen II und III und wird parallel bearbeitet. Die Funktionsweise und die Ergebnisse werden in Kapitel 4 gesondert beschrieben.

[2] [5]

## 3.2 Situationsanalyse

Der Aufbau und die Funktionsweise des aktiv gelenkten Radpaares wird in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. In Abschnitt 3.2.2 wird anschließend ein da-

für geeignetes Messkonzept abgeleitet, welches Anlaufwinkel und Lateralversatz als Reglereingangsgrößen bestimmt. Die Lenkwinkelmessung wird nicht weiter betrachtet. Durch das Messkonzept eingebrachte systematische Fehler werden abgeschätzt und Redundanzen im Messkonzept diskutiert.

### 3.2.1 Aktiv gelenktes Radpaar

Der mechanische Aufbau (siehe Abbildung 3.2) des AGRs besteht aus einem Hilfsrahmen und zwei profilierten Losrädern. Die Losräder weisen einen zusätzlichen Freiheitsgrad um ihre Hochachse auf und sind jeweils an einem Lenkhebel befestigt. Die Lenkhebel bilden mit der Lenkstange das Lenktrapez. Ein Aktor bringt an der Lenkstange eine Kraft auf und ermöglicht durch die resultierende translatorische Bewegung der Lenkstange den aktiven Eingriff in die Querdynamik des Fahrwerks. Durch die Verbindung über die Lenkstange sind die Freiheitsgrade beider Räder um die Hochachse gekoppelt, und es stellt sich an beiden Radseiten der gleiche Lenkwinkel ein. Die resultierenden Anlaufwinkel der Räder sind auf Grund von Gleiskrümmung und Gierwinkel des Fahrwerks dagegen nicht immer gleich. Der Unterschied zwischen rechten und linkem Rad ist nach Wei [54] vernachlässigbar klein und wird fortlaufend nicht weiter unterschieden. Das Fahrwerk besitzt kein eigenes Traktions- oder Bremssystem. [54]

Das Intertialkoordinatensystem wird wie in der Literatur gebräuchlich definiert. Die z-Achse (Hochachse, Gierachse) zeigt in Richtung der Erdbeschleunigung und die x-Achse zeigt in Fahrtrichtung. Die y-Achse steht senkrecht sowohl zur Gierachse als auch zur Fahrtrichtung und beschreibt die Lateralposition des Fahrwerks. Der Anlaufwinkel wird mit  $\alpha$ , der Lateralversatz mit  $v$  und der Lenkwinkel mit  $\psi_L$  bezeichnet. Die Definition dieser Größen erfolgt in Abschnitt 3.2.2.

**Regelstrategie** Durch die fehlende starre Kopplung der Räder im gelenkten Losradpaar findet keine eigenständige Zentrierung des Fahrwerks im

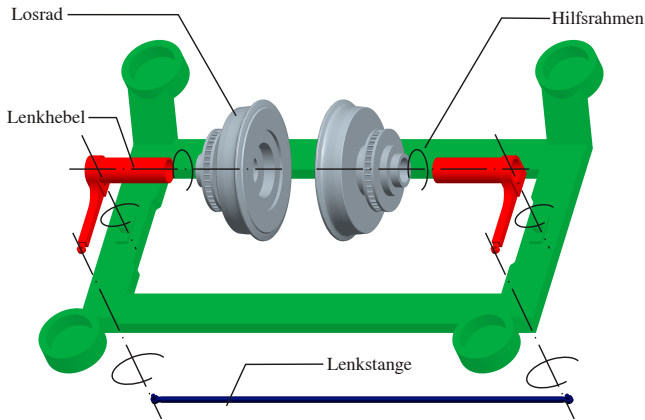


Bild 3.2: Aufbau des aktiv gelenkten Radpaars (AGR) [54]

Gleis statt. Wei verwendet in seiner Reglerauslegung den Lateralversatz als Regelziel. Der Regler soll einen kleinen gegebenenfalls um Null oszillierenden Lateralversatz aktiv einstellen. Neben dem Lateralversatz wird zusätzlich der Anlaufwinkel klein gehalten. In [54] beschreibt er die modellgestützte Entwicklung eines solchen Zustandsreglers. Mit Hilfe der  $\mu$ -Synthese wird ein robuster Regler entwickelt, der auch bei Unsicherheiten in der Modellierung und verrauschten Messwerten eine Spurführung mit kleinem Lateralversatz aufweist. Der Nachweis wird durch verschiedene Testszenarien in einer gekoppelten Mehrkörpersimulation erbracht. [54]

**Fahrverhalten und Sicherheit** Im Normalbetrieb sind alle Zustandsgrößen verfügbar, und die notwendigen Regelabweichungen können eindeutig bestimmt werden. Das AGR folgt dem Trassierungsverlauf, und ein Spurkanzanlauf wird vermieden. Fällt die Messtechnik temporär oder dauerhaft aus, muss die Sicherheit weiterhin gewährleistet sein. Wei diskutiert zwei Möglichkeiten für den Fehlerfall:

Wird der Aktor kraftfrei geschaltet, so stellt sich der Lenkwinkel passiv



über die Laufkinematik ein. Das Fahrwerk entspricht nun einem passiv gelenkten Einzelrad-Einzelfahrwerk (EEF). Im Vergleich zu einem Losradsatz erzielt Wei mit einem EEF in Simulationen eine schlechtere betriebsbezogene Spurführung mit höherem Verschleiß. Als weitere Möglichkeit wird daher der Lenkwinkel in der Neutralposition festgehalten und das AGR entspricht nun einem Losradsatzfahrwerk wie sie bereits heute im Einsatz sind. [54]

Mit beiden Möglichkeiten ist ein Fail-Safe-Verhalten erreichbar [54]. Es kann zudem ein Fail-Operational-Verhalten abgebildet werden, indem ein falsches Sensorsignal nicht zu einer Abschaltung der aktiven Spurführung führt, sondern dieser Sensor abgetrennt und durch redundante Signale komplementiert wird (siehe Abschnitt 3.2.2).

Der Straßenbahnbetrieb kann trotz des Ausfalls eines oder mehrerer AGR-Fahrwerke sichergestellt werden. Fällt ein Fahrwerk in Fail-Safe oder Fail-Operational aus, so führt dies nicht zu Störungen im Betriebsablauf. Der Verschleiß und die Lärmemissionen erreichen im Fail-Safe-Ausfall der Fahrwerke den Grad denen eines Losradsatzes.

Die Weichendurchfahrt stellt einen weiteren kritischen Punkt dar. Durch Einlenken des Fahrwerk wird bedingt durch den kinematischen Aufbau das Spurmaß verengt. Das Spurmaß bezeichnet den Abstand zwischen den Spurrandflanken der Räder und ist das fahrzeugseitige Gegenstück zur Spurweite. In Weichen kann es dabei zu einem Anlauf oder der Überfahrt am Weichenherzstück kommen. Um diesem entgegenzuwirken wird das Fahrwerk vor jeder Weichendurchfahrt in die neutrale Position gelenkt. [54]

Idealerweise erkennt die Steuerung des aktiven Fahrwerks eine solche anstehende Weichendurchfahrt durch installierte Sensoren. Eine rein gesteuerte Möglichkeit bietet ein Verfahren, welches über die aktuelle Position und aus dem bekannten Streckenverlauf des Fahrzeugs anstehende Weichendurchfahrten erkennt.

### 3.2.2 Messkonzept

Der im vorherigen Abschnitt angesprochene Zustandsregler des AGRs setzt als Eingangsgrößen den Lenkwinkel  $\psi_L$ , den Anlaufwinkel  $\alpha$  und den Lateralversatz  $v$  des Fahrwerks voraus. Abbildung 3.3 zeigt den Regelkreis mit Rad-Schiene-Kontakt. Die Orte der Messgrößenerfassung sind umrahmt und wie die Informationsflüsse gelb hervorgehoben. Der Lenkwinkel  $\psi_L$  ist trivial innerhalb des Fahrwerks messbar. Ein Winkelgeber am Lenkhebel oder ein Weggeber an der Lenkstange ist für die Messung des Lenkwinkels ausreichend. Eine direkte Messung im Aktor ist ebenfalls möglich. Durch die Unabhängigkeit des Lenkwinkels von der Systemumwelt und die damit verbundene einfache Messgrößenbestimmung wird in dieser Arbeit das Messkonzept für den Lenkwinkel nicht weiter betrachtet.

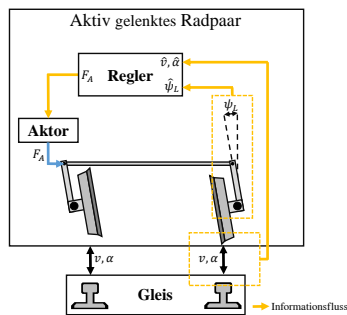


Bild 3.3: AGR als Systemdarstellung. Energieflüsse in blau, Informationsflüsse in gelb.

Für die Bestimmung des Anlaufwinkels und des Lateralversatzes wird zunächst jeweils ein getrenntes Messkonzept abgeleitet. Diese werden abschließend zu einem Gesamtmesskonzept kombiniert. Beide Größen ergeben sich aus der Rad-Schiene-Stellung und damit aus der relativen Position von Rad und Schiene. Der Anlaufwinkel  $\alpha$  beschreibt die Winkeldifferenz der Laufrichtung des Rades von der tangentialen Schienenrichtung (siehe Abbildung 3.4a). Der Lateralversatz  $v$  ist die Abweichung der Fahrwerks-

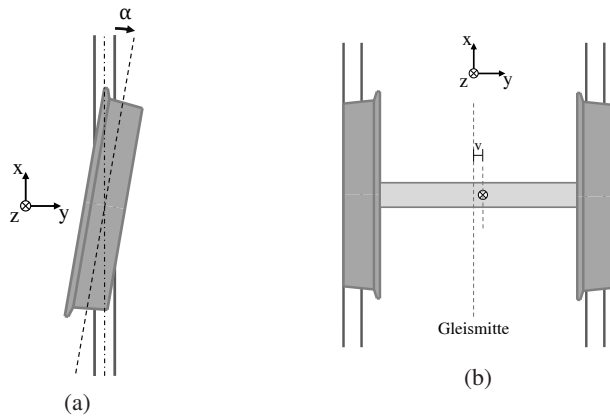


Bild 3.4: Definition Anlaufwinkel (a) und Lateralversatz (b)

mitte von der Gleismitte (Abbildung 3.4b). Die Gleismitte ist nicht direkt messbar, sondern muss über den Abstand der beiden Schienen (Spurweite) berechnet werden. Ein Lateralversatz von Null entspricht dabei einem ideal zentrierten Fahrwerk mit gleichem Spurkranzabstand zur Schiene auf beiden Seiten.

Bedingt durch die schwierige Umsetzung der direkten Messung von Anlaufwinkel und Lateralversatz werden Hilfsmessgrößen eingeführt. Hilfsmessgrößen sind dabei einfacher zu bestimmende Messgrößen am Fahrwerk, die über eine geometrische oder kinematische Abhängigkeit mit den interessierenden Größen in Beziehung stehen. Wei [54], Kataori [22] und Kraft [24] verwenden in ihren Untersuchungen gleiche bzw. ähnliche Ideen, die hier aufgegriffen und angepasst werden. Es handelt sich dabei nicht um eine Zustandsschätzung. Die Messgröße kann durch den bekannten Zusammenhang zwischen Hilfsmessgrößen und Messgröße exakt berechnet werden. Fehler können durch Vereinfachungen oder Näherungen in der Berechnung entstehen (siehe Fehlerabschätzung im Abschnitt 3.2.2).

Die Einzelmesskonzepte werden explizit an dieser Stelle ohne vordefinier-

ten Sensortyp vorgestellt. Es wird lediglich angenommen, dass ein solcher Sensor, der die Hilfsmessgröße erfassen kann, existiert. Die Ideenfindung soll dadurch unvoreingenommen durchgeführt werden. Abschließend wird das kombinierte Gesamtmesskonzept hinsichtlich systematischer Fehler und auf Redundanzoptionen untersucht.

**Einzelmesskonzept Anlaufwinkel** Der Anlaufwinkel ist von der Verdrehung des Rades um die Hochachse zur Gleitangantenrichtung abhängig. Kann im Radkoordinatensystem die Position und Lage der Schiene bestimmt werden, so ist der Anlaufwinkel berechenbar. Hierzu werden zwei Abstandssensoren vor und hinter dem Rad am Lenkhebel angebracht, welche die Distanz zur Schiene messen. Der Anlaufwinkel lässt sich aus diesen Hilfsmessgrößen trigonometrisch ableiten. Die Messwerte sind nicht vom Lenkwinkel abhängig. Sind die Sensoren dagegen am Fahrwerksrahmen be-

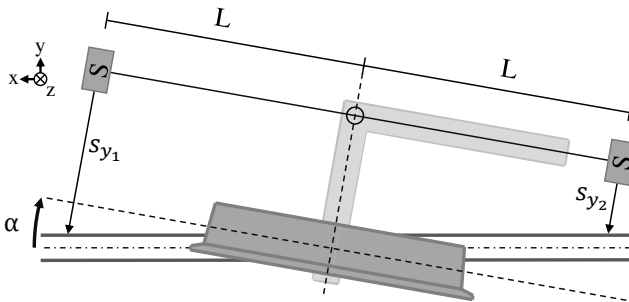


Bild 3.5: Messkonzept für Anlaufwinkel [54]

festigt, so wird eine Kombination aus Lenkwinkel und Anlaufwinkel erfasst. Der Lenkwinkel muss dabei bei der Berechnung des Anlaufwinkels aus den Hilfsmessgrößen herausgerechnet werden.

Abbildung 3.5 zeigt das ausgewählte Messkonzept mit Sensoren am Lenkhebel.  $L$  gibt die Entfernung der Sensoren vor und hinter dem Rad gegenüber

der Drehachse des Rades an. Über Gleichung 3.1 kann der Anlaufwinkel aus den Hilfsmessgrößen  $s_{y_2}$  und  $s_{y_1}$  errechnet werden.

$$\hat{\alpha} = \arctan \frac{s_{y_2} - s_{y_1}}{2L} \quad (3.1)$$

**Einzelmesskonzept Lateralversatz** Auch zur Bestimmung des Lateralversatzes werden zwei weitere Hilfsmessgrößen eingeführt. Auf jeder Seite des Fahrwerks wird ein Sensor angebracht, der den Abstand zur Schiene  $s_{y_R}$  bzw.  $s_{y_L}$  in Lateralrichtung bestimmt. Abbildung 3.6 zeigt den Messaufbau mit schräger Abtastung von oben. Die Sensoren sind im Gegensatz zum Messkonzept des Anlaufwinkels am Fahrwerk und nicht am Lenkhebel befestigt. Der Lateralversatz ergibt sich nach Gleichung 3.2 aus den Hilfsmessgrößen  $s_{y_R}$  und  $s_{y_L}$ , die bereits den Abtastungswinkel berücksichtigen.

$$\hat{v} \approx \frac{1}{2}(s_{y_R} - s_{y_L}) \quad (3.2)$$

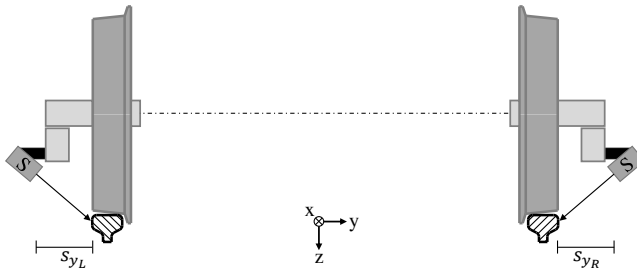


Bild 3.6: Einzelmesskonzept für Lateralversatz [54]

Spurweitenänderungen durch Gleislagefehler gehen in beide Hilfsmessgrößen ein. Da der Lateralversatz von Null einem zentrierten Fahrwerk entspricht, kann über die Hilfsgrößen stets die korrekte Abweichung der idealen Gleismitte bestimmt werden. Ein zentriertes Fahrwerk hat den gleichen

Abstand an beiden Rädern zwischen Spurkranz und Schienenseitenflanke zur Folge. Durch Spurweitenänderungen vergrößert oder verkleinert sich dieser Abstand, der Lateralversatz bleibt jedoch Null.

**Gesamtkonzept** Werden beide Einzelmesskonzepte am AGR installiert, so sind insgesamt vier Sensoren zur Bestimmung der vier Hilfsmessgrößen nötig. Ein Sensorpaar am Lenkhebel bestimmt auf einer beliebigen Seite am Rad den Anlaufwinkel. Dieser ist laut der getroffenen Annahme in Abschnitt 3.2.1 näherungsweise gleich dem Anlaufwinkel des Rades der anderen Seite. Das zweite Sensorpaar erfasst den Lateralversatz vom Fahrwerkrahmen aus.

Die Sensoranforderungen der beiden Einzelmesskonzepte unterscheiden sich, da Einbauort und Messaufgabe verschieden sind. Das Gesamtmesskonzept wird daher weiter vereinfacht. Das zweite Sensorpaar zur Bestimmung des Lateralversatzes entfällt. Stattdessen wird das Messkonzept des Anlaufwinkels an beiden Rädern des Fahrwerks gleichermaßen ausgeführt. Aus den Hilfsmessgrößen der beidseitigen Anlaufwinkelbestimmung kann zusätzlich der Lateralversatz berechnet werden. Sensoren am Fahrwerksrahmen sind nicht notwendig. Weiterhin ist zudem nur ein einziger Sensortyp erforderlich, der die jeweiligen Abstände  $s_*$  misst (siehe Abbildung 3.7). Eine gesonderte Entwicklung und der Einsatz zweier spezialisierter Sensoren wird vermieden. Die Gleichung 3.3 kann zur Berechnung des Lateralversatzes verwendet werden. Die Verkürzung bzw. Verlängerung der Hilfsmessgröße durch den Anlaufwinkel ist auf beiden Seiten in etwa gleich groß und kann vernachlässigt werden. Zusätzlich hat die Kurvenradiendifferenz zwischen innerer und äußerer Schiene einen Einfluss, der ebenfalls vernachlässigt werden kann.

$$\hat{v} \approx \frac{1}{2}(s_{R_1} - s_{L_1}) \approx \frac{1}{2}(s_{R_2} - s_{L_2}) \quad (3.3)$$

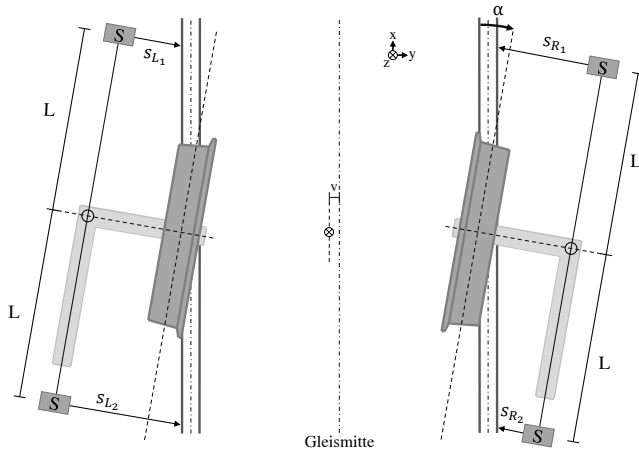


Bild 3.7: Abgeleitetes Messkonzept für das AGR

## Fehlerabschätzung

In der folgenden Betrachtung sollen systematische Fehler, die sich durch den Aufbau des Messkonzepts ergeben, charakterisiert werden. Weitere Fehlerquellen entstehen durch die Einbauart und Aufhängung, da Bauteile nicht beliebig starr gegeneinander befestigt werden können. Diese werden jedoch nicht betrachtet, da sie stark von der mechanischen Ausgestaltung abhängen.

**Systematische Fehler** Das vorgeschlagene Messkonzept weist durch den Aufbau und durch die Nutzung von Hilfsmessgrößen systembedingte Fehler auf. Es soll untersucht werden, in welchen Bereichen Fehler auftreten, inwiefern Vereinfachungen gültig sind, und welchen Einfluss diese auf die Messgenauigkeit haben.

Zunächst wird der Wertebereich jeder Messgröße ermittelt. Wei normiert zur Reglerauslegung alle Messgrößen und leitet aus Simulationen die in Tabelle 3.1 angegebenen Arbeitsbereiche für Lateralversatz und Anlaufwinkel ab. Im Betrieb stellen sich keine Werte außerhalb dieser Grenzen ein. [54]

Anlaufwinkel		Lateralversatz	
mrad		mm	
min	max	min	max
-10	10	-3	3

Tabelle 3.1: Definierter Arbeitsbereich der Fahrwerkszustände Anlaufwinkel und Lateralversatz nach Wei [54]

Im nächsten Schritt werden die gemessenen Zustandsgrößen als Funktionen der Hilfsmessgrößen aufgefasst. Der gemessene Anlaufwinkel und Lateralversatz ist von den realen Systemzuständen  $\alpha$  und  $v$ , dem aktuellen Kurvenradius  $R$  und dem Einbauabstand  $L$  abhängig. Die gemessenen Systemzustände werden durch die Hilfsmessgrößen substituiert.

$$\hat{\alpha}(\alpha, v, R, L) = \hat{\alpha}(s_{R_1}, s_{R_2}, R, L) = \hat{\alpha}(s_{L_1}, s_{L_2}, R, L) \quad (3.4)$$

$$\hat{\alpha}(s_{R_1}, s_{R_2}, R, L) = \arctan \frac{s_{R_2} - s_{R_1}}{2L} \quad (3.5)$$

$$\hat{\alpha}(s_{L_1}, s_{L_2}, R, L) = \arctan \frac{s_{L_2} - s_{L_1}}{2L} \quad (3.6)$$

und

$$\hat{v}(\alpha, v, R, L) = \hat{v}(s_{R_1}, s_{L_1}, R, L) = \hat{v}(s_{R_2}, s_{L_2}, R, L) \quad (3.7)$$

$$\hat{v}(s_{R_1}, s_{L_1}, R, L) \approx \frac{1}{2}(s_{R_1} - s_{L_1}) \quad (3.8)$$

$$\hat{v}(s_{R_2}, s_{L_2}, R, L) \approx \frac{1}{2}(s_{R_2} - s_{L_2}) \quad (3.9)$$

Die Substituenten selbst sind von den realen Systemzuständen  $\alpha$  und  $v$  abhängig:

$$s_{R_1}(v, \alpha), \quad s_{R_2}(v, \alpha), \quad s_{L_1}(v, \alpha), \quad s_{L_2}(v, \alpha)$$



Als Vereinfachung wurde der Kurvenradienunterschied zwischen der äußeren und der inneren Schiene nicht berücksichtigt und die Radien als gleich angenommen. Der Kurvenmindestradius wird mit 25 m angenommen und stellt den Fall größter systematischer Fehler dar. Die Berechnung der Hilfsmessgrößenfunktion wird analytisch in MAPLE durchgeführt. Als Einbauabstand  $L$  der Sensoren wird 20 cm angenommen. Das Ergebnis der Fehlerbetrachtung zeigt im angegebenen Parameterraum der Maximalwerte eine vernachlässigbar kleine systematische Abweichung. Dies spricht für eine Fortführung unter Verwendung dieses Messkonzepts.

## Redundanz

Das abgeleitete Messkonzept verwendet mit seinen vier Sensoren bereits mehr Sensoren als für die eindeutige Bestimmung beider Zustandsgrößen notwendig sind. Die einseitige Anlaufwinkelbestimmung kann mit einem weiteren Sensor an der anderen Seite ergänzt werden, um aus drei Sensorsignalen zusätzlich den Lateralversatz zu bestimmen. Hierfür wird nach Gleichung 3.8 von beiden Radseiten das vordere Sensorpaar verwendet. Der Ausfall eines beliebigen Sensors stellt kein Versagen des Messkonzepts dar, solange der Ausfall zuverlässig erkannt werden kann. Die Zustandsgrößen werden über die verbleibenden drei Hilfsmessgrößen bestimmt (siehe Gleichungen im Abschnitt 3.2.2).

Funktionieren lediglich zwei Sensoren müssen drei Fälle unterschieden werden. Im *ersten Fall* ist ein Sensorpaar zu Bestimmung des Anlaufwinkels funktionstüchtig. Der Lateralversatz kann jedoch nicht bestimmt werden. Es ist stattdessen möglich, die Querposition eines Rades relativ zur Schiene zu bestimmen. Das Fahrwerk kann mit diesem Wissen den Spurkranzabstand eines Rades zur Schiene regeln. Ein Spurkranzanlauf kann verhindert werden. Gleislagefehler haben jedoch einen größeren Einfluss, da diese nicht umfassend gemessen werden können. Das Fahrwerk fährt in diesem Fall nicht gleismittig, sondern ist leicht zu einer Seite versetzt. Im *zweiten Fall*

funktioniert jeweils entweder nur der vordere oder der hintere Sensor auf jeder Radseite. Der Lateralversatz kann aus diesen Hilfsmessgrößen bestimmt werden, der Anlaufwinkel ist dagegen nicht berechenbar. Im *dritten Fall* funktioniert auf der einen Fahrwerkseite nur ein Sensor und auf der anderen Seite der diagonal versetzte Sensor. Eine Anlaufwinkelberechnung ist durch die Kopplung der beiden Räder über das Lenksystem möglich. Der Lateralversatz kann ebenfalls bestimmt werden.

### 3.3 Anforderungen und Problemdefinition

Nach der Auswahl des Messkonzepts in Abschnitt 3.2.2 können die Anforderungen an den Sensor zusammengestellt werden. Abschnitt 3.3.2 fasst abschließend die Entwicklungsaufgabe lösungsneutral zusammen und bildet den Übergang zum ersten Durchlauf des V-Modells nach der Vorgehensweise aus Abschnitt 3.1.

#### 3.3.1 Anforderungen

Der Sensor innerhalb des AGR-Fahrwerks unterliegt Einflüssen aus der Systemumwelt und Anforderungen des AGRs. Die Einflüsse aus Abbildung 1.1 werden im Folgenden erweitert und zu Anforderungen kategorisch zusammengefasst. Abbildung 3.8 zeigt die erweiterten Einflussgebiete. Ein wesentlicher Teil der Anforderungen entsteht aus der Auswahl des Messkonzepts.

**Marktanforderungen** Die Ziele der Verschleißminimierung und der Fahrkomfortsteigerung sind abhängig von der Umsetzung der aktiven Spurführung. Die Erfüllung dieser Anforderungen ergibt sich aus der erfolgreichen technischen Umsetzung des aktiven Fahrwerks und damit der technischen Lösung eines passenden Mess- und Sensorkonzepts.

Die Anforderung der Kostenminimierung ist direkt abhängig von der Anzahl der eingesetzten Sensoren sowie dem Aufbau des Messkonzepts. Das

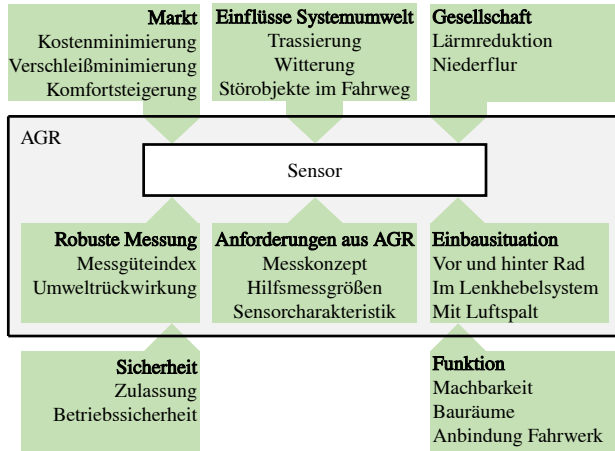


Bild 3.8: Einflüsse auf den Sensor im AGR

Messkonzept sieht eine mechanische Aufhängung von jeweils zwei Sensoren pro Rad vor. Insgesamt benötigt die Straßenbahn demnach pro aktiv gelenkter Achse vier Sensoren. Durch die hohe Anzahl an Sensoren muss der Einzelpreis eines bahntauglichen robusten Sensors bezogen auf die Gesamtkosten niedrig sein. Als Ziel für diese Arbeit wird ein Sensorkonzept mit niedrigen Materialkosten angestrebt. Andere Kostenfaktoren wie Fertigung und Zertifizierung sind schwer abzuschätzen und fallen in die anschließende industrielle Weiterentwicklung des Sensors als Produkt. Eine höhere Lösungsqualität wird mit niedrigeren Herstellungskosten dargestellt. Diese Anforderung steht in Wechselwirkung mit der Betriebssicherheit (siehe auch Redundanz Abschnitt 3.2.2).

**Anforderungen aus der Gesellschaft** Die Lärmreduktion wird wie die Verschleißminimierung und die Fahrkomfortsteigerung durch den Einsatz des aktiven Fahrwerks realisiert. Sie ergibt sich ebenfalls aus der Umsetzung des AGRs. Der Sensor selbst soll keine zusätzlichen Schallemissionen erzeugen.

Das Sensorkonzept soll die Niederflrigkeit des Straßenbahnfahrzeug nicht einschränken. Diese Anforderung steht mit den Anforderungen bezüglich des Bauraums und der technischen Ausgestaltung in Wechselwirkung.

**Sicherheitsanforderungen** Unter dem Gesichtspunkt der Sicherheitsanforderungen wird die betriebliche Sicherheit verstanden. Vom Betrieb und der Nutzung der Straßenbahn soll sowohl für Passanten als auch Fahrgäste zu keiner Zeit eine Gefahr ausgehen. Bezogen auf das Sensorkonzept bedeutet dies die Sicherstellung einer robusten zuverlässigen Messung zu jeder Zeit. Das ausgewählte Messkonzept sieht zur Sicherstellung einer zuverlässigen Messung mehr Sensoren vor als für die Bestimmung der Zustandsgrößen nötig wäre. Dazu wird ein Messgüteindex, welcher die aktuelle Konfidenz des Sensors in die Messgröße beschreibt, eingeführt. Es handelt sich um einen abstrakten dimensionslosen Wert zwischen 0 und 1, welcher der Steuerung mitteilt, inwiefern sie dem Messsignal vertrauen kann. Die übergeordnete Fahrwerksteuerung kann einen eingeschränkt funktionierenden Sensor erkennen und somit die Überführung des Fahrwerks in einen sicheren Zustand umsetzen.

Durch den Einsatz des Sensors soll es keine rückwirkende negative Beeinflussung auf die Systemumwelt der Straßenbahn geben. Dies betrifft sowohl die Straßenbahn selbst, als auch die Menschen darin sowie außerhalb auf der Straße.

**Technikanforderungen** Die technische Umsetzung des Sensors muss bestehende Bauräume sinnvoll nutzen, ohne dabei Begrenzungslinien, insbesondere das Lichtraumprofil der Straßenbahn, zu verletzen. Daraus leitet sich die Anbringung des Sensors oberhalb der Schiene ab. Die Messung erfolgt über einen Luftspalt, sodass eine Zulassung innerhalb bestehender Zulassungsrichtlinien möglich ist.

Die starre mechanische Anbindung erfolgt im Lenkhebelsystem des AGRs. Die Art der Anbindung ergibt sich aus dem abgeleiteten Messkonzept, wel-

ches eine Positionierung der zwei Sensoren im Radschatten davor und dahinter vorsieht. Die konkrete technische Umsetzung ist nicht Teil dieser Arbeit.

**Systemspezifische Anforderungen des AGRs** Aus der Reglerauslegung des AGRs und dem vorgestellten Messkonzept ergibt sich die direkte Messung der Hilfsmessgrößen  $s_*$ . In der Reglerauslegung geht Wei von einer Abtastrate des Sensors von 1000 Hz aus. Dies entspricht der Abtastrate des von ihm untersuchten Laserdistanzsensors. Der neuartige Sensor soll idealerweise mit dieser Abtastrate arbeiten, um eine Reglerneuauslegung zunächst zu vermeiden. In einer Simulation wurde das Verhalten des AGRs unter Verringerung der Abtastrate des Sensors untersucht. Grundsätzlich führt eine Absenkung der Abtastfrequenz nicht direkt zu einem schlechterem Spurführungsverhalten. Es sind jedoch genauere Untersuchungen notwendig, falls der entwickelte Sensor nicht mit 1000 Hz abtastet.

Ein anderer Teil der Reglerauslegung in [54] betrachtet das Messrauschen des Sensors. Wei untersucht auf einem Schienenprüfstand den Laserdistanzsensor hinsichtlich des Rauschverhaltens. Das Rauschverhalten ist eine wichtige Modellierungsgröße der  $\mu$ -Synthese und hat Auswirkungen auf die Performance der aktiven Spurführung. Der Sensor muss eine gleiche oder bessere Rauschcharakteristik aufweisen, um eine Reglerneuauslegung zu vermeiden.

**Einflüsse der Systemumwelt** Ein wichtiger Teilbereich der Systemumwelt einer Straßenbahn sind Trassierungselemente. Das zentrale Element sind dabei die Schienen, die zwischen verschiedenen Schienenprofilen wechseln können. Rillenschienen werden vorwiegend bei Mischverkehr mit dem motorisierten Individualverkehr verlegt. Mit ihnen ist eine durchgehende Asphaltdecke möglich, da sich der Spurkranz innerhalb der Rille bewegt. Andere Fahrzeuge können problemlos die Rillenschiene überfahren. In Rasengleisabschnitten werden innerstädtisch auch teilweise Vignolschienen,

wie sie auch bei der Vollbahn verwendet werden, eingesetzt. Der Sensor soll trotz wechselnder Schienenprofile die Hilfsmessgrößen messen können.

Weitere Trassierungselemente sind Weichen mit beweglicher Zunge, Herzstücke und Kreuzungen. Sie unterbrechen und verändern den sonst durchgehenden Verlauf der Schienen. Diese Trassierungselemente sind an bekannter Stelle im Netz vorhanden. Der Sensor muss diese Elemente sicher erkennen und die sich dadurch ergebende Ungenauigkeiten der Messung im Messgüteindex widerspiegeln.

Zusätzlich zu bekannten Trassierungselementen können Störelemente im Fahrwerk vorhanden sein. Die Witterung stellt mit Regen und Schnee einen solchen negativen Einfluss dar. Weiterhin können weggeworfenen Objekte im Fahrwerk die Funktionsweise des Sensors stören. Die Umwelteinflüsse sind je nach gewählten Sensorkonzept nochmals gesondert zu untersuchen.

#### **3.3.2 Problemdefinition**

Zur Umsetzung des abgeleiteten Messkonzepts aus Abschnitt 3.2.2 wird ein Sensor zur Bestimmung der Hilfsmessgrößen  $s_*$  benötigt. Zwei dieser Sensoren werden im Lenkhebelsystem des AGRs angebracht und befinden sich jeweils vor und hinter dem Rad. Ein Sensor bestimmt gemäß des Messkonzepts den Abstand seiner Position zur Schiene. Der Referenzabstastpunkt an der Schiene muss über jede Messung gleich bleiben und darf nicht von äußeren Einflüssen abhängig sein. Der Punkt kann die Schienenflanke, innen wie außen, oder ein definierter Punkt auf dem Schienenkopf sein. Verschiedene Schienenprofile sollen berücksichtigt werden. Der Sensor soll die Messung berührungslos über einen Luftspalt abbilden, um das Lichtraumprofil der Straßenbahn nicht zu verletzen. Umwelteinflüsse wie Witterung sollen keinen Einfluss auf die Funktionsweise besitzen. Zusätzlich zur Messgröße soll ein abstrakter Wert, im weiteren als Messgüteindex bezeichnet, ausgegeben werden. Dieser Wert wird durch den Sensor berechnet und beschreibt

die aktuelle Konfidenz in die Messung. Dieser Index soll der übergeordneten Steuerung dienen, unzureichend genaue Messungen oder ausgefallene Sensoren zu erkennen, um das Fahrwerk in einen sicheren Zustand zu versetzen. Beeinträchtigungen der Messung entstehen durch Trassierungselemente oder Störobjekte im Gleis. Durch die Zusammenfassung der komplexen Messaufgabe mit Messgröße und Messgüteindex in einem Sensorsystem soll das Potential eines Smarten Sensors gezeigt werden. Die direkte Messung von Zustandsgrößen an einem aktiven Fahrwerk kann auch außerhalb des AGRs weitere experimentelle Untersuchungen ermöglichen.

### **3.4 Makrozyklus I**

Aus der Problemdefinition heraus erfolgt im ersten Makrozyklus die Ideengenerierung und Konzepterarbeitung. Das Konzept wird simulativ auf physikalische Machbarkeit untersucht. Die weitere detaillierte Vorgehensweise wird abschließend aus den gewonnenen Ergebnissen abgeleitet.

#### **3.4.1 Systementwurf**

Gemäß der VDI 2206 wird im Systementwurf das Gesamtsystem des Sensors mit seinen Funktionen in Teilsysteme zerlegt. Abbildung 3.9 analysiert das Sensor-Schiene-System abstrakt. Die Teilsysteme werden mit Eigenschaften und Funktionen beschrieben, um eine übersichtliche Betrachtung der Problemstellung zu ermöglichen. Die systemtechnische Darstellung zur Bestimmung der Hilfsmessgröße dient der Vorbereitung zur Ideenfindung mit Kreativtechniken und verhindert die frühe Einschränkung des Lösungsraums durch technische Festlegungen.

Das Gesamtsystem kann zunächst in zwei Bereiche eingeteilt werden. Schiene und Oberbau bilden den Fahrweg. Darüber bewegt sich der Sensor im AGR und interagiert über den Luftspalt mit der Schiene.

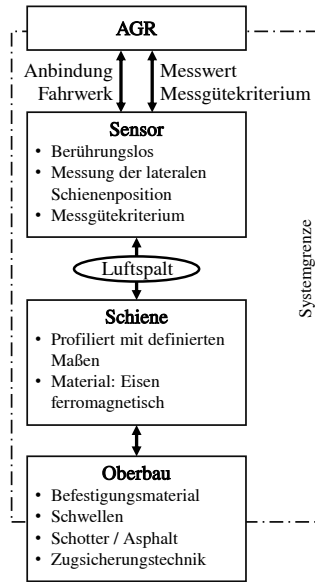


Bild 3.9: Sensor-Schiene-System

Die Schiene ist ein metallisches Objekt mit durch das Profil bestimmten Maßen. Der Oberbau hält die Schiene mit Befestigungsmaterial an den Schwellen fest und leitet die Kräfte in die Erde ab. Weitere Teile am Oberbau sind Komponenten der Zugsicherung. Der Sensor bestimmt berührungslos die Schienenposition über den Luftspalt. Die Position der Schiene muss dabei lediglich in Lateralrichtung erfasst werden. Den Messwert sowie den Messgüteindex gibt der Sensor an das AGR weiter.

In der anschließenden Ideenfindungsphase wird die abstrakte Problembeschreibung mit dem Wissen aus dem Stand der Technik kombiniert. Dabei werden geeignete Wirkprinzipien und Lösungselemente zur Problemlösung gesucht. Bei der Ideenbewertung ist die Überprüfung der Funktionserfüllung durch geeignete Methoden von großer Bedeutung. Die Auswahl einer



geeigneten Lösungsidee wird mit den aufgestellten Anforderungen vorgenommen.

Die ausgewählte Lösungsidee beruht auf folgender Hypothese: Wird ein ferromagnetisches Objekt bekannter Dimensionen in ein zeitlich konstantes, homogenes Magnetfeld eingebracht, so verändert dieses den magnetischen Fluss (Abbildung 3.10). Diese Änderung des Magnetflusses ist auch in größerer Entfernung vom Objekt messbar (gestrichelte Linie) und lässt auf die laterale Position des Objekts im Feld zurückschließen.

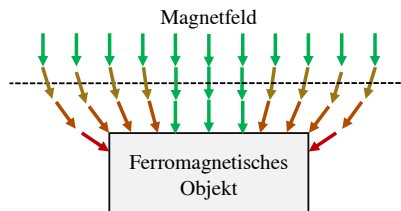


Bild 3.10: Ergebnis der Ideengenerierung: Ferromagnetisches Objekt verändert ein homogenes Magnetfeld messbar

## Neubewertung der Anforderungen

Nach der Lösungsauswahl müssen die Anforderungen innerhalb des Informationschecks erneut geprüft werden, da die Entscheidung zugunsten einer Lösungsidee selbst neue Anforderungen nach sich ziehen kann.

Durch die Nutzung von Magnetfeldern muss der Einfluss der Systemumwelt tiefer gehend betrachtet, und mögliche zusätzliche Magnetfeldquellen müssen charakterisiert werden. Das Erdmagnetfeld stellt mit ca.  $49 \mu\text{T}$  [36] einen möglichen Einfluss dar. Im weiteren Verlauf muss eine negative Beeinflussung der Messung durch das Erdmagnetfeld verhindert oder dessen Einfluss im Sensor kompensiert werden. Abschnitt 3.7.3 beschreibt die Auswirkungen des Erdmagnetfeldes auf den Sensor. Weitere Magnetfeldquellen wie Antriebsmotoren, Magnetschienenbremsen und Zugsicherungssysteme

werden durch ihre fahrzeugspezifische Ausführung hier nicht betrachtet. Das im Sensor verwendete Magnetfeld zur Messung darf keine negativen Rückwirkungen auf die Systemumwelt darstellen. Dies betrifft zum einen technische Systeme der Straßenbahn selbst, sowie Personen, die sich in der Nähe des Sensor aufhalten können.

Da die Messung durch die Änderung des Magnetfelds mit einem definierten Objekt erfolgt, stellen Abweichungen von der bekannten Objektform und weitere ferromagnetische Materialien im Messbereich Störgrößen dar. Die bereits angesprochenen Einflüsse von Trassierungselementen wie das Schienenprofil, Weichen und Kreuzungen sind vorhersehbare und gut modellierbare Ereignisse. Stochastische und in ihrer Ausprägung unbekannte Störgrößen stellen ferromagnetische im Fahrweg befindliche Objekte dar, die nicht der Infrastruktur zuzuordnen sind. Die Erkennung aller Störgrößen soll über den Messgüteindex angezeigt werden.

#### **3.4.2 Modellbildung Sensorkonzept**

Basierend auf der Lösungsidee erfolgt die Ausarbeitung zum Lösungskonzept. Zuerst gilt es, die messbare Veränderung des homogenen Magnetfelds durch ein ferromagnetisches Material nachzuweisen. Die Veränderung muss auch über den Luftspalt von 20 mm ausreichend groß sein, sodass die Position des Objektes im Feld aus ihr berechenbar ist. Hierfür werden zunächst die Veränderungen charakterisiert um ein detaillierteres Systemverständnis zu erhalten.

Zur Konzeptüberprüfung wird in ANSYS Maxwell ein vereinfachtes Modell aufgebaut. ANSYS Maxwell ist eine Software zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen und dient der Berechnung von Magnetfeldern durch die Finite-Elemente-Methode.

Das Modell besteht aus einem rechteckigem Eisenprofil und besitzt die Maße 70 mm auf 50 mm. Die Maße entsprechen dabei ungefähr denen eines S49-Schienenkopfs. Abbildung 3.11 zeigt den Modellaufbau mit einem

konstant aufprägten magnetischen Fluss. Abbildung 3.11 zeigt den Modellaufbau.

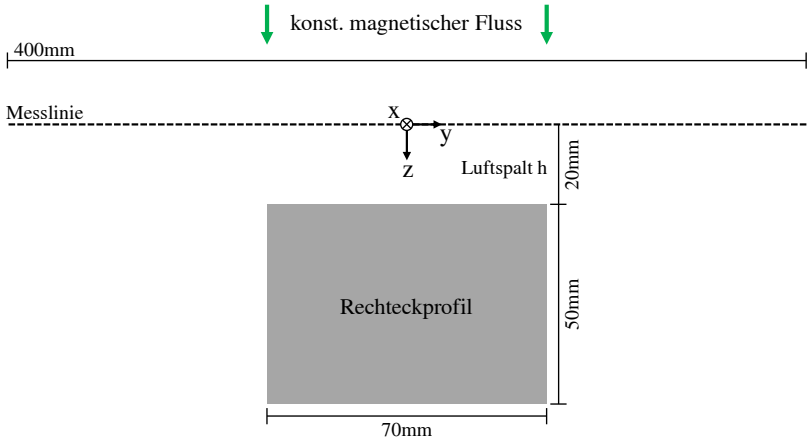


Bild 3.11: Modellaufbau Makrozyklus I - Rechteckiges Eisenprofil in konstantem magnetischen Fluss mit Messlinie

Das Magnetfeld wird indirekt über eine externe Randbedingung aufgebracht und zeigt in z-Richtung. Das Simulationsprogramm erlaubt keine direkte Vorgabe der magnetischen Flussdichte. Stattdessen wird die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  vorgegeben, welche sich über Gleichung 3.10 aus der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  berechnet.  $\mu$  bezeichnet dabei die magnetische Permeabilität an der jeweiligen Raumkoordinate und ist materialabhängig. Im Vakuum wird die magnetische Permeabilität mit  $\mu_0$  bezeichnet und ist konstant. Die magnetische Flussdichte wird auf 1 mT festgelegt, womit sich eine magnetische Feldstärke von ca.  $795 \text{ A m}^{-1}$  ergibt. Durch diese geringe Feldstärke im mT-Bereich sind keine magnetischen Sättigungseffekte in den Materialien zu erwarten. Das vereinfachte Modell wird im Vakuum simuliert, da sich die magnetische Permeabilität von Luft nur unwesentlich von der des Vakuums unterscheidet. Das Simulationsmodell ist in Schie-

nenlängsrichtung (x-Achse) weit ausgedehnt, um Randeffekte durch Profilabbrüche zu vermeiden.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (3.10)$$

### 3.4.3 Nachweis Funktionsprinzip Sensorkonzept

Zur Auswertung der Simulation wird die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  (im Weiteren auch B-Feld, Magnetfeld, Magnetfeldstärke) entlang einer Messlinie quer zur Profillängsrichtung analysiert. Die Messlinie verläuft von  $-200$  mm bis  $200$  mm entlang der y-Achse und schneidet den Ursprung. Die Komponenten werden entsprechend der Richtung mit einem tiefgestellten Index  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  bezeichnet. Der Abstand, auch Luftspalt  $h$ , zwischen Messlinie und Rechteckprofil beträgt nominell  $20$  mm. Die Messlinie stellt die spätere Messebene des Sensors dar. In Abbildung 3.12 wird die magnetische Flussdichte nach den Komponenten  $B_y$  und  $B_z$  getrennt aufgezeigt. Die Komponente  $B_x$  wird nicht betrachtet, da diese durch die Längsausdehnung des Profils entlang der x-Achse keine Veränderung erfährt ( $B_x \cong 0$ ).

Der Verlauf von  $B_y$  zeigt von  $-200$  mm kommend zunächst einen Anstieg von  $0$  bis ca.  $0,2$  mT und fällt danach wieder ab. Die Kurve schneidet bei  $y = 0$  mm die y-Achse und ist im weiteren Verlauf punktsymmetrisch zum Ursprung. Da sich das Profil mittig unter der Profilmesslinie befindet, ist der punktsymmetrische Verlauf plausibel. Der Magnetfeldverlauf wird durch das Profil gekrümmt, da der Fluss durch das ferromagnetische Material geführt wird. Dies liegt an der deutlich höheren magnetischen Permeabilität ferromagnetischer Materialien. Dadurch erhält die y-Komponente einen Anteil zur Profilmitte hin und ist bei  $y < 0$  positiv, bei  $y > 0$  negativ. Abbildung 3.13 verdeutlicht die Entstehung der  $B_y$ -Komponente durch Vektorpfeilerlegung. Punkte in der Nähe der Profilsitenkanten erfahren durch das ferromagnetische Material eine größere Ablenkung zur Profilmitte hin,

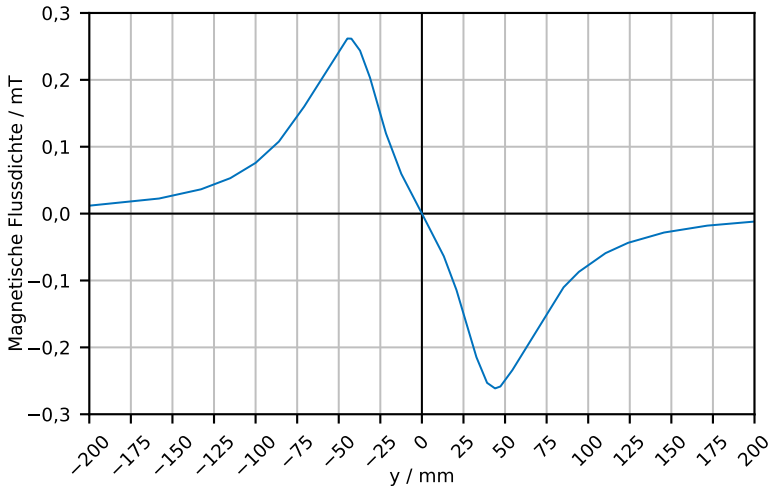
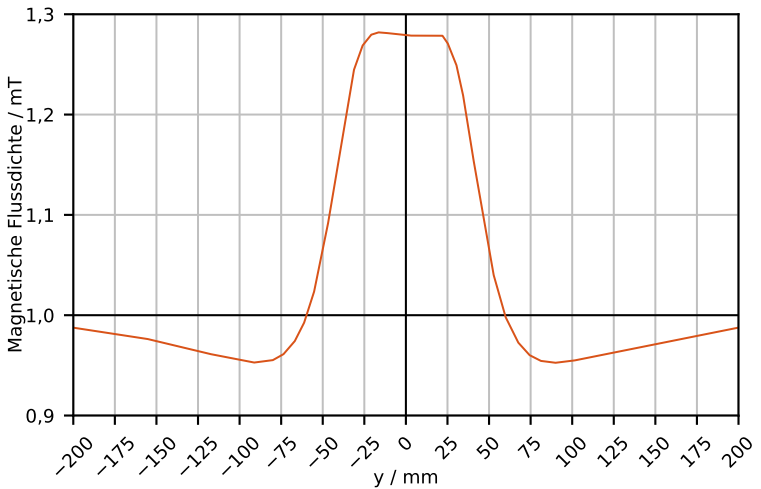
(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$ (b) Magnetfeldkomponente  $B_z$ 

Bild 3.12: Magnetfeldverlauf mit Rechteckprofil bei 1 mT

und somit wird dort der Betrag von  $B_y$  größer. Beim Überschreiten der Profilmitte ändert sich das Vorzeichen von  $B_y$ .

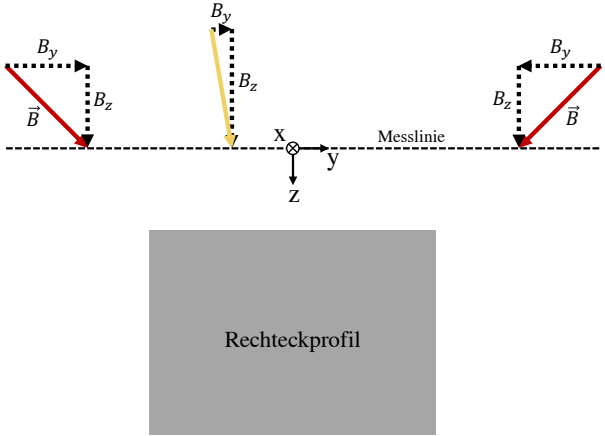


Bild 3.13: Zerlegung B-Feld nach Komponenten mit Messlinie und Rechteckprofil

An der  $B_z$ -Komponente wird die veränderte Flussführung ebenfalls deutlich. Ohne ferromagnetisches Material stellt sich über den gesamten Raum eine konstante Flussdichte von 1 mT ein. Durch Einbringung des ferromagnetischen Profils entsteht eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte von 1 mT auf ca. 1,28 mT im Bereich um das Profil an der Messlinie. In den Randbereichen findet durch die Ablenkung der Magnetfeldlinien zunächst eine Abschwächung der magnetischen Flussdichte statt, die erst später durch die Verstärkung des Materials in z-Richtung kompensiert wird. Grund hierfür sind Effekte der Flussführung an den Profelseitenflächen, die bis zur Messlinie ausstrahlen und sich dort mit dem Einfluss der Profilloberfläche überlagern.

Eine Lateralverschiebung des Profils unterhalb der Messlinie entlang der y-Achse führt zu einer Verschiebung der Kurven  $B_y$  und  $B_z$  um den selben Betrag in entsprechenden Richtung. Der charakteristische Verlauf aus Ab-

bildung 3.12 ändert sich dabei nicht und ist bei sonst gleichen Randbedingungen gleich ausgeprägt.

Luftspaltänderungen spiegeln sich in einer Veränderung des quantitativen Verlaufes wider, der qualitative Verlauf bleibt jedoch ähnlich. Eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte bringt eine gleichermaßen geartete Erhöhung des quantitativen Verlaufes mit sich. Siehe Abbildung 3.14.

Eine Änderung der Profilbreite bei gleichbleibender mittiger Positionierung hat keinen Einfluss auf die Stelle des Nulldurchgangs von  $B_y$  und die Mitte des Maximums von  $B_z$  (Abbildung 3.15).

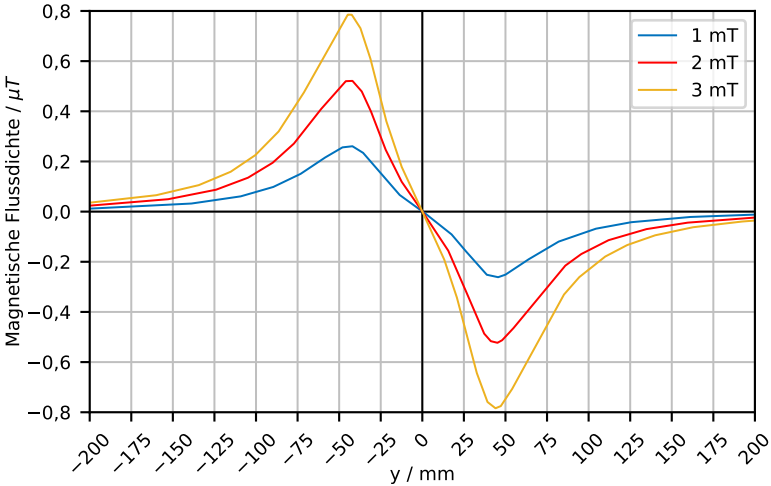
**Fazit** Die Verläufe der Kurven zeigen den Einfluss des ferromagnetischen Materials deutlich. Die Profilmitte in  $y$ -Richtung korreliert in  $B_y$  mit dem Nulldurchgang der Kurve und in  $B_z$  mit der Mitte des Maximumplateaus. Durch diese Korrelationen zwischen Lateralposition des Profils und den Kurvenverläufen  $B_y$  und  $B_z$  ist die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Bestimmung der Lateralposition des Profils aus den Magnetfeldmessdaten augenscheinlich möglich. Eine Fortführung der Sensorentwicklung ist somit sinnvoll.

## 3.5 Makrozyklus II

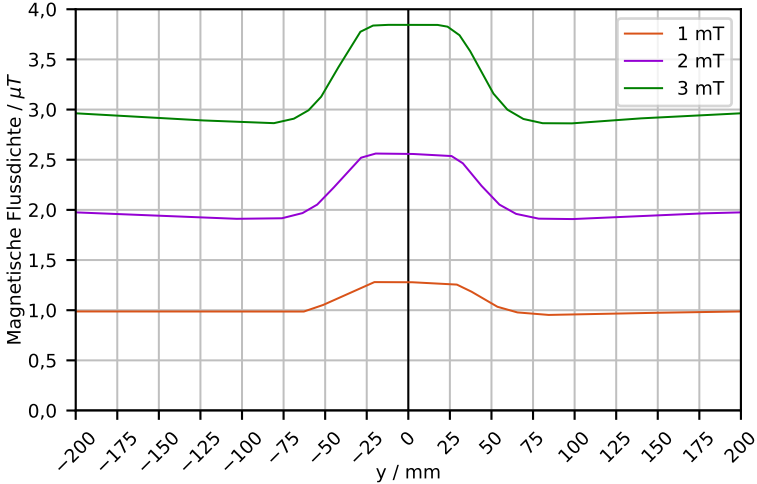
In Makrozyklus I wurde der Einfluss eines ferromagnetischen Rechteckprofils im Magnetfeld charakterisiert. Das verwendete Simulationsmodell ist jedoch vereinfacht und muss für die weitere technische Umsetzung verfeinert werden. In Makrozyklus II wird die Vorstufe des Sensorprototyps entwickelt und die Funktionsweise dessen ähnlich Makrozyklus I nachgewiesen.

### 3.5.1 Neubewertung der Anforderungen

Die Messlinie stellt in Makrozyklus I den räumlichen Ort der Erfassung der B-Feld-Komponenten dar, wobei  $B_x$  vernachlässigt werden kann. Zur



(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$



(b) Magnetfeldkomponente  $B_z$

Bild 3.14: Magnetfeldverlauf bei verschiedenen Feldstärken mit Rechteckprofil



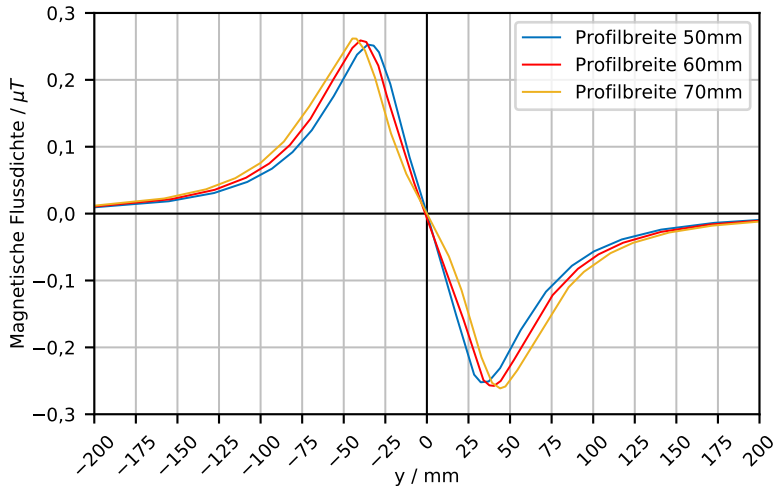
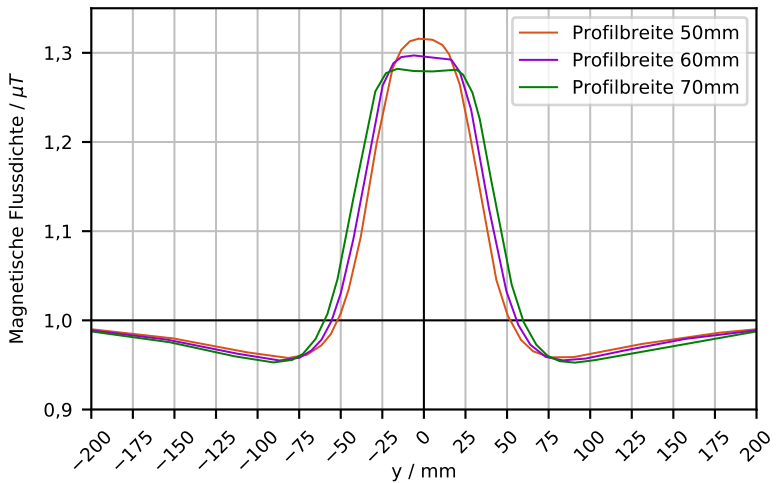
(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$ (b) Magnetfeldkomponente  $B_z$ 

Bild 3.15: Magnetfeldverlauf bei verschiedenen Profilbreiten des Rechteckprofils

technischen Umsetzung müssen entlang dieser Messlinie die verbleibenden Komponenten  $B_y$  und  $B_z$  erfasst werden. Physikalische Messeffekte sind örtlich beschränkt, und eine kontinuierliche Abtastung der Magnetfeldgrößen entlang einer Linie ist technisch schwer darstellbar. Die Magnetfeldkomponenten sollen daher an diskreten Stellen durch virtuelle Sensorelemente abgetastet werden. Es muss dabei sichergestellt werden, dass die Diskretisierung die Kurvenverläufe des Magnetfelds in ausreichender Genauigkeit abbilden kann.

Das angenommene homogene Magnetfeld muss künstlich hergestellt werden. Hierzu ist eine technische Vorrichtung vorzusehen, die ein Magnetfeld in geeigneter Weise dauerhaft im Sensor erzeugen kann. Zusätzlich muss der Einfluss des Magnetfelds auf die Umwelt abgeschätzt werden. Organisches Gewebe kann durch Magnetfelder beeinträchtigt werden. In der Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes wird bei statischen Magnetfeldern ein Grenzwert von  $500 \mu\text{T}$  festgelegt [3], welcher im weiteren Verlauf berücksichtigt werden muss (siehe Abschnitt 3.7.4). Die Rückwirkung auf Komponenten der Straßenbahn kann im Rahmen dieser Arbeit nicht abgeschätzt werden.

Die mechanische Stützstruktur, die alle Teilsysteme vereint und trägt, soll keine magnetischen Eigenschaften haben, die die Magnetfeldausbreitung zusätzlich verändern. Dies dient der Vereinfachung der Simulationsmodelle und des Prototypenbaus, da weniger Bauteile in der Magnetfeldberechnung und -auslegung berücksichtigt werden müssen.

Die idealisierte Schienenform als Rechteckprofil soll realitätsgetreuer werden. Da in Straßenbahnnetzen verschiedene Schienenprofile zum Einsatz kommen, soll in diesem Durchlauf bereits der Einfluss einer Standardvignolschiene untersucht werden. Die Simulationen sollen dazu mit dem S49-Profil durchgeführt werden.

### 3.5.2 Systementwurf Hallsensorarray

Mit den erweiterten Anforderungen wird das Sensorkonzept konkretisiert. Im Folgenden wird das Sensorkonzept in die zwei Teilsysteme *Magnetfelderzeugung* und *Magnetfeldmessung* zerlegt, welche einzeln entwickelt werden.

#### **Magnetfelderzeugung**

Nach den Anforderungen ist die Erzeugung eines künstlichen homogenen Magnetfelds notwendig. Eine einfache und oft verwendete Art Magnetfelder zu erzeugen sind gewickelte Spulen aus Kupferdraht. Der Kupferdraht wird dabei um einen geeigneten Träger, der für die mechanische Stabilität sorgt, aufgewickelt. Der Träger kann durch geeignete Materialwahl magnetische Eigenschaften aufweisen, die die Magnetfeldbildung beeinflussen und das magnetische Verhalten bestimmen. Nach einer weiteren Anforderung soll der Träger zunächst keine magnetischen Eigenschaften aufweisen. Dies ist bei der Materialwahl zu berücksichtigen.

Als Querschnitt der umlaufenden Spule werden zunächst  $10\text{ mm} \cdot 10\text{ mm} = 100\text{ mm}^2$  als Bauraum angenommen. Die Spule umschließt dabei das Teilsystem der Magnetfelderfassung und der mechanische Aufbau soll aus Kunststoff bestehen, da dieser keine magnetisch relevanten Eigenschaften besitzt. Die Fertigung des Trägers soll mittels 3D-Druck erfolgen, um schnelle Iterationen der mechanischen Struktur abbilden zu können.

**Spulenauslegung** Für den späteren Prototypenbau wird eine handgefertigte Spule ausgewählt, da diese in den Fertigungsmöglichkeiten des Instituts abbildbar ist und ebenfalls analog zum 3D-Druck des Trägers schnelle Iterationszyklen ermöglicht.

Handgefertigte Spulen werden in der Wickeltechnik als *wilde Wicklung* bezeichnet und erreichen nicht den Füllfaktor maschinell gewickelter Spulen. Der Füllfaktor gibt an welcher Anteil des Spulenquerschnitts aus Kupfer

besteht und zur Stromleitung beiträgt. Je höher der Füllfaktor desto höher ist die erreichbare Stromdichte bei gleichbleibender Stromstärke der Einzeldrähte. Nach [20] kann für die wilde Wicklung die Windungszahl gemäß Gleichung 3.11 näherungsweise berechnet werden. Auf dem angenommenen Querschnitt können etwa 400 Windungen erreicht werden. Als Drahtdurchmesser werden 0,5 mm (Standarddrahtdurchmesser vieler Spulen, siehe auch [20]) angenommen.

$$n = \frac{b \cdot b}{d^2} = 400 \quad \text{mit} \quad b = 10 \text{ mm}, d = 0,5 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Die Herstellerangaben eines Kupferlackdrahtes beziehen sich stets auf den Kupferdurchmesser. Daher besitzt Kupferlackdraht aufgrund der zusätzlichen isolierenden Lackschicht einen leicht größeren Durchmesser. Die tatsächlich erreichbare Windungszahl wird aus diesem Grund niedriger ausfallen.

Ist die Windungszahl bekannt, kann die Gesamtstromstärke der Spule bestimmt werden. Die Gesamtstromstärke wird als Randbedingung in der Simulation benötigt und bezieht sich stets auf den durchflossenen Querschnitt. Aus dem Stromfluss durch den Spulenleiter berechnet das Simulationsprogramm die Magnetfeldausbreitung. In der Auswertung kann dann die Magnetfeldstärke an den einzelnen Raumpunkten ausgegeben werden. Die analytische Berechnung der Magnetfeldstärke für Luftspulen in den geforderten Maßen ist nur schwer genau bestimmbar und hängt zudem stark von der Geometrie ab.

Mit der abgeschätzten Windungszahl und der maximalen Strombelastbarkeit  $I_D$  des Kupferlackdrahts von 700 mA [7] ergibt sich die Gesamtstromstärke  $I_S$  durch den Spulenquerschnitt nach Gleichung 3.12 zu 280 A.

$$I_S = n \cdot I_D = 400 \cdot 700 \text{ mA} = 280 \text{ A} \quad (3.12)$$

Soll eine größere magnetische Flussdichte erreicht werden, so kann zum einen die Windungszahl oder der Strom im Draht erhöht werden. Bei gleichbleibender Querschnittfläche kann eine höhere Windungszahl über bessere Fertigungsverfahren erfolgen.

## **Magnetfeldmessung**

Da eine kontinuierliche Abtastung des Magnetfeldes an der Messlinie technisch schwer umsetzbar ist, wird das Magnetfeld daher durch virtuelle Sensorelemente an diskreten Punkten entlang der Messlinie abgetastet. Zur Abtastung (quasi-)statischer Magnetfelder eignet sich als physikalisches Messprinzip der Halleffekt (siehe Abschnitt 2.4). Die virtuellen Sensorelemente werden in der Simulation daher als Hallelemente implementiert. Ein Hallelement misst dabei in allen Raumrichtungen die Komponenten  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$ . Die vielfache Nutzung einzelner gleicher Hallsensorelemente zur Abtastung entlang einer Messlinie wird in dieser Arbeit als Hallsensorarray bezeichnet. Der Begriff Hallsensorarray bezeichnet dabei die Gesamtheit der Sensorelemente zur Messung der Magnetfeldkomponenten sowie notwendiger Elektronik zur Messdatenaggregation aller Sensoren an zentraler Stelle.

Als Diskretisierungsabstand zwischen zwei Hallelementen wird zunächst 5 mm verwendet. In der Eigenschaftsabsicherung soll den diskretisierten Kurvenverläufen der Magnetfeldkomponenten eine ausreichende Genauigkeit nachgewiesen werden. Eine ausreichende Genauigkeit ist dann erreicht, wenn mit den Messdaten des Hallsensorarrays die Lateralposition gemäß den Anforderungen berechnet werden kann.

Der charakteristische Teil der Kurvenverläufe von  $B_y$  und  $B_z$  soll stets innerhalb des erfassten Bereichs des Hallarrays liegen und dem Algorithmus zur Berechnung der Lateralposition als Eingangswert dienen. Die Schiene mit einer Kopfbreite von 70 mm bewegt sich durch die Laufkinematik nur wenig unter dem Sensor. Wird die maximale Verschiebung des Sensors

im Messkonzept durch Anlaufwinkel, Lateralversatz und Kurvenkrümmung berechnet, so beträgt diese maximal  $\pm 8$  mm. Der äußerste Punkte des Profils unter dem Sensor erreicht damit  $\pm 43$  mm in Lateralrichtung<sup>1</sup>. Für eine ausreichende Messdatenbasis soll sich zu jeder Zeit der Profilquerschnitt unterhalb des Hallarrays befinden. Der Messbereich des Hallarrays wird mit einem zusätzlichem Sicherheitszuschlag auf  $\pm 50$  mm festgelegt. An dieser Stelle in der Entwicklung ist zudem nicht gesichert, dass die Messwerte des Hallsensorarrays, die sich direkt über dem Profil befinden, ausreichen die Lateralposition in gewünschter Genauigkeit zu bestimmen. Der Messbereich für den Prototypen wird daher verdoppelt und das Hallarray soll einen Bereich von  $\pm 100$  mm überspannen.

Zu einem späteren Zeitpunkt kann durch die Nichtverwendung der äußeren Hallelementmesswerte auf beiden Seiten der Messbereich künstlich verkleinert werden und Algorithmen auf der reduzierten Datenbasis können untersucht werden. Es ist nicht notwendig einen weiteren Prototypen mit verkürztem Messbereich oder einer geänderten Anzahl an Hallelementen aufzubauen.

Mit der Diskretisierungsweite von 5 mm ergibt sich eine Gesamtanzahl von 41 Sensorelementen auf 200 mm Länge.

#### 3.5.3 Modellbildung Hallsensorarray

Das Simulationsmodell wird um die vorher ausgelegte Kupferspule zur Erzeugung eines Magnetfeldes erweitert. Die Spule umschließt dabei in der x-y-Ebene die Messlinie mit den einzelnen Sensorelementen. Die Spule wird als Rechteckspule mit abgerundeten Ecken (Innenradius 10 mm) modelliert. Sie besteht vollständig aus Kupfer und wird über die *stranded*-Eigenschaft in ANSYS Maxwell als Spule mit Einzeldrähten definiert. Die *stranded*-Eigenschaft verhindert die Berechnung von Wirbelströmen im Kupfer, die sich

---

<sup>1</sup> Die äußerste Kante des Schienenprofils liegt bei  $\pm 35$  mm. Mit der Bewegung durch die Kinematik des Messkonzeptes von  $\pm 8$  mm erhält man  $\pm 43$  mm.

sonst im Vollmaterial ausbilden würden. Als Erregerstrom werden 280 A durch eine Randbedingung vorgegeben. Die genauen Maße sind Abbildung 3.16 zu entnehmen. Hallsensorelementpositionen sind als blaue Kreuze dargestellt. Die Messlinie und die Spulenunterseite befinden sich in  $z$ -Richtung auf der gleichen Höhe ( $z = 0$ ).

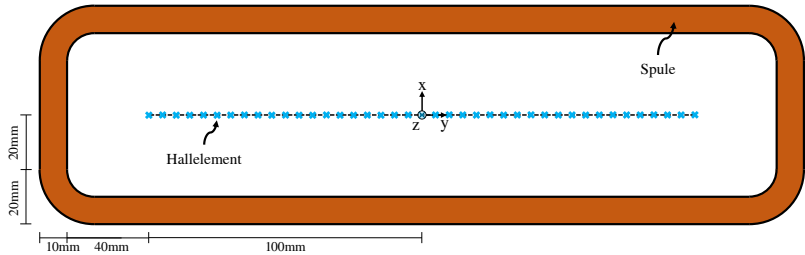


Bild 3.16: Draufsicht auf Rechteckspule mit Hallelementen in der Mitte

Das Rechteckprofil wird zunächst weiterverwendet und später durch ein S49-Vignol-Profil ersetzt (siehe [52]). Der Luftspalt beträgt nominal 20 mm.

### 3.5.4 Funktionsnachweis Hallsensorarray

Die Nachweisführung erfolgt in drei Teilen. Zunächst wird die freie Magnetfeldausbreitung ohne ferromagnetisches Material analysiert und beschrieben. Im zweiten Teil wird der Einfluss des Rechteckprofils aus Makrozyklus I simuliert und ausgewertet. Abschließend wird im dritten Teil das Rechteckprofil durch ein S49-Profil ersetzt. Die Unterschiede zwischen Rechteckprofil und S49-Profil werden aufgezeigt.

Die Auswertung der Magnetfeldkomponenten erfolgt im den folgenden Diagrammen über die virtuellen Sensorelemente an ihren diskreten Positionen.

## **Auswertung der Magnetausbreitung ohne Profil**

Ein durchgehend homogenes Magnetfeld zu erzeugen ist physikalisch nicht möglich. Ausgestreckte Spulen wie die verwendete Rechteckspule sind jedoch in der Lage innerhalb des Wicklungsraums ein in Grenzen homogenes Feld zu erzeugen. Durch die Quellenfreiheit magnetischer Felder ergeben sich an den Rändern der Spule stets Inhomogenitäten, da Magnetfeldlinien in sich geschlossen werden müssen.

Abbildung 3.17 zeigt die simulierten Messwerte der Hallsensorelemente. Das Magnetfeld ist punkt- bzw. achsensymmetrisch zur Mitte der Spule, steigt an den Rändern betragsmäßig an. Die gewählte Stromstärke von 280 A führt zu einer minimalen Flussdichte in z-Richtung von ca. 3,23 mT. Der ursprüngliche Verlauf zwischen den Messpunkten des 5 mm-Rasters ist gut erkennbar. Da Magnetfelder sich stetig ausbreiten und keine Sprünge aufweisen, kann der kontinuierliche Verlauf der Feldausbreitung durch Interpolationsverfahren gut rekonstruiert werden. Das Verarbeiten der Messpunktdaten für den Algorithmus ist Teil von Kapitel 4.

## **Auswertung mit Rechteckprofil**

Im zweiten Schritt wird die Simulation mit dem bereits definierten Rechteckprofil durchgeführt. Die anderen Randbedingungen sind unverändert. Abbildung 3.18 zeigt die Verläufe in y- und z-Richtung. Trotz des inhomogenen Magnetfeldes ist der charakteristische Verlauf von  $B_y$  und  $B_z$  aus Makrozyklus I erkennbar und stark ausgeprägt. Verfahren zur qualitativen Verbesserung der charakteristischen Verläufe und Entfernen der Inhomogenitäten aus den Messdaten sind Teil von Kapitel 4.

## **Auswertung mit S49-Profil**

Im letzten Nachweisschritt wird das Rechteckprofil durch ein Schienenprofil ersetzt und der magnetische Einfluss einer S49-Vignolschiene untersucht



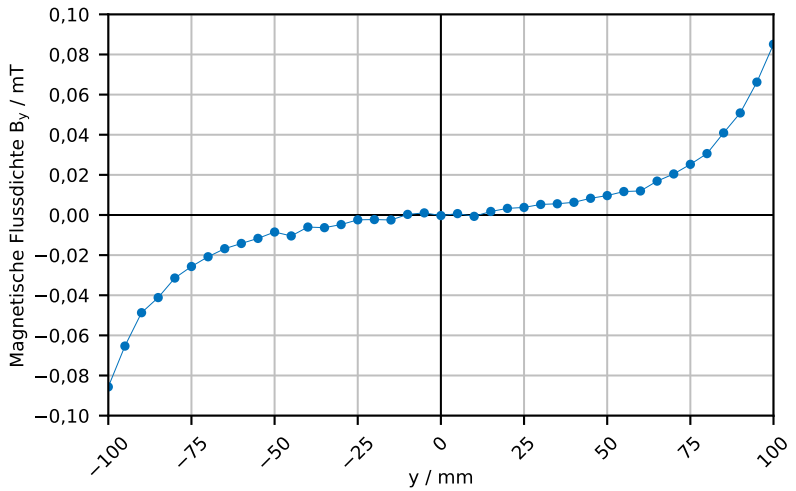
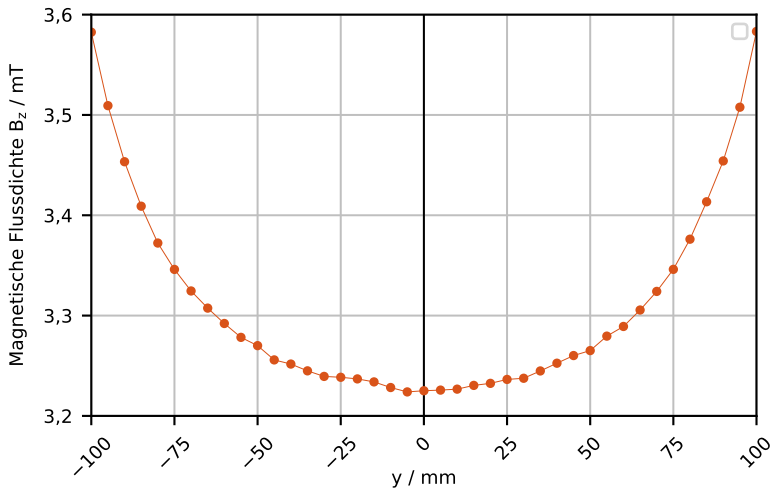
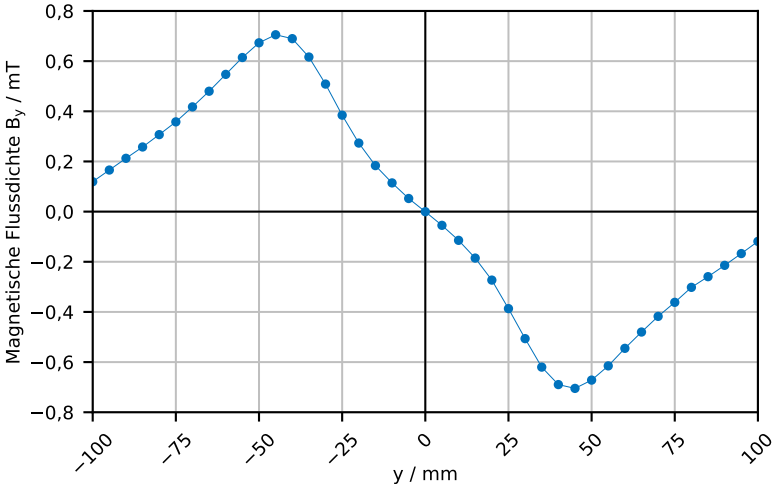
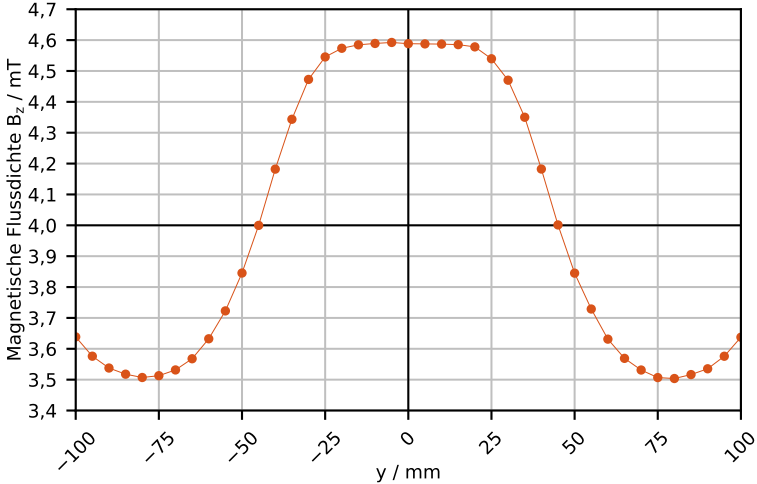
(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$ (b) Magnetfeldkomponente  $B_z$ 

Bild 3.17: Magnetfeldverlauf der ovalen Spule ohne weiteres ferromagnetisches Material



(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$



(b) Magnetfeldkomponente  $B_z$

Bild 3.18: Magnetfeldverläufe des Rechteckprofils mit 280 A Spulenstrom

(siehe Abbildung 3.19). Werden die  $B_y$ -Verläufe des Rechteckprofils und

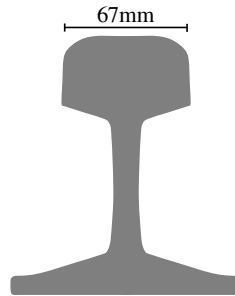
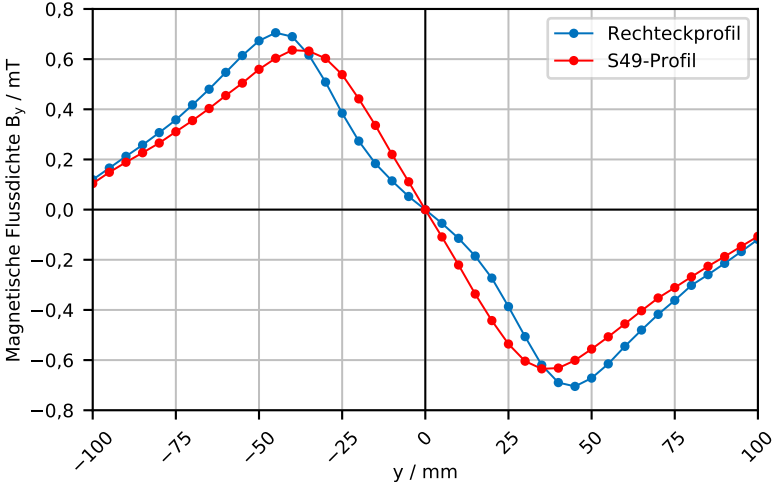


Bild 3.19: S49-Schienenprofil mit 67 mm Kopfbreite [52]

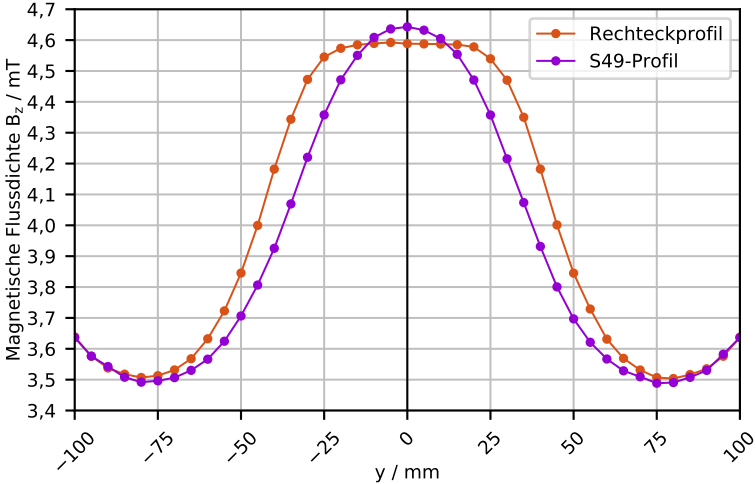
des Vignolprofils (Abbildung 3.20a) verglichen, so ist die Kurve des Vignolprofils glatter und weniger markant ausgeprägt. Betragsmäßig liegt das Maximum des Vignolprofils unterhalb des Rechteckprofils. Die Abweichungen in  $y$ -Richtung können auf die Abrundung des Schienenkopfs und die kleinere Kopfbreite des Profils zurückgeführt werden. Grundsätzlich sind die Verläufe des Vignolprofils ähnlich und bieten weiterhin markante Stellen als Basis für Algorithmen zur Berechnung der Lateralposition. In  $z$ -Richtung erfährt die Magnetfeldkomponente eine stärkere Überhöhung durch das Rechteckprofil, und das Maximum ist runder ausgeprägt (Abbildung 3.20b). Dies liegt an der Schienenkopfbreite des S49-Profils, welche im Vergleich zum gewählten Rechteckprofil um 3 mm kürzer ausfällt.

## Fazit

Die Simulationen sind konkretisiert und das Sensorkonzept bereits technisch ausgereifter sowie näher an der Realität als dies in Makrozyklus I der Fall ist. In Makrozyklus II zeigt das Vignolschienenprofil ähnliche charakteristische Kurven wie die des Rechteckprofils. Messdaten mit markanten Stellen als Grundlage für die Berechnung der Lateralposition aus den Sensorrohdaten sind vorhanden. Die Entwicklung des Berechnungsalgorithmus



(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$



(b) Magnetfeldkomponente  $B_z$

Bild 3.20: Vergleich der Magnetfeldverläufe von Rechteckprofil und S49-Profil

wird in dieser Arbeit in Kapitel 4 beschrieben, findet aber während des gesamten Entwicklungsprozesses parallel an den simulierten Daten statt. Das Hallarray weist das Potential als Sensorkonzept nach, und die Entwicklung wird fortgesetzt.

### **3.6 Makrozyklus III**

Im letzten Makrozyklus wird das Sensorkonzept prototypisch aufgebaut. Nach dem Systementwurf wird in den Einzeldomänen die technische Ausgestaltung vorgenommen und in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Die Teillösungen werden in der Systemintegration zusammengesetzt und in Betrieb genommen. Unterstützt wird der Prozess durch das durchgehende Simulationsmodell und experimentelle Teilversuche.

Parallel zur Konzeptumsetzung wird zur abschließenden Eigenschaftsabsicherung ein Prüfstand entwickelt.

#### **3.6.1 Neubewertung der Anforderungen**

Die Diskretisierung der Abtastungspunkte soll durch einzelne Sensorelemente dargestellt werden. Die Sensorelemente müssen dabei einen kleinen Bauraum aufweisen, um den angestrebten Abstand der Sensormessmittelpunkte von 5 mm zu realisieren (Diskretisierungsabstand).

Die Sensorelemente müssen eine Messung des Magnetfeldes zeitsynchron durchführen. Dies bedeutet, dass jedes Sensorelement zur gleichen Zeit eine Messung startet. Durch einen zeitlichen Versatz des Messbeginns einzelner Sensorelemente können Artefakte entstehen. Die Messwerte der einzelnen Hallelemente ergeben in diesem Fall keine Momentaufnahme der Magnetfeldausbreitung, wie sie für die Lateralpositionsbestimmung notwendig ist. Diese Anforderung ist von besonderer Bedeutung, da der Sensor an der Straßenbahn befestigt ist und die Schienenposition sich durch die Bewegung der Straßenbahn im Netz schnell unter dem Sensor verändert. Die durch Zeit-

versatz entstehenden Artefakte sind vergleichbar denen, die als Bewegungsunschärfe bei Kameras bekannt sind.

Die Spule wurde bereits in Makrozyklus II elektrisch ausgelegt. In diesem Durchlauf muss zusätzlich die mechanische Stützstruktur berücksichtigt werden. Ein geeigneter Träger zum Aufwickeln der Spule ist Teil davon. Der Träger soll dabei die magnetischen Eigenschaften der Spule nicht beeinflussen. Die durch die Spule erzeugte Wärme darf keinen negativen Einfluss auf den Träger selbst oder dessen Umgebung besitzen.

Der Spulenträger muss mit weiteren Stützstrukturen verbunden werden, so dass der Sensor im Ganzen zusammengehalten wird. Der Sensorprototyp soll dabei ebenfalls die passende mechanische Aufnahme zur Befestigung am Prüfstand besitzen. Die Sensorelektronik soll ebenfalls in die mechanische Stützstruktur integriert werden.

#### **3.6.2 Systementwurf Prototyp**

Das in Makrozyklus II verwendete Simulationsmodell dient als Basis der technischen Ausgestaltung. Der Spulenträger wird in Form der Rechteckspule ausgeführt und aus Kunststoff gefertigt. Er besitzt seitliche Führungswände zur mechanischen Stabilisierung und Führung der Kupferdrahtwicklung. Als Material kommt PLA (Polylactide, Kunststoff auf Milchsäurebasis) im 3D-Druck nach dem FDM-Verfahren (Fused Deposition Modelling) zu Einsatz [13]. Durch den 3D-Druck sind kurze Fertigungszeiten und damit kurze Iterationszyklen bei der mechanischen Ausgestaltung möglich. Zusätzlich erlaubt der 3D-Druck gestalterische Freiheiten, die andere Fertigungsverfahren nicht bieten können.

Als Hallelemente kommen zugekaufte integrierte Hallelemente mit digitaler Busanbindung zum Einsatz. Diese werden auf einer den gesamten Messbereich überspannenden Platine aufgelötet und elektrisch angebunden (Hallarrayplatine). Die weitere notwendige Ansteuerelektronik und Spannungsversorgung wird auf einer zusätzlichen Platine außerhalb des Einfluss-

bereichs der Erregerspule angebracht, um Störeinflüsse durch das Magnetfeld auf die Elektronik so gering wie möglich zu halten. Sie stellt das Bindeglied zwischen Hallsensorarray und einem Rechner dar, der die Sensorrohdaten erfasst. Auf ihr sorgt ein Mikrocontroller für die Anbindung der Hallelemente über den digitalen Bus und stellt die Daten anschließend über eine USB-Schnittstelle dem Rechner zur Verfügung.

Eine mechanische Verbindungsstruktur trägt die Hallarrayplatine in der Mitte der Spule. Die Sensormittelpunkte der Hallelemente liegen dabei auf der vorher definierten Messlinie. Die mechanische Verbindungsstruktur und die Trägerstruktur der Spule können gegebenenfalls integriert werden.

### 3.6.3 Domänenspezifischer Entwurf

Die im Systementwurf gewählten Konzepte werden nun in den Einzeldomänen ausgearbeitet. Im Folgendem wird im Elektronikentwurf sowohl die Hallarrayplatine als auch die Ansteuerplatine gestaltet. In der Softwareentwicklung wird die Firmware für den Mikrocontroller der Ansteuerplatine und die Software des Rechners beschrieben. Der mechanische Entwurf integriert die Elektronik und den Spulenträger in der mechanischen Stützstruktur.

#### Elektronikentwurf

Zuerst wird ein passendes Hallelement mit digitaler Busanbindung ausgewählt. Anschließend erfolgt die Entwicklung der Ansterelektronik des Hallarrays. Wichtig ist hierbei die zeit-synchrone Messdatenerfassung aller Hallelemente. Die Ansteuerplatine wird in Form eines käuflichen Mikrocontrollerboards umgesetzt, um eine Eigenentwicklung an dieser Stelle zu vermeiden.

**Hallelement** Zur Erfassung der Magnetfeldkomponenten  $B_y$  und  $B_z$  wird ein Hallensorelement des Typs MLX90393 eingesetzt [32]. Diese Sensor-

elemente zeichnen sich durch eine sehr kleine Gehäusegröße von 3 mm auf 3 mm aus. Die Höhe beträgt 1 mm. In einem Vorversuch des Platinenlayouts konnte der Abstand von 5 mm zwischen zwei Sensorelementen realisiert werden. Der minimal erreichbare Abstand zweier Elemente beträgt etwa 4,5 mm bei einer Leiterbahnbreite von 0,25 mm.

Die Sensorelemente messen das Magnetfeld in allen drei Raumrichtungen sowie zusätzlich die Temperatur im Element für eine interne Temperaturkompensation. Der Messbereich kann zwischen  $\pm 5$  mT und  $\pm 50$  mT durch Programmierung frei gewählt werden. Die Auflösung der ausgegebenen Messwerte beträgt 16 Bit.

Das Hallelement verfügt über eine digitale Busanbindung mit einer maximalen Taktrate des Busses von 10 MHz.

Über einen speziellen *Auslöseanschluss* (Trigger-Line) kann eine Messung des Hallelements von außen gestartet werden. Dies ermöglicht es mehrere Hallelemente zu synchronisieren.

**Hallarrayplatine** Die Hallelemente werden auf einer Platine angeordnet (Abbildung 3.22b). Unterhalb der Sensorelemente werden keine Leiterbahnen verlegt. Kupfer ist paramagnetisch und beeinflusst die Messung unwesentlich, allerdings erzeugt ein dort fließender Strom ein Magnetfeld, welches die Messung beeinflussen kann. Der elektrische Aufbau kann in vereinfachter Form Abbildung 3.21 entnommen werden.

Die Sensorelemente werden an einen gemeinsamen Bus angeschlossen und zentral von einem Mikrocontroller angesprochen. Durch Einschränkungen des Bussystems muss die Anzahl der Hallelemente von 41 auf 40 reduziert werden, da lediglich 40 Busteilnehmer vom Mikrocontroller in der geplanten technischen Ausgestaltung angesprochen werden können. Der Messbereich verringert sich auf  $-97,5$  mm bis  $97,5$  mm unter Beibehaltung des Elementabstandes von 5 mm.

Die Abtastfrequenz aus den Anforderungen beträgt 1000 Hz. Zur Auslegung der Busanbindung wird angenommen, dass jedes Hallelement die ge-



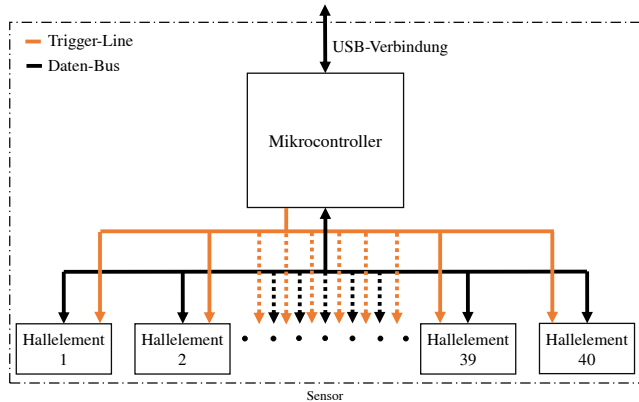


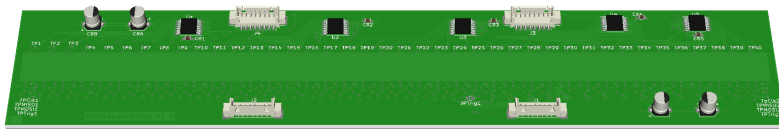
Bild 3.21: Aufbau Hallarraysensor

wünschte Abtastrate erfüllen kann. Daraus kann mit Gleichung 3.13 die minimal nötige Datenübertragungsrate für die Busanbindung abgeschätzt werden. Die Hallelemente sind mit einer maximalen Busfrequenz von 10 MHz betreibbar, was einer theoretisch maximalen Datenrate von 10 Mbit pro Sekunde entspricht. Der Bus ist demnach im schlechtesten Fall zu 32% ausgelastet und hat ausreichende Reserven. Die Reserve ist notwendig, da die Umschaltung von einem Hallelement zum anderen in der sequentiellen Abfrage der Messdaten ebenfalls Zeit benötigt.

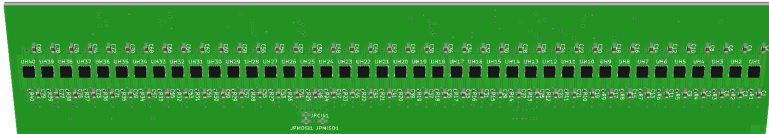
$$Datenrate_{min} = n_{Sensor} \cdot 10 \text{ Bytes} \cdot 8 \frac{\text{Bit}}{\text{Byte}} \cdot 1000 \text{ Hz} = 3,2 \frac{\text{MBit}}{\text{s}} \quad (3.13)$$

Die Triggereingänge aller Hallelemente werden miteinander verbunden. Ein elektrischer Puls auf dieser Leitung löst die gleichzeitige Messung aller Elemente aus.

Abbildung 3.22a zeigt die Oberseite der Platine mit Steckverbindern zur Ansteuerung, Abbildung 3.22b die Unterseite. Die Platine ist doppelseitig



(a)



(b)

Bild 3.22: Hallarrayplatine Oberseite mit Anschlüssen (a) und Unterseite (b) mit Hallelementen

bestückt, und alle Hallelemente befinden sich auf der Unterseite der Platine. Durch diese Bauweise befinden sich die Hallelemente möglichst nah zum darunterliegenden Schienenprofil. Die Magnetfeldveränderung durch das Profil ist dort stärker ausgeprägt und nimmt zur Spulenmitte hin ab.

### Soft- und Firmwareentwicklung

Für den Betrieb des Hallsensorarrays sind verschiedene Softwarekomponenten notwendig. Die Ansteuerplatine verfügt über eine eigene Software, die auf integrierten Systemen Firmware genannt wird. Für die prototypische Entwicklung wird die Messdatenerfassung und die Messdatenauswertung (Lateralpositionsbestimmung) getrennt entwickelt. Das Hallsensorarray gibt lediglich die Sensorrohdaten an einen Rechner weiter. Die Daten werden erst dort mit einer weiteren Software verarbeitet. In einem einsatzfähigem Produkt an der Straßenbahn sind diese beiden Teile im Sensor integriert. Die Trennung erlaubt jedoch eine schnelle und unkomplizierte Softwareentwicklung.

**Firmware für Ansteuerelektronik** Die Firmware der Ansteuerelektronik besitzt zwei Hauptaufgaben, die durch die USB-Schnittstelle gesteuert werden können. Sie stellt das Bindeglied zwischen dem Daten-Bus der Hallelemente und dem USB-Bus des Rechners dar.

Nach dem Einschalten des Hallarrays befinden sich die einzelnen Hallelemente in der Grundkonfiguration des Herstellers. Diese Konfiguration eignet sich nicht für die zeit-synchrone Messung der Hallelemente. Die Firmware konfiguriert daher die Hallelemente nach den Vorgaben des Rechners neu. Gesetzt werden dabei auch die Einstellungen zur analogen Vorverstärkung, des digitalen Filters und des Oversamplings. Sobald dieser Vorgang abgeschlossen ist, können Messungen durchgeführt werden.

Ein Messzyklus beginnt jeweils mit einem elektrischen Plus auf der Trigger-Line, um auf den 40 Hallelementen einen Messvorgang auszulösen. Je nach Konfiguration der Elemente dauert ein Messvorgang unterschiedlich lang. Ist die Messung abgeschlossen, so werden die Hallelemente sequentiell ausgelesen und die Sensorrohdaten im Mikrocontroller zwischengespeichert. Mit Beendigung des Messvorgangs kann bereits ein weiterer Messvorgang gestartet werden. Das Auslesen der Daten kann dazu parallel durchgeführt werden.

Sind alle Sensorrohdaten im Arbeitsspeicher des Mikrocontrollers abgelegt, so werden diese als vollständiger Datensatz über die USB-Schnittstelle an den Rechner übertragen und können dort weiterverarbeitet werden. Ein Datensatz besteht aus 40 Einträgen, wobei jeder Eintrag aus den Magnetfeldkomponenten  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  eines Hallelements besteht.

**Rechner-Schnittstelle für Ansteuerelektronik** Das Gegenstück der USB-Verbindung auf Rechnerseite wird in Python umgesetzt. Diese Hardware-schnittstelle wird auch als (Software-)Treiber bezeichnet und abstrahiert die darunterliegende Hardware. Durch diese Abstraktion kann eine Software Hardwaredaten verwenden, ohne Kenntnis über die genaue technische Umsetzung besitzen zu müssen. Der Sensor kann somit einfacher

in Softwareumgebungen eingebunden werden, da lediglich Funktionen zum Konfigurieren und Auslesen der Messdaten verwendet werden müssen. Dies ist insbesondere für die geplanten HiL-Versuche von Bedeutung, da dort proprietäre Software zum Einsatz kommt.

## **Mechanische Ausgestaltung**

Die mechanische Ausgestaltung beschäftigt sich zunächst mit der Entwicklung des Spulenträgers als Basis für die Kupferwicklung. Anschließend wird die Sensorplatine in die mechanische Stützstruktur integriert sowie ein Adapter zur Befestigung des Sensors am Prüfstand gestaltet. Alle mechanischen Teile sind entweder aus Kunststoff gedruckt oder bestehen aus anderen nicht-ferromagnetischen Materialien.

Der gesamte Sensoraufbau mit Adapter wird in der Systemintegration (Abschnitt 3.6.4) dargestellt.

**Spulenträger** In einer ersten Iteration wurde entsprechend der vorher definierten Rechteckspule aus den Makrozyklen I und II ein Spulenträger gestaltet. Beim Aufwickeln des Kupferlackdrahtes zeigte sich jedoch eine starke Ausbeulung des Drahtes. Der Draht lag nicht sauber an den langen Seitenflächen an und begann sich nach außen zu wölben. Die Wölbung kann mit einer höheren Drahtspannung verringert werden, jedoch verbiegt sich das Kunststoffmaterial, da es die hohen Kräfte nicht abstützen kann. Eine definierte Wicklungsherstellung war mit dieser Ausgestaltung nicht zu erreichen.

In der zweiten Iteration wird die Rechteckspule zu einer Ovalspule umgestaltet (siehe Abbildung 3.23a). Die Krümmung orientiert sich an der sich ausgebildeten Krümmung des Kupferdrahtes der Rechteckspule. In einem weiteren Wickeltest kann diese Form erfolgreich mit 350 Windungen gewickelt werden. Diese grundlegenden Veränderungen der Ausgestaltung

werden in Abschnitt 3.7 im Simulationsmodell nachgeführt und das Modell wird abschließend anhand von Messungen am Prototyp verifiziert.

**Adapter für Prüfstandsanzubau** Zur Befestigung des Sensors am Prüfstand wird ein geeigneter Adapter entworfen (siehe Abbildung 3.23a). Der Adapter wird ebenfalls im 3D-Druck aus Kunststoff gefertigt. Er besteht unten aus einer Platte, die formschlüssig oben am Spulenträger anliegt und mit Nylonschrauben befestigt ist. Der Adapter weist oben eine passende Aufnahme für den Roboterarm auf. Der Adapter wird mit einer Klemmverbindung am Roboterarm verschraubt.

### 3.6.4 Systemintegration

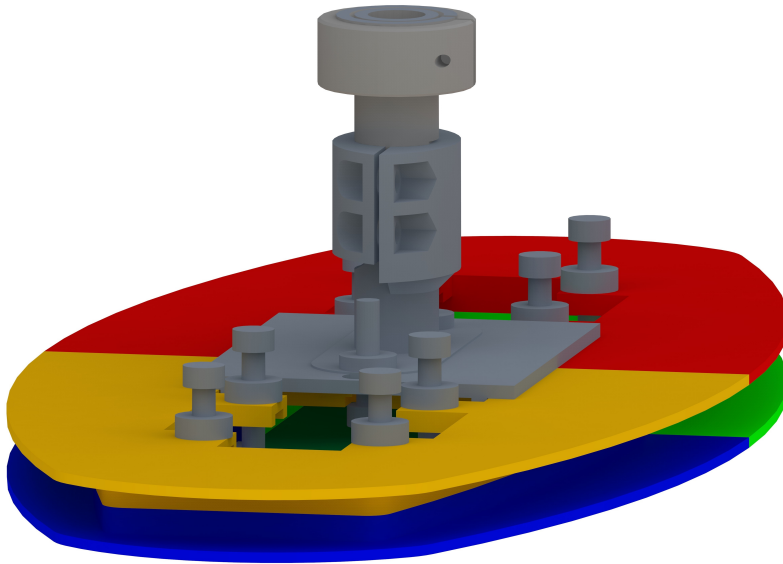
Abbildung 3.23a zeigt eine computergenerierte Grafik des Gesamtsensormodells. Der Roboterarm, der Adapter und die Schrauben werden in Grau dargestellt. Der ovale Spulenträger besteht aus vier Teilkomponenten (Rot, Gelb, Hellgrün, Blau).

Die Hallarrayplatine wird innerhalb der Spule platziert. Dazu weist der Spulenträger in der Mitte passende Aufnahmen für die Platine auf. Anschlagskanten stellen die korrekte Einbauposition sicher. Abbildung 3.23b zeigt einen Schnitt durch den Sensoraufbau. Mittig unter dem Adapter ist in Dunkelgrün die ebenfalls geschnittene Platine erkennbar. Sie wird durch Nylonschrauben auf die Auflageflächen der unteren Spulenträger Teile (blau, hellgrün) angepresst und in x-y-Ebene formschlüssig zentriert.

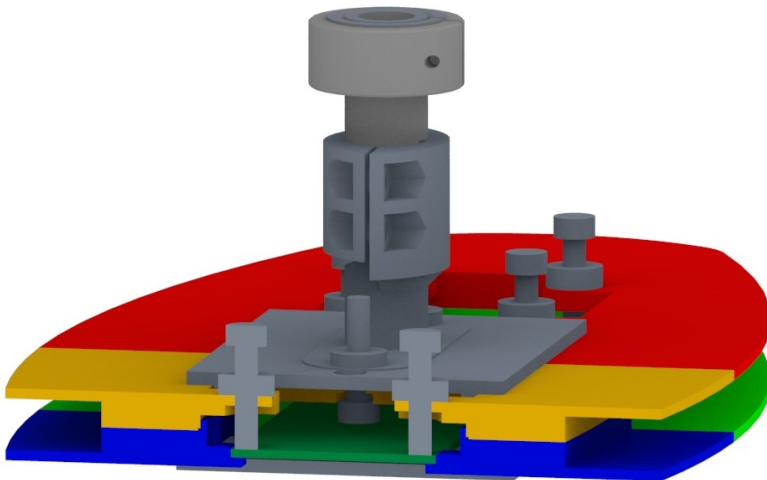
### 3.6.5 Durchgehendes parametrisches Simulationsmodell

Das Simulationsmodell wird um die entwickelten Komponenten erweitert. Die definierten geometrischen Maße sowie die veränderte elektrische Ausgestaltung der Spule werden umgesetzt.

Der Sensorprototyp wird zur Untersuchung auf einem Prüfstand angebracht (siehe Abschnitt 3.6.6). Der dort eingesetzte Roboter wurde mit ei-



(a) Gesamtansicht mit vier farblich hervorgehobenen Teilen des Spulenträgers



(b) Schnitt des Gesamtsystems mit geklemmter Hallarrayplatine in der Mitte

Bild 3.23: Sensorprototyp mit Spulenträger, Prüfstandsadapter und Verschraubungen



Bild 3.24: Sensorprototyp mit ovaler Spule und Hallarrayplatine mit 40 Hallelementen

nem Permanentmagneten positiv auf Ferromagnetismus getestet. Es ist daher anzunehmen, dass der Roboter einen Einfluss auf die Magnetfeldausbreitung der Erregerspule hat, welche nicht vernachlässigbar ist. Die Simulation wird ebenfalls um den Roboterflansch erweitert, um den Einfluss auf die Magnetfeldausbreitung zu bestimmen. Die Maße des Flansches finden sich in [44]. Das Adapterstück aus Kunststoff bedingt dabei die Position des Flansches relativ zum Sensor. Die Ergebnisse des Simulationsmodells werden in Abschnitt 3.7 diskutiert.

### 3.6.6 Prüfstand zur Verifikation und Validierung

Parallel zur Sensorentwicklung wird in Makrozyklus III ein Prüfstand aufgebaut. Ziel ist es mit diesem die Verifikation der Simulationsmodelle durchzuführen, die Eigenschaften des Sensorprototypen herauszufinden und den Sensor in Testszenarien zu validieren.

## Aufbau

Der mechanische Aufbau des Prüfstands besteht aus Aluminiumprofilen sowie Schraubverbindungen aus Stahl. Die Grundstruktur ist somit im Wesentlichen nicht ferromagnetisch und beeinflusst das Sensormagnetfeld minimal. Der Prüfstand besitzt eine aus Aluminium bestehende Auflagefläche mit Nuten zur Befestigung der Schienenprofile. Die Arbeitsfläche wird von Aluminiumblechtüren, welche mit Schaltern versehen sind, umgeben.

Auf der Arbeitsfläche ist an einer Seite ein Roboter angebracht. Der 4-Achs-Roboter mit einer maximalen Nutzlast von 3 kg kann in allen drei Raumrichtungen translatorisch (3-Achsen) verfahren und den Endeffektor zusätzlich um die Hochachse (4.-Achse) drehen. Der Roboter erreicht dabei Genauigkeiten von  $\pm 0,01$  mm bei der räumlichen Positionierung bzw.  $\pm 0,01^\circ$  an der Drehachse. Der Roboter wird über eine Ethernetschnittstelle gesteuert. [12] Die Versorgung der Erregerspule im Sensorprototyp mit einem konstanten Strom wird mit einem Labornetzteil realisiert. Das Netzteil ist über eine RS-232-Schnittstelle fernsteuerbar. [49]

Ein leistungsfähiger Rechner dient als Steuereinheit und verknüpft zentral alle Teilsysteme des Prüfstands. An diesem Prüfstandsrechner wird bei den Prüfläufen der Sensorprototyp via USB-Schnittstelle angebunden. Die unverarbeiteten Messdaten des Sensors werden bei jedem Prüflauf in einer zentralen Datenbank abgelegt. Abbildung 3.25 zeigt den Prüfstands Aufbau schematisch. In Abbildung 3.26 ist der Sensorprototyp am Roboterarm befestigt und wird über ein Schienenprofil bewegt.

**Prüfstandssoftware** Die Software zur Bewegung des Roboters, der Ansteuerung des Netzteils und zum Auslesen der Sensordaten wurde in Python implementiert. Der Fokus wurde auf eine vollständige Automatisierung aller Prüfläufe gelegt um voll-faktorielle Versuche zu unterstützen. Die Software unterstützt ebenfalls eine automatisierte Erfassung der Schienenprofilposition auf der Arbeitsplatte.



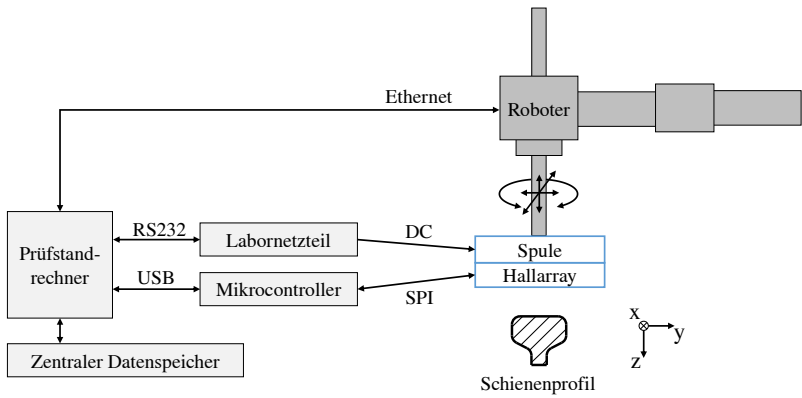


Bild 3.25: Gesamtsystemübersicht des Prüfstands

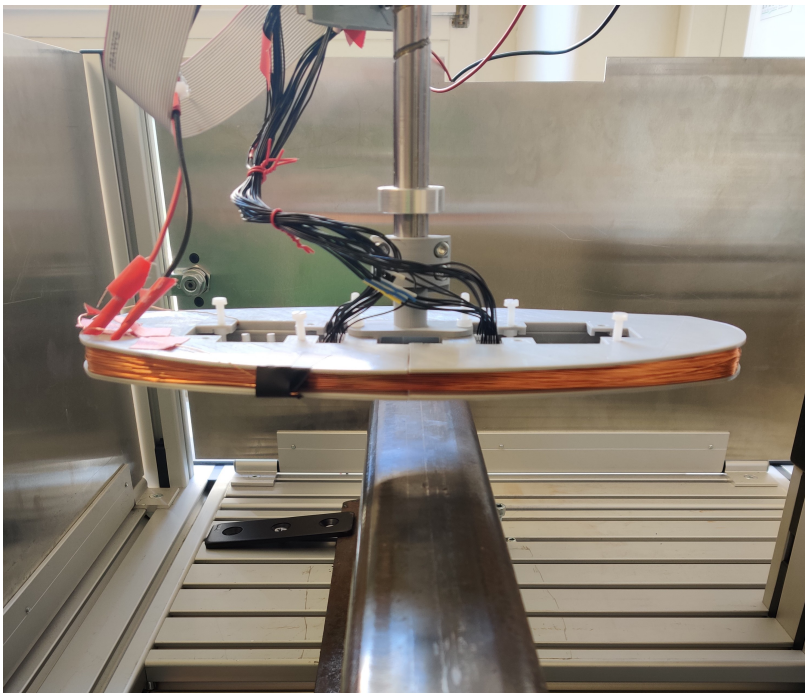


Bild 3.26: Sensorprototyp am Roboterarm mit darunterliegendem Schienenprofil

## Allgemeiner Versuchsablauf

Die Messpunkte werden durch einen Versuchsplan im Schienenkoordinatensystem vorgegeben. Ein Prüfpunkt besteht dabei mindestens aus fünf Einträgen: den drei räumlichen Koordinaten  $x_S$ ,  $y_S$  und  $z_S$ , der Drehung um die  $z$ -Achse  $\alpha_S$  sowie dem Spulenstrom  $I$ . Zusätzlich können die Konfigurationseinstellungen der Hallelemente verändert und die Anzahl der Messungen pro Prüfpunkt angegeben werden.

Zur Vorbereitung des Prüflaufs wird das zu untersuchende Profil auf dem Prüfstand befestigt. Anschließend wird das Profil eingemessen. Die einzelnen Prüfpunkte werden nacheinander vollautomatisch angefahren und die Messwerte in der zentralen Datenbank abgespeichert. Nach dem Start des Prüflaufs ist keine weitere menschliche Interaktion notwendig. Die Daten können anschließend über eine Verbindung zum zentralen Datenserver ausgewertet werden. Neben den Messdaten werden auch die Eingangsparameter der Prüfpunkte und das verwendete Profil abgelegt, womit die Nachvollziehbarkeit der Prüfläufe gegeben ist.

Die Daten werden vor der Speicherung nicht verändert und dienen in Abschnitt 3.7 der Modellverifizierung, in Kapitel 4 zur Algorithmenauslegung und in Kapitel 5 zur Validierung (Abbildung 3.27).

## 3.7 Ergebnisse

In diesem Unterkapitel wird zunächst der Sensor auf seine korrekte Funktionsweise untersucht. Anschließend findet die Modellverifikation anhand verschiedener Prüfaufbauten statt. Der Einfluss der Schienenprofile auf den Magnetfeldverlauf wird aufgezeigt.

### 3.7.1 Funktionsüberprüfung

Als Maß für die korrekte Funktionsweise des Hallarrays wird über 100 Messungen die daraus resultierende Standardabweichung berechnet und mit den

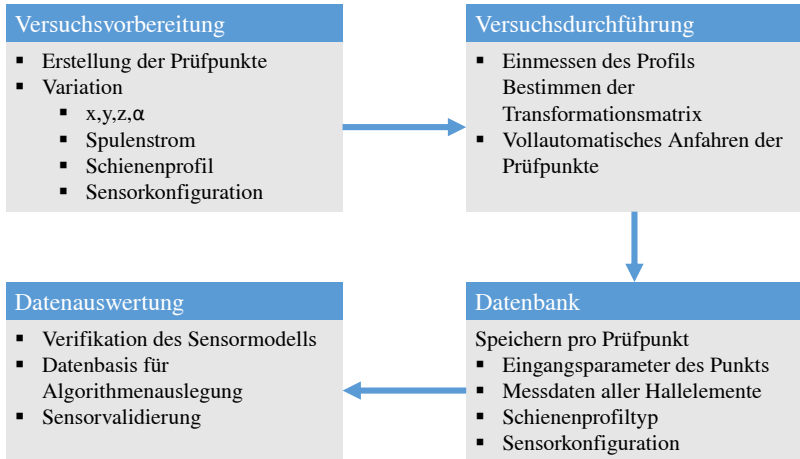


Bild 3.27: Versuchsplanung und -durchführung

Herstellerspezifikationen verglichen.

Abbildung 3.28 zeigt die Standardabweichungen aller 40 Sensoren in  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$ . Die Standardabweichungen der Komponenten  $B_x$  und  $B_y$  sind in etwa gleich und stimmen mit den Herstellerspezifikationen überein. Die Standardabweichung in  $B_z$  ist ebenfalls innerhalb der Spezifikationen, ist jedoch größer als die der beiden anderen Komponenten. Dies liegt am inneren Aufbau der Hallelement-ICs, welche in z-Richtung bedingt durch den Herstellungsprozess anders aufgebaut sind. Tabelle 3.2 zeigt die gemittelten Standardabweichungen aller Hallelemente. Die Standardabweichungen der Hallelemente sind für die Nutzung im Sensorprototyp geeignet. Kein Hallelement hat im Fertigungsprozess Schaden genommen, und alle Hallelemente funktionieren innerhalb ihrer Herstellerspezifikation. [32]

### 3.7.2 Messrauschen

Der Sensor kann in verschiedenen Betriebsmodi verwendet werden. Über die digitale Busschnittstelle kann jedes Hallelement hinsichtlich seines Mess-

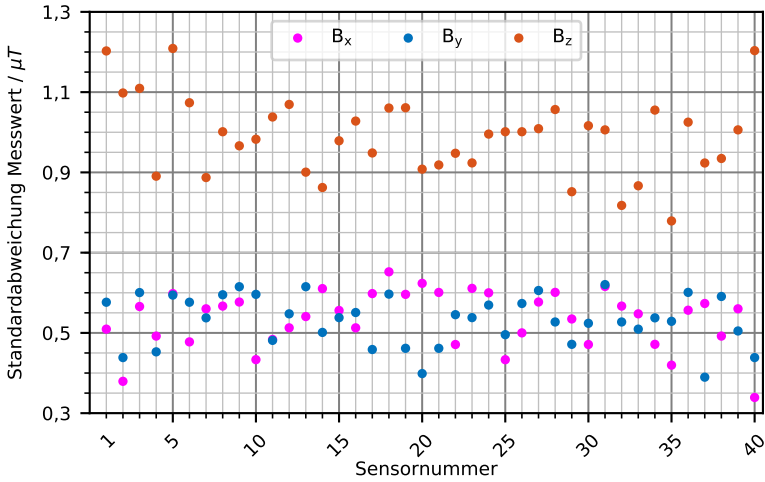


Bild 3.28: Standardabweichungen aller Sensoren in allen Raumrichtungen

	$B_x$	$B_y$	$B_z$
Standardabweichung / $\mu T$	0,53	0,53	0,99

Tabelle 3.2: Gemittelte Standardabweichung über alle Hallelemente

verhaltens konfiguriert werden. Für diese Arbeit relevante Einstellungen sind die Abtastrate bzw. die Zeitdauer einer Messung, die analoge Vorverstärkung, digitale Filter und Überabtastung (engl. Oversampling).

Die Zeitdauer einer Messung beschreibt die Zeit, die ein Hallelement benötigt, um eine vollständige Messung durchzuführen. Intern werden die drei Komponenten  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  nacheinander gemessen und erst danach digital ausgegeben. Neben den Magnetfeldkomponenten wird zusätzlich immer die Temperatur im Hallsensorelement bestimmt, deren Messung ebenfalls Zeit benötigt. Sie dient lediglich der internen Temperaturkompensation des Hallelements.

Die analoge Vorverstärkung bestimmt die Verstärkung vor der Analog-Digital-Wandlung am ADC. Mit ihr kann der Messbereich bzw. die Sensitivität des Sensorelements eingestellt werden.

Das digitale Filter im Hallsensorelement kann direkt auf dem IC eine Mittlung von Messungen durchführen. Dazu werden im Sensorelement mehrere Messungen durchgeführt, diese gemittelt und erst dann dem Anwender am Bus zur Verfügung gestellt. Das digitale Filter hat damit direkten Einfluss auf die Abtastrate. Eine Mittlung über eine höhere Anzahl an internen Messungen senkt die maximal mögliche Ausgaberate des Hallsensorelements. Die Überabtastung wird häufig bei ADCs eingesetzt um das Messrauschen zu verringern. Es kann zudem die Linearität des ADCs weiter verbessern. Die Messgröße wird dazu mit einem Vielfachen der ADC-Ausgabefrequenz abgetastet. [32] [34]

Die Kombination der Sensoreinstellungen *digitales Filter* und *Oversampling* bestimmen die maximal erreichbare Messfrequenz. Das Messrauschen ist ebenfalls abhängig von der Messfrequenz. Laut Datenblatt steigt mit einer höheren Abtastrate auch das Rauschen [32].

Zur Untersuchung der Abhängigkeiten des Messrauschens wird der Sensor in verschiedenen Einstellungen getestet. Es werden dabei für jede Einstellungskombination des digitalen Filters und des Oversamplings 100 Messungen durchgeführt. Das digitale Filter besitzt acht Einstellungsstufen, das Oversampling kann in vier Stufen konfiguriert werden. Insgesamt sind 64 Kombinationen möglich. Während der Messungen wird der Sensor nicht bewegt und die Erregerspule wird nicht eingeschalten.

Abbildung 3.29 zeigt das Messrauschen als Standardabweichung über der Abtastfrequenz. Die Abtastfrequenz ergibt sich nach [32] aus der Kombination von digitalem Filter und Oversampling. Grundsätzlich sinkt das Messrauschen mit längerer Messzeit.

Die analoge Vorverstärkung hat keinen Einfluss auf die Abtastrate, bestimmt jedoch den maximal möglichen Messbereich. In einer weiteren Versuchsreihe wird die Abhängigkeit des Messrauschens von der analogen Vor-

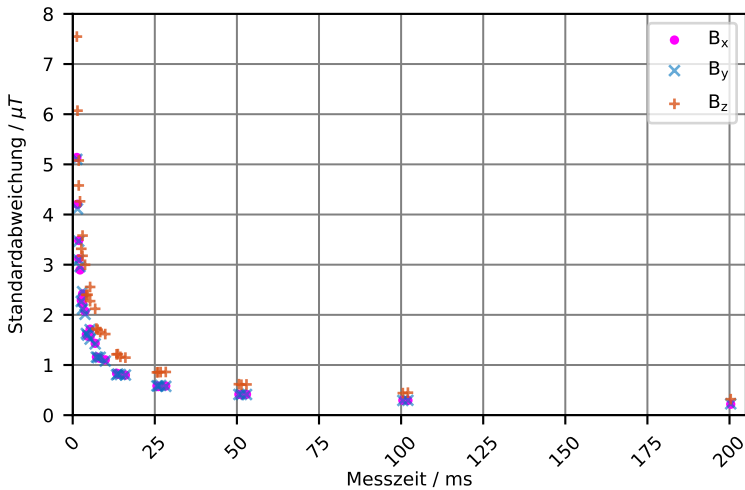


Bild 3.29: Standardabweichungen eines Hallelements über der Messzeit

verstärkung untersucht. Der Sensor wird dabei nicht bewegt und die Erregerspule ist stromlos. Abbildung 3.30 zeigt die Standardabweichung eines Hallelementes über den Einstellungen der analogen Vorverstärkung. Die Vorverstärkung kann in acht Schritten von 0 bis 7 konfiguriert werden. Eine höherer Wert der analogen Vorverstärkung hat eine niedrigere Sensitivität zur Folge, was sich in einem niedrigerem Messrauschen ausdrückt.

Aus Abbildung 3.30 ist ein niedriges Messrauschen bei hohem Analogverstärkungswert erkennbar. Allerdings bedingt ein höherer Vorverstärkungswert einen kleineren maximalen Messbereich des Hallelements. Im weiteren Entwicklungsverlauf ist daher nachzuweisen, dass der sich daraus ergebende, kleinere Messbereich ausreichend ist, die Magnetfeldkomponenten abzutasten ohne die Sättigung des ADCs der Hallelemente zu erreichen. Bei einem Vorverstärkungswert von 7 beträgt der maximale Messbereich  $\pm 5 \text{ mT}$  [32].

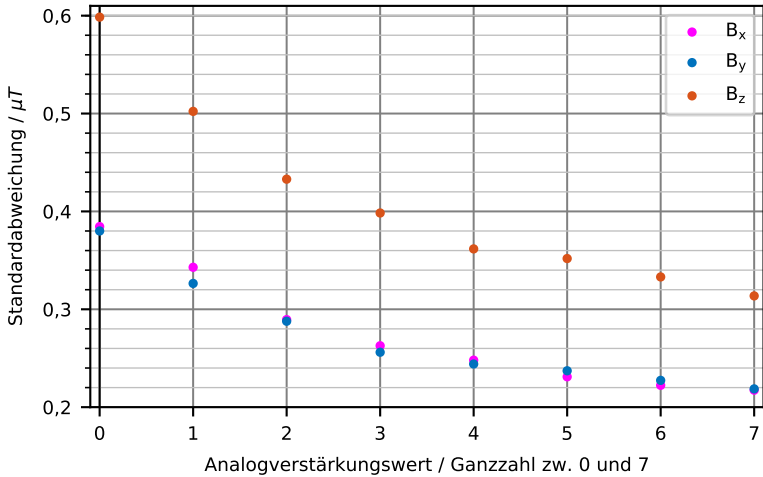


Bild 3.30: Standardabweichungen eines Hallelements über die Analogverstärkung

### 3.7.3 Einfluss Erdmagnetfeld

Zur Charakterisierung des Erdmagnetfeldeinflusses wird der Sensor in verschiedenen räumlichen Ausrichtungen positioniert. In jeder Ausrichtung wird eine Messung durchgeführt. In der Sensorumgebung befindet sich kein ferromagnetisches Material und die Erregerspule ist nicht bestromt.

Bei der Versuchsdurchführung wird der Sensor in  $45^\circ$ -Schritten um die z-Achse gedreht. Die z-Achse steht dabei senkrecht zur Erdoberfläche. Abbildung 3.31 zeigt die Komponenten  $B_x$  und  $B_y$  eines Hallelements über dem Drehwinkel. Es ist deutlich ein sinusförmiger Verlauf zu erkennen. Der Verlauf ist plausibel, da je nach Drehwinkel der Erdmagnetfeldvektor in unterschiedlichen Positionen zum Hallelement in die Komponenten zerlegt wird.

Die Verläufe sind durch äußere unbekannte Gleichfelder verschoben. Die Amplitude der Sinusverläufe beträgt etwa  $39,7 \mu T$  und stimmt damit mit dem zum Zeitpunkt der Messung herrschenden Erdmagnetfeld von etwa

40  $\mu\text{T}$  überein [36].

Der Sensor wird nach dem abgeleiteten Messkonzept unter der Straßenbahn wie im oben beschriebenen Versuchsaufbau mit z-Achse in Richtung der Erdbeschleunigung eingebaut. Fährt die Straßenbahn durch das Netz so ändert sich die Ausrichtung des Sensors zum Erdmagnetfeld in der Ebene. Diese Änderung geht mit maximal  $\pm 40 \mu\text{T}$  in die Messwerte der Hallelemente mit ein.

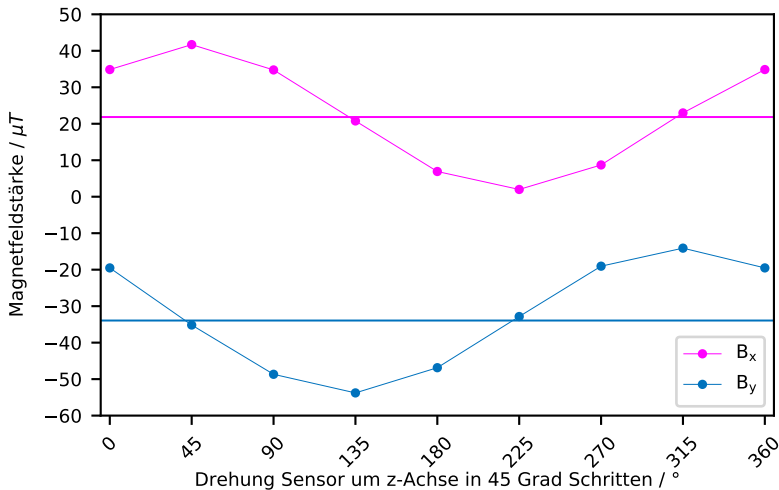


Bild 3.31:  $B_x$  und  $B_y$  eines Hallelements über die Drehung um die z-Achse. Mittelwerte der Sinusverläufe sind hervorgehoben.

### 3.7.4 Modellverifikation

In diesem Abschnitt wird das Simulationsmodell mittels Messungen am Sensorprototyp verifiziert. Dazu werden verschiedene Versuche am Prototypen durchgeführt und diese Versuche parallel mit gleichem Aufbau simuliert. Durch den Vergleich zwischen Simulation und Messung kann auf die Modellgüte zurückgeschlossen werden und das Simulationsmodell verifi-



ziert werden.

Das entwickelte Hallarray dient in allen Versuchen als Messmittel zur Bestimmung der Magnetfeldstärke an den 40 diskreten Positionen. Auf weitere externe Messeinrichtungen wird verzichtet. Es findet im Folgenden stets ein Vergleich der 40 realen Sensormesswerte mit den simulierten Magnetfeldstärken statt.

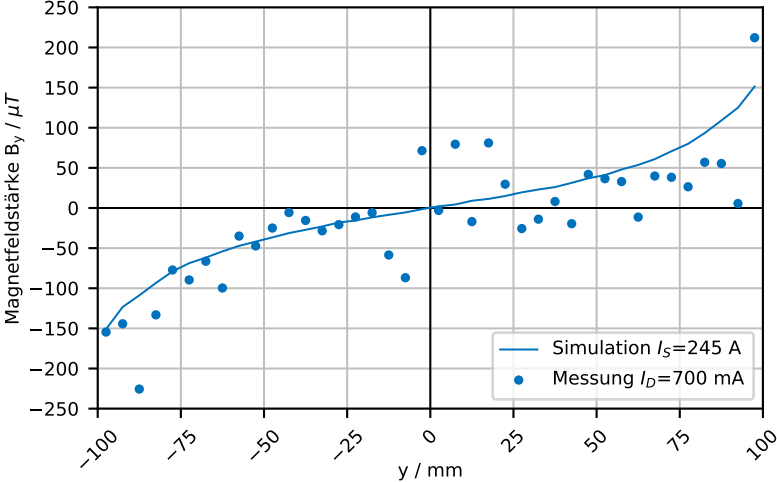
## Magnetfeldausbreitung

Zunächst wird das Verhalten der ovalen, handgewickelten Erregerspule untersucht, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Magnetfeldausbreitung, die nicht simulativ nachvollziehbar ist, besitzt. Ziel ist es, die magnetische Feldausbreitung der Spule ohne weitere äußere Einflüsse auf den Sensorprototypen zu charakterisieren.

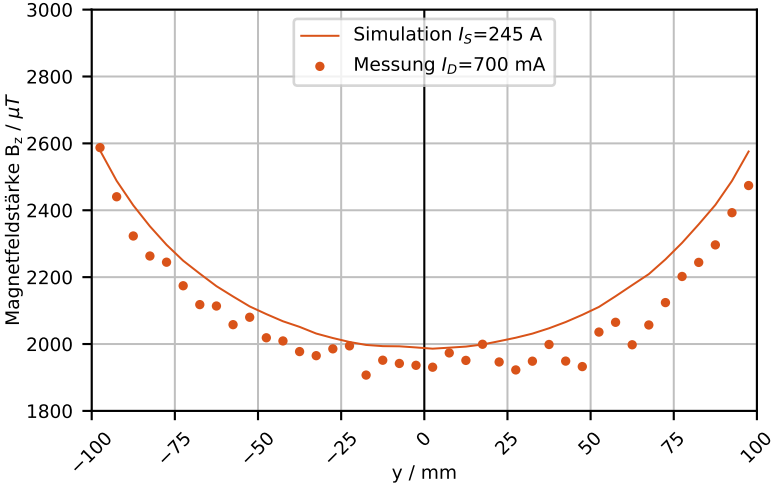
Im Versuchsaufbau wird der Sensor frei von ferromagnetischen Materialien in der näheren Umgebung aufgebaut. Auf die Erregerspule wird ein Strom von  $I_D = 700 \text{ mA}$  eingepreßt und das entstehende Feld mit dem Hallarray gemessen. In der Simulation wird der Versuchsaufbau nachvollzogen und die Erregerspule dort mit einer Stromstärke von 245 A simuliert.

Zu Beachten ist die geringere Feldstärke im Vergleich zu den ersten Simulationen in Makrozyklus I. Die tatsächlich erreichte Windungszahl am Prototypen beträgt 350 statt der angenommenen 400 Windungen (siehe Abschnitt 3.5.2). Die Stromstärke der Simulation wird in allen weiteren Untersuchungen auf  $I_S = 350 \cdot 700 \text{ mA} = 245 \text{ A}$  abgesenkt. Abbildung 3.32 zeigt die Verläufe von Messung und Simulation in den beiden Komponenten  $B_y$  und  $B_z$ . Mit der angepassten Stromstärke entspricht das Modell der umgesetzten Ausgestaltung des Prototyps.

**Magnetfeldkomponente  $B_y$**  Die Messung in  $B_y$  weist eine starke Streuung der Werte mit einer Standardabweichung zwischen Simulation und Messung von  $56 \mu\text{T}$  auf. Die Messwerte lassen jedoch eine Übereinstim-



(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$



(b) Magnetfeldkomponente  $B_z$

Bild 3.32: Vergleich zwischen Simulationen mit variierten Spulenstrom und Messung

mung mit dem simulierten Verlauf erkennen. Gründe für die teils größeren Abweichungen und den springenden Verlauf der Messwerte sind schwer exakt zu bestimmen. Der Einfluss des Messrauschens auf die betragsmäßig kleinen Messwerte ( $\approx \pm 200 \mu\text{T}$ ) ist als nicht signifikant anzusehen. Durch die geringen Feldstärken können unbekannte Störfelder aus der Hallarray-platine einen großen Einfluss besitzen. Erst mit höheren Feldstärken kann eine genauere Aussage getroffen werden. Diese sind jedoch mit der Erreger-spule in y-Richtung nicht erreichbar, da die maximale Strombelastbarkeit des Kupferdrahts bereits ausgereizt ist. Höhere lokale Feldstärken in y-Richtung werden erst mit Einbringung eines ferromagnetischen Materials durch Flusskonzentration erreicht.

**Magnetfeldkomponente  $B_z$**  Der Kurvenverlauf von  $B_z$  zwischen Messung und Simulation stimmt gut überein. Die Feldstärke der realen Spule fällt durchgehend leicht geringer als die der simulierten Spule aus. Als Ursache kommen Imperfektionen bei der Spulenwicklung in Betracht, da nur exakt ausgerichtete parallel verlaufende Kupferdrähte ein optimal starkes Feld erzeugen. Die Standardabweichung zwischen Simulation und Messung ist ähnlich  $B_z$  und beträgt  $59 \mu\text{T}$ . Durch die betragsmäßig höheren Feldstärken in  $B_z$  von  $>2000 \mu\text{T}$  erscheinen die Abweichungen weniger deutlich.

**Weitere Einflüsse** Weitere schwer einzuschätzende Einflüsse stellt die Anordnung der Hallsensorelemente auf einer Platine mit stromführenden Leiterbahnen und weiteren Komponenten dar. Durch die Nähe zu weiteren stromführenden Bauteilen (ICs, Multiplexer, Spannungsversorgung) können zusätzliche Störfelder entstehen, die nicht trivial zu erfassen sind.

**Grenzwerteinhaltung der Magnetfeldstärke** Die Einhaltung der Grenzwerte statischer Magnetfelder wird in einer gesonderten Simulation mit weiteren Messlinien überprüft. Entlang dieser Linien wird der Betrag der Magnetfeldstärke auf Maxima untersucht. Der vom Bundesamt für Strahlen-

schutz geforderte Grenzwert von 500 mT wird im Messbereich des Sensors erwartungsgemäß überschritten [3]. Magnetfelder fallen über ihre Ausbreitungsrichtung stark ab und bereits ab einer Entfernung von 160 mm zur Spule liegt die betragsmäßige Magnetfeldstärke unter 325  $\mu\text{T}$ .

Durch die Anbauposition der Sensoren im Drehgestell, welches den Zugang von Personen im Betrieb verhindert, stellt der Sensor keine Gefahr für Personen dar. Der Grenzwert ist in kurzer Entfernung bereits unterschritten, und die ausgestrahlte Magnetfeldstärke kann in einer späteren Produktiteration durch magnetische Schirmung weiter verringert werden.

### **Einfluss Roboteranbau**

Im nächsten Schritt wird der Einfluss des Prüfstands durch den Roboter untersucht. Der Roboterarm besteht aus einem bearbeiteten ferromagnetischen Stahlrohr, an welches der Sensor für Versuchsläufe angebracht wird. Durch die Nähe des Roboterarms zum Sensor muss abgeschätzt werden, ob dieser Einfluss vernachlässigbar ist. Falls ein signifikanter Einfluss existiert, soll dieser charakterisiert werden.

Der Versuchsaufbau besteht aus dem Sensorprototypen am Prüfstand. In der weiteren Umgebung befindet sich kein zusätzliches ferromagnetisches Material. Die Messung und die Simulation mit Roboterarm werden jeweils mit der bereits simulierten Magnetfeldausbreitung ohne Roboterarm verglichen. Abbildung 3.33 zeigt die Simulation der Feldausbreitung mit und ohne Roboterarm. Die Untersuchung zeigt einen nicht vernachlässigbaren Einfluss des Roboterarms. Sowohl in  $B_y$ , als auch in  $B_z$  sind Veränderungen der Magnetfeldausbreitung zu beobachten. Eine Messung bestätigt den Einfluss des Roboterarms experimentell.

**Magnetfeldkomponente  $B_y$**  Der Verlauf von  $B_y$  wird ähnlich dem des Rechteckprofils verändert, ist allerdings an der y-Achse gespiegelt. Dies liegt an der Position des Roboterarms, welcher sich auf der anderen Seite

der Spulenmitte, oberhalb des Sensors befindet. Die maximale Abweichung beträgt von  $\approx 70$  mT.

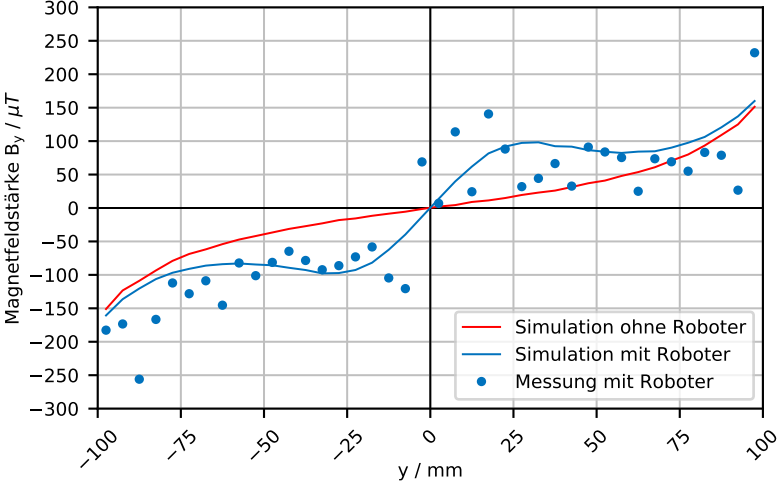
**Magnetfeldkomponente  $B_z$**  Die parabelförmige Feldausbreitung in  $B_z$  wird durch den Roboterarm mittig verändert. Hier findet eine Feldverstärkung durch das ferromagnetische Material des Roboterarms statt, welche sich deutlich von der Kurve ohne Roboterarm abhebt. Die Messung bestätigt die Simulation. Die maximale Abweichung beträgt  $\approx 170$  mT.

### Verifikation mit Rechteckprofil

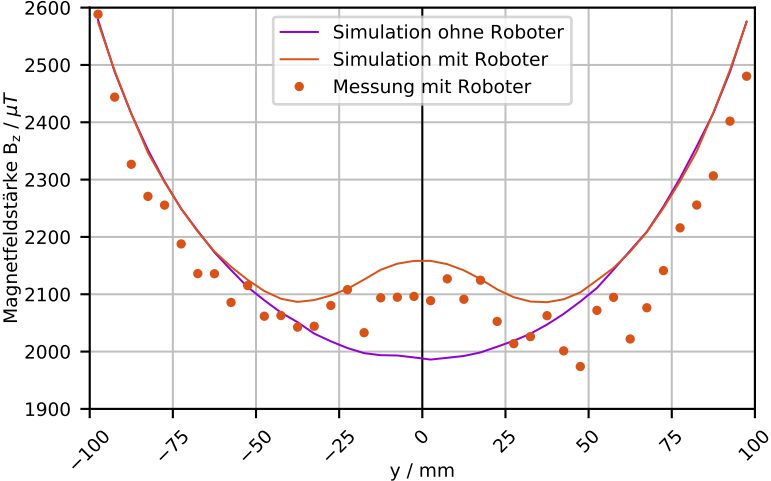
Zunächst wird der Einfluss eines Rechteckprofils mit einer Profildbreite von 30 mm untersucht. Das Profil wird mittig unterhalb des Sensors platziert. Der Sensor ist am Roboterarm befestigt. Mittels des Roboters wird der Luftspalt zwischen Sensor und Profilloberfläche zwischen 10 mm und 30 mm variiert um Abstandsänderungen des Sensors zur Profilloberfläche einschätzen zu können.

Die beiden Verläufe in  $B_y$  und  $B_z$  aus Abbildung 3.34 zeigen über alle Luftspalte eine gute Übereinstimmung. Ein größerer Luftspalt geht mit einer Verminderung der Magnetfeldstärke im Einflussbereich des Profils einher. Das Modell ist grundsätzlich geeignet, den Sensorprototypen mit ferromagnetischen Einfluss durch Profile simulativ abzubilden. Aussagen mit simulierten Messdaten können auf reale Messdaten übertragen werden (siehe Kapitel 4).

Die inhomogene Feldausbreitung der ovalen Erregerspule ist in den Messwerten vor allem in den Randbereichen noch deutlich sichtbar. Besonders im Verlauf  $B_z$  kann die parabelförmige Feldausbreitung an den Rändern beobachtet werden.

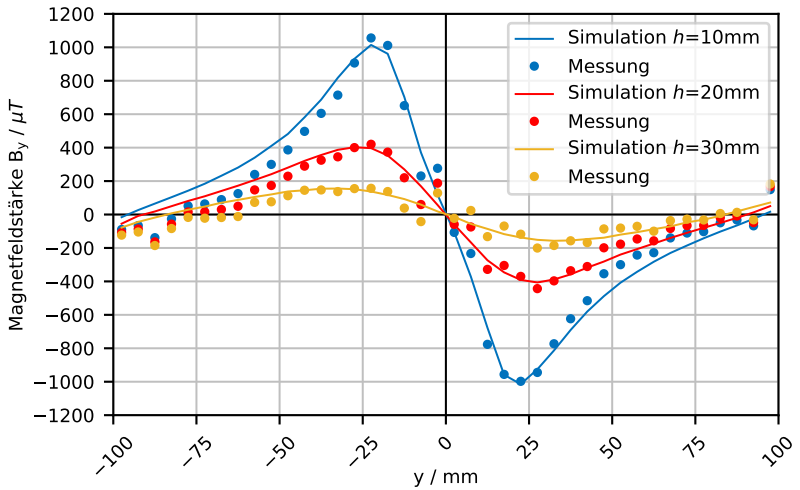


(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$

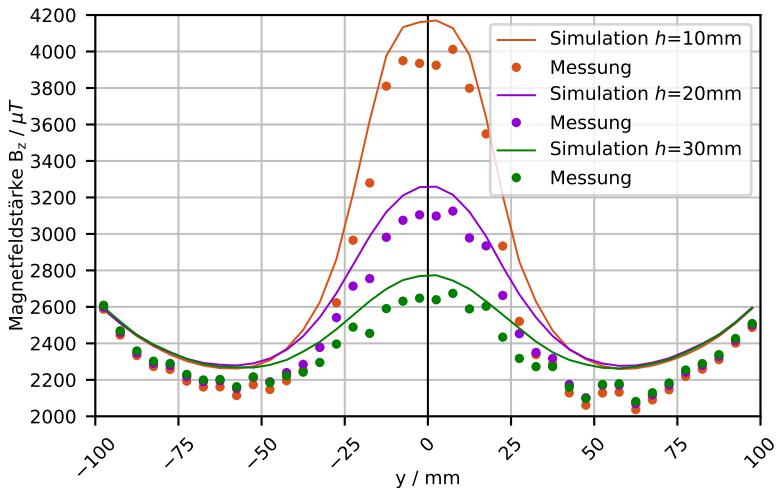


(b) Magnetfeldkomponente  $B_z$

Bild 3.33: Vergleich zwischen Simulationen mit/ohne Robotereinfluss und Messung



(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$



(b) Magnetfeldkomponente  $B_z$

Bild 3.34: Vergleich 30mm-Rechteckprofil zwischen Simulation und Messung mit verschiedenen Luftspalten

## Verifikation mit Schienenprofilen

Abschließend findet eine Verifikation mit zwei typischen Schienenprofilen statt. Untersucht werden das S49-Profil (Vignolschiene) und das Ri59N-Profil (Rillenschiene). Der Versuchsaufbau besteht aus den mittig platzierten Profilen unter dem Sensor auf dem Prüfstand. Der Luftspalt beträgt 20 mm.

**S49-Profil** Die Verläufe der Magnetfeldkomponenten in Abbildung 3.35 der Untersuchung des S49-Profils ergeben gute Übereinstimmungen.

**Ri59N-Profil** Das Rillenschienenprofil (Abbildung 3.37) zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Die Verläufe der Komponenten unterscheiden sich durch den zusätzlichen Materialeinsatz zur Bildung der Rille von denen klassischer Vignolprofile. Der Verlauf in y-Richtung weist ein weiteres Maximum linksseitig des Maximums des Schienenkopfs auf. Die Wulst der Rillenschiene gegenüber der Lauffläche befindet sich an dieser Stelle. In z-Richtung ist der Einfluss ebenfalls deutlich zu erkennen.

**Fazit** Das Modell wird bereits ab Makrozyklus II für die Entwicklung des Berechnungsalgorithmus genutzt. Da dort simulierte Messdaten der Hallelemente als Eingangsgrößen zur Lateralpositionsbestimmung verwendet werden, stellt diese nun abgeschlossene Verifizierung einen wichtigen Meilenstein dar. Die simulierten Messdaten stimmten mit den experimentell ermittelten Messdaten überein, und der parallel entwickelte Algorithmus wird mit großer Wahrscheinlichkeit mit realen Sensordaten funktionieren. Die Funktionsweise des Algorithmus und der Funktionsnachweis sind Teil des folgenden Kapitels 4.



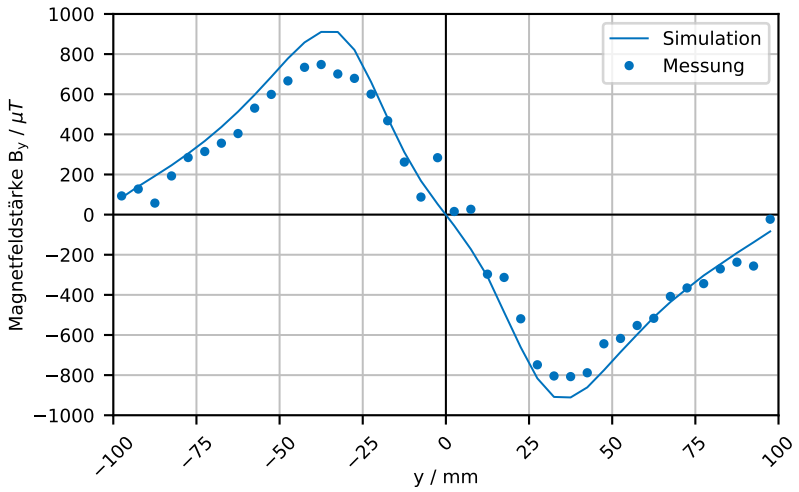
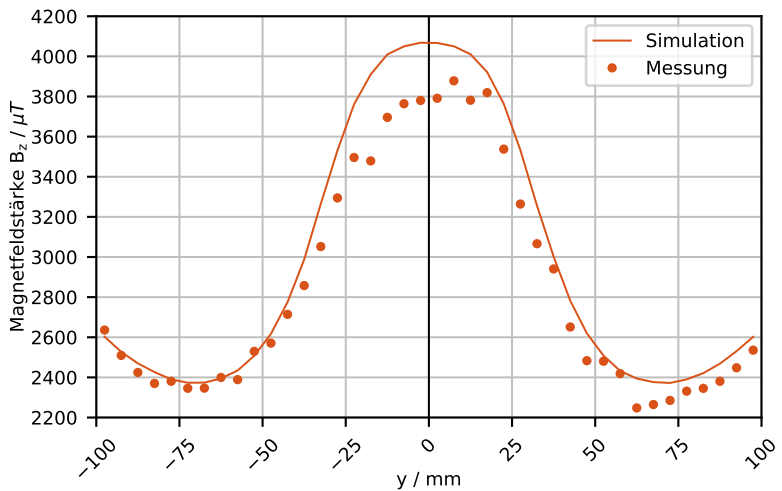
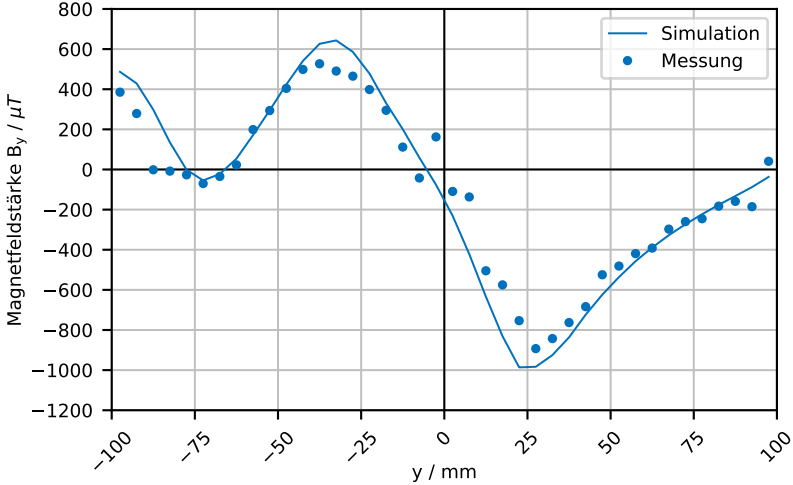
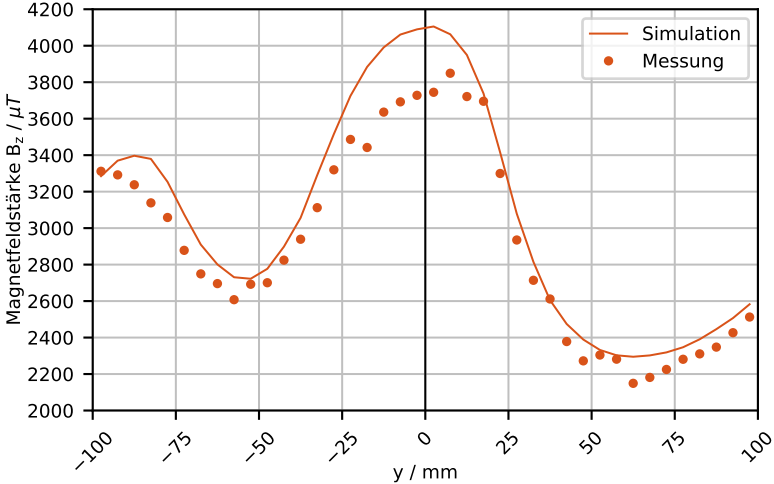
(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$ (b) Magnetfeldkomponente  $B_z$ 

Bild 3.35: Vergleich S49-Profil zwischen Simulation und Messung



(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$



(b) Magnetfeldkomponente  $B_z$

Bild 3.36: Vergleich Ri59N-Profil zwischen Simulation und Messung

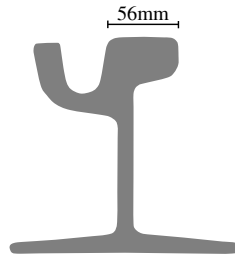


Bild 3.37: Ri59N-Rillenschienenprofil mit 56 mm Kopfbreite [52]

### 3.7.5 Materialkosten Sensor

In den Anforderungen an das Sensorkonzept sind Marktanforderungen enthalten. Die dort aufgeführte Kostenmimierung soll sicherstellen, dass das Sensorkonzept keine wesentlichen Mehrkosten mit sich bringt. Im Folgenden soll kurz auf die Materialkosten des Sensors eingegangen werden. Es können dabei lediglich die Komponentenpreise exklusive weiterer Kosten wie Personaleinsatz oder Fertigungsaufwand aufgelistet werden. Die Materialkostenschätzung soll der Einschätzung der Größenordnung dienen.

Die Preise der Einzelteile sind Einzelpreise der Lieferanten für Endverbraucher. Die Preise der Ansteuerelektronik wurden überschlagen, da diese zugekauft wurde und für ein späteres Produkt passend entwickelt werden muss. Tabelle 3.3 listet die Komponenten und Kosten des Sensors auf.

Nicht enthalten sind mechanische Teile, da diese preislich schwer abgeschätzt werden können.

Der Materialpreis pro Sensor ist bereits im Prototypenstadium sehr niedrig. Die wesentlichen Sensorelemente sind käuflich verfügbare ICs, und das Gesamtsystem aus Erregerspule und Hallarrayplatine ist günstig zu fertigen. Eine bahntaugliche Umsetzung des Sensors wird jedoch zu einer Preissteigerung führen. Es wird ein in Relation zu anderen Komponenten eines mechanischen Fahrwerks unwesentlicher Kostenfaktor, der durch die Anschaffung der Sensoren entsteht, vermutet. Im Vergleich zu Laserdistanzen-

#	Komponente	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis
1	Hallelement	40	0,72 €	28,8 €
2	Multiplexer	5	0,13 €	0,65 €
3	Keramikcondensatoren	45	0,07 €	3,15 €
4	Elektrolytkondensatoren	4	0,18 €	0,72 €
5	Steckverbinder	4	1,25 €	5,00 €
6	Platinenfertigung	1	15,00 €	15,00 €
7	Kupferlackdraht	1	25,00 €	25,00 €
8	Ansteuerelektronik	1	50,00 €	50,00 €
			Summe	128,32 €

Tabelle 3.3: Kostenabschätzung Sensorprototyp

soren kann das neue Sensorkonzept Anschaffungskosten mechatronischer Fahrwerke effektiv minimieren.

## 4 Algorithmenentwicklung

In diesem Kapitel werden verschiedene Ansätze für die Berechnung der Lateralposition und ein Ansatz zur Bestimmung des Messgüteindex vorgestellt. Die Algorithmenentwicklung erfolgt bereits ab Makrozyklus II parallel mit simulierten Messdaten. Mit der Verfügbarkeit des Sensorprototyps werden die Algorithmen an realen Messdaten weiterentwickelt. Die Ansätze werden zunächst gesamthaft in ihrer Funktionsweise beschrieben und abschließend miteinander verglichen. Der Vergleich der Ansätze wird mittels Kennzahlen und anhand realer Messdaten durchgeführt.

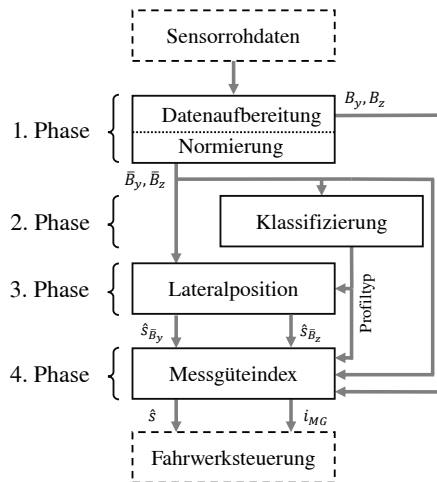


Bild 4.1: Ablaufdiagramm der Lateralpositions- und Messgüteindexberechnung

Für die Bestimmung der Lateralposition und des Messgüteindex werden die Messdaten in vier Phasen verarbeitet. Abbildung 4.1 zeigt den Ablauf und Zusammenhang mit Ein- und Ausgangsgrößen der einzelnen Phasen. In der ersten Phase werden die Sensorrohdaten aufbereitet und normiert (Abschnitt 4.1). In der zweiten Phase wird der unter dem Sensor befindliche Schienenprofiltyp klassifiziert (Abschnitt 4.2). Die dritte Phase berechnet aus den normierten Messdaten  $\bar{B}$  die Lateralposition der Schiene (Abschnitt 4.3). Die Berechnung der Lateralposition erfolgt nach Magnetfeldkomponenten getrennt. Das Ergebnis dieser Phase sind die berechneten Lateralpositionen  $\hat{s}_{\bar{B}_y}$  und  $\hat{s}_{\bar{B}_z}$ . Die abschließende vierte Phase berechnet den geforderten Messgüteindex (Abschnitt 4.4) und kombiniert die berechneten Lateralpositionen zum Messergebnis, der Lateralposition der Schiene,  $\hat{s}$ . Neben der Lateralposition  $\hat{s}$  wird der Messgüteindex  $i_{MG}$  als Maß der Konfidenz in den Messwert an die Fahrzeugsteuerung übergeben.

### 4.1 Messdatenaufbereitung

Die Verläufe der Magnetfeldkomponenten sind stark von der inhomogenen Magnetfeldausbreitung der ovalen Erregerspule bestimmt (vgl. Abbildung 3.34). Der Luftspalt und das Erdmagnetfeld stellen weitere Einflüsse dar. In den folgenden Abschnitten werden zunächst diese Einflüsse kompensiert. Abschließend werden die kompensierten Messdaten normiert.

#### 4.1.1 Kompensation der ovalen Erregerspule

Zur Kompensation wird die konstante Feldausbreitung der Erregerspule ohne Einfluss eines ferromagnetischen Materials als Nullzustand  $B_{y,Null}$  und  $B_{z,Null}$  definiert. Von den Sensorrohdaten wird bei jeder Messung dieser Nullzustand subtrahiert. Der Einfluss ferromagnetischer Objekte zeigt sich in den kompensierten Messdaten dadurch nun als eine Differenz zu diesem Nullzustand.

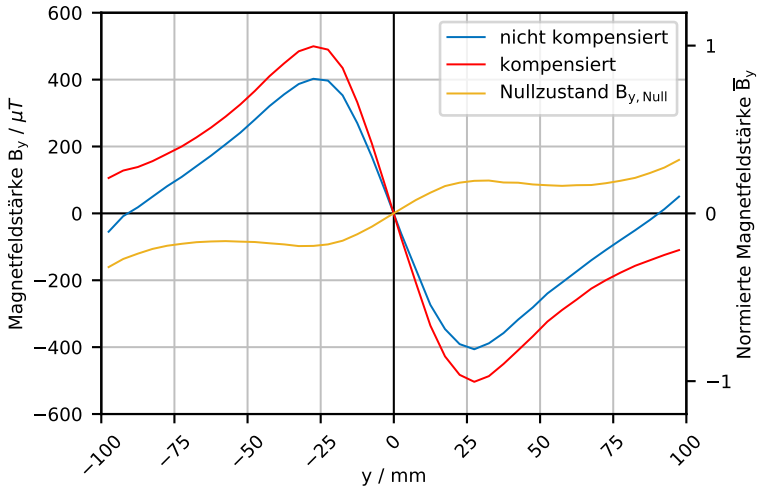
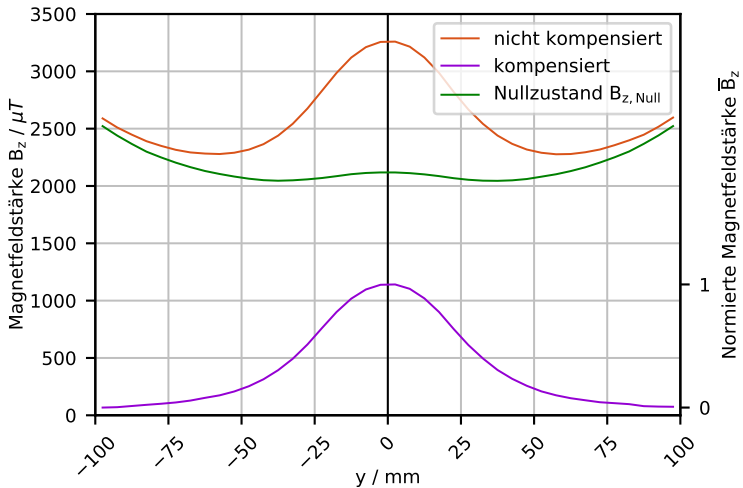
(a) Magnetfeldkomponente  $B_y$ (b) Magnetfeldkomponente  $B_z$ 

Bild 4.2: Auswirkung der Kompensation bei einem 30 mm-Rechteckprofil. Der Nullzustand berücksichtigt den Anbau am Roboterarm. Normierte Skala zusätzlich an rechter Seite angeben.

Abbildung 4.2 zeigt die Auswirkungen der Kompensation anhand simulierter Messdaten eines 30 mm-Rechteckprofils unter Einfluss des Roboterarms. Die vor allem an den Rändern sichtbaren Effekte der inhomogenen Magnetfeldausbreitung der Erregerspule können stark reduziert werden. In  $B_y$  ist die Steigung am Nulldurchgang steiler ausgeprägt. Die Extrema sind zudem betragsmäßig größer.

Der Nullzustand des Sensorprototyps wird über den Mittelwert von 100 statischen Messungen am Prüfstand berechnet. Die Mittelwertbildung verringert dabei das Messrauschen. Das Ergebnis ist ein Kompensationsvektor, der für jedes Hallelement die Komponenten  $B_{y,Null}$  und  $B_{z,Null}$  definiert. Von jedem Sensorrohdatensatz wird zunächst der gemessene Kompensationsvektor subtrahiert um die kompensierten Messdaten zu erhalten.

**Bezug zur Sensorfertigung** Der Kompensationsvektor kann direkt mit dem Hallarray ohne externe Messmittel erfasst werden. Ein Vermessen der Magnetfeldausbreitung der Erregerspule und das anschließende Abspeichern des Kompensationsvektors auf der Sensorlogik sind in der Herstellung einfach möglich. Toleranzen, die in der Fertigung zu verschiedenen Magnetfeldausbreitungen zwischen zwei Sensoren führen, können sensor-spezifisch kompensiert werden. Das Kompensationsverfahren senkt somit Herstellungsaufwand und -kosten. Zusätzlich können mit diesem Ansatz weitere konstante Einflüsse am Einbauort kompensiert werden.

### 4.1.2 Normierung

Nach der Kompensation werden die Messdaten nach Komponenten  $B_y$  und  $B_z$  getrennt normiert. Abbildung 4.2 zeigt an der rechten Seite die normierten Skalen. Die Komponente  $B_y$  wird auf das Intervall  $[-1, 1]$  projiziert, wobei das Maximum der kompensierten Messdaten dem Wert 1 und das Minimum dem Wert  $-1$  entspricht. In  $B_z$  erfolgt eine Normierung auf das Intervall  $[0, 1]$ , da die Messwerte stets positiv sind. Das Maximum der kom-



pensierten Messdaten wird auf 1 abgebildet, das Minimum auf 0. Die kompensierten, normierten Magnetfeldkomponenten werden mit  $\bar{B}_y$  und  $\bar{B}_z$  bezeichnet.

Durch die Normierung werden die Verläufe der Magnetfeldkomponenten auf ein bekanntes Intervall projiziert. Der beschränkte Wertebereich reduziert zum Einen den Auslegungsaufwand der Algorithmen zur Lateralpositionsbestimmung. Zum Anderen kann der Einfluss von Luftspaltänderungen stark reduziert werden.

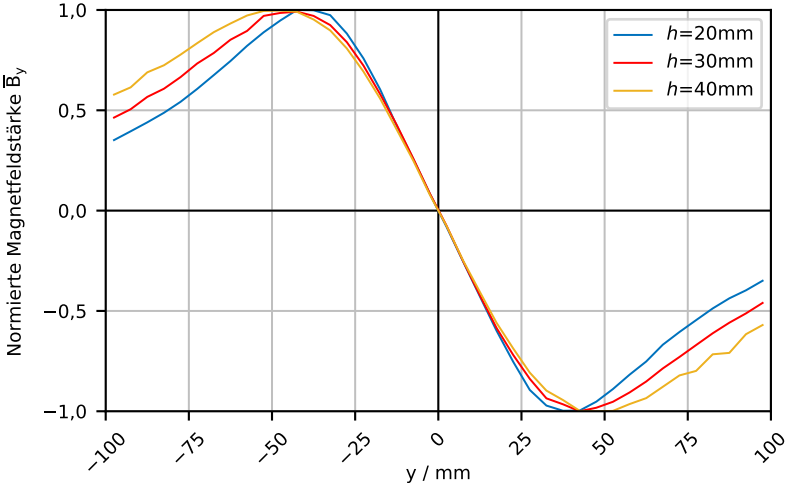
Abbildung 4.3 zeigt die normierten Magnetfeldkomponenten eines S49-Profiles bei verschiedenen Luftspalten. Der Verlauf von  $\bar{B}_y$  zeigt deutlich eine vom Luftspalt unabhängige Steigung der Kurve um die Profilmittle. In  $\bar{B}_z$  liegen die Maxima der Verläufe an der Stelle der Profilmittle bei  $x = 0$ . Luftspaltänderungen zeigen sich in den Kurvenverläufen erst in den Randbereichen, außerhalb der Profilüberdeckung von  $\pm 33,5$  mm, deutlicher.

## Kompensation des Erdmagnetfelds

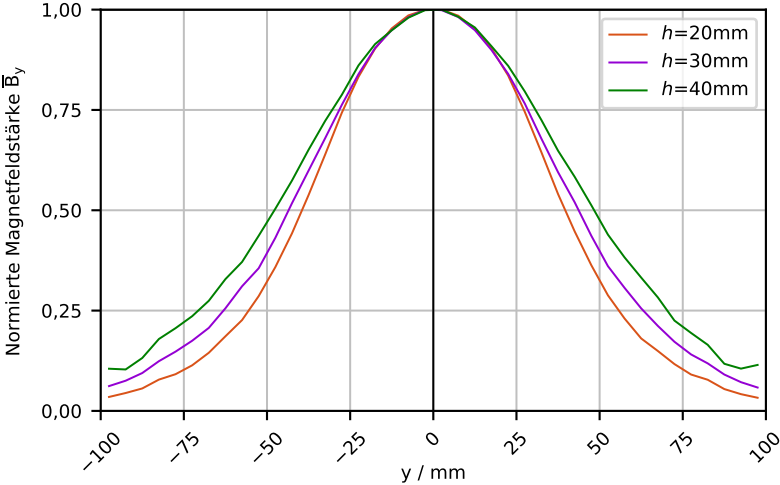
Der in Abschnitt 3.7.3 charakterisierte Einfluss des Erdmagnetfelds wirkt wesentlich auf die Komponente  $B_y$  und muss berücksichtigt werden. Die Komponente  $B_z$  erfährt ebenfalls eine vergleichsweise geringe Beeinflussung. Diese besitzt jedoch keinen Einfluss auf die Lage des Maximums entlang der  $x$ -Achse. Eine konstante Verschiebung von  $B_z$  entlang der  $y$ -Achse durch das Erdmagnetfeld wird durch die Normierung entfernt.

Für die Komponente  $B_y$  ist eine Kompensation unter Einschränkungen möglich. Da für die Berechnung der Lateralposition der Schnittpunkt des Magnetfeldverlaufs mit der  $x$ -Achse verwendet wird, muss dessen Verschiebung durch das Erdmagnetfeld genauer betrachtet werden.

Abbildung 4.4 zeigt exemplarisch den Erdmagnetfeldeinfluss auf den typischen Verlauf eines Profils. Das Erdmagnetfeld  $B_{Erde}$  wirkt auf alle Hallensorelemente gleichermaßen ein, was zu einer Verschiebung der Kurve entlang der  $y$ -Achse, im Beispiel nach unten, führt. Der verschobene rote



(a) Magnetfeldkomponente  $\bar{B}_y$



(b) Magnetfeldkomponente  $\bar{B}_z$

Bild 4.3: Vergleich der normierten Magnetfeldverläufe bei verschiedenen Luftspalten mit S49-Profil (Simulation)

Verlauf stellt die Messdaten der Hallelemente dar. Der blaue Verlauf zeigt den eigentlichen Verlauf ohne Erdmagnetfeldeinfluss mit korrekter Lateralposition (blaue Markierung).

Die Größe der Verschiebung hängt im Betrieb des Sensors von der aktuellen Ausrichtung der Straßenbahn ab und ist daher zeitlich nicht konstant. Der Einfluss der Verschiebung auf die Lateralposition kann über die Steigung des Geradenstücks am Nulldurchgangs näherungsweise bestimmt werden. Bei einem Luftspalt von 20 mm beträgt die Steigung ca.  $-21 \mu\text{T mm}^{-1}$ . Mit der maximalen Erdmagnetfeldstärke von ca.  $40 \mu\text{T}$  entsteht ein Messfehler  $e$  der Lateralposition von  $\approx 1,9 \text{ mm}$ .

Durch das Erdmagnetfeld verschiebt sich die  $x$ -Koordinate des Nulldurchgangs in negative Richtung. Die Position der Profilmittte und die des Nulldurchgangs sind nicht mehr identisch. Es bildet sich ein Fehler, der von Betrag und Richtung des Erdmagnetfelds abhängt, zwischen Nulldurchgang und tatsächlicher Profilmittte aus.

Eine naheliegende Möglichkeit ist es, das Erdmagnetfeld mit einem zusätzlichen Hallelement außerhalb des Einflusses der Erregerspule zu messen. Der Erdmagnetfeldeinfluss kann anschließend aus den Hallarraymessdaten herausgerechnet werden, da Betrag und Richtung bekannt sind. Das Sensorkonzept wird allerdings durch den zusätzlichen Aufwand komplexer. Alternativ kann die Symmetrie des Schienenkopfprofils ausgenutzt werden. Ohne Einfluss des Erdmagnetfelds sind Maximum und Minimum betragsmäßig gleich (blaue Markierungen auf unverschobener Kurve) und der Verlauf ist  $y$ -achsen-symmetrisch. Erst durch das Erdmagnetfeld verändert sich der Abstand der Extrema zur  $x$ -Achse (rote, verschobene Extrema). Wird eine Parallele (gelb) zur  $x$ -Achse mittig zwischen Maximum und Minimum gelegt und wird anschließend die verschobene Kurve (gelbe Markierung) mit der Parallelen geschnitten, so kann die Lateralposition des Profils über den Schnittpunkt bestimmt werden.

Die vorher definierte Normierung entspricht genau diesem Vorgehen. Mit der Messdatennormierung (siehe rechte Skala der Abbildung 4.4) kann

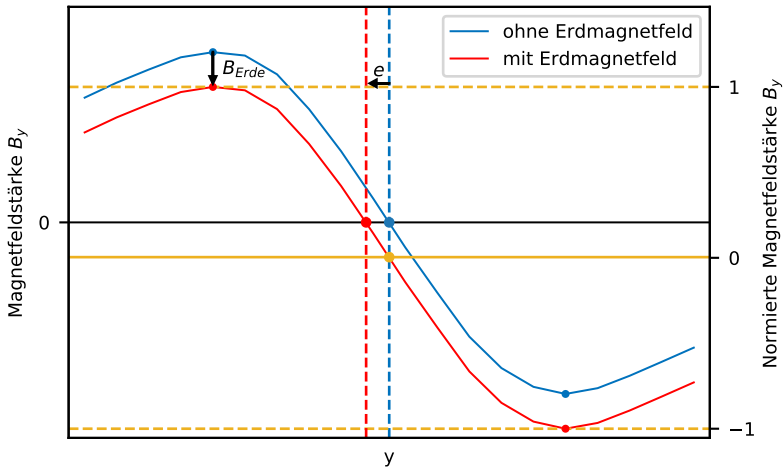


Bild 4.4: Beispiel einer Verschiebung von  $B_y$  entlang der  $y$ -Achse durch das Erdmagnetfeld. Durch Normierung (rechte Skala) kann die korrekte Lateralposition (blaue bzw. gelbe Markierung) bestimmt werden.

der Einfluss des Erdmagnetfelds auch in  $x$ -Richtung reduziert werden. Der Schnittpunkt (gelbe Markierung) der verschobenen Kurve (rot) mit der Mittelachse (gelb) stimmt mit der korrekten Lateralposition (blau) überein.

## 4.2 Klassifizierung des Schienenprofils

In der zweiten Phase wird mittels der normierten Messdaten der Schienenprofiltyp bestimmt. Ein Verfahren, welches eine Klassifizierung durchführt, wird auch Klassifikator genannt. Der Klassifikator soll zwischen einem S49-Profil und einem Ri59N-Profil unterscheiden können. Kann der Profiltyp bei gestörten Messdaten nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit richtig bestimmt werden, so soll dies ebenfalls erkannt werden und der Wert *Profil unbekannt* zurückgegeben werden. Dies ist für die Berechnung des Messgüteindex ausschlaggebend, da ohne Wissen des aktuell unter dem Sensor befindlichen

Schientyp keine ausreichend genaue Lateralpositionsberechnung möglich ist.

Der hier vorgestellte Klassifikator arbeitet mit den  $\bar{B}_z$ -Daten einer Messung. Ein ebenfalls getesteter Klassifikator mit  $\bar{B}_y$ -Daten weist eine unzureichende Fehlerrate über alle Luftspaltvariationen auf und wird daher in dieser Arbeit nicht näher diskutiert.

Als Klassifizierungsverfahren wird ein künstliches neuronales Netz verwendet (KNN). Das Netz besitzt 40 Eingangsneuronen für die 40  $\bar{B}_z$ -Werte der Hallelemente und eine verdeckte Schicht mit 20 Neuronen. Als Ausgang werden 2 Neuronen, eines für jeden Schienenprofiltyp, festgelegt. Das neuronale Netz berechnet aus den Eingangsmessdaten Werte an den Ausgangsneuronen, die entsprechend interpretiert werden müssen. Im verwendeten Netz stellen sie die Konfidenzen für das Vorhandensein des jeweiligen Schienenprofiltyps, S49 oder Ri59N, als Wert zwischen 0 und 1 dar.

Die Trainingsdaten des neuronalen Netzes bestehen aus realen Messdaten der beiden Profiltypen bei 18 mm Luftspalt. Die Lateralposition wird von  $-20$  mm bis  $20$  mm in  $0,05$  mm-Schritten variiert. Zusätzlich wird ein weiterer Datensatz bestehend aus normal-verteilterm Rauschen erzeugt, um die Ausgabe des Werts *Profil unbekannt* zu trainieren. Die Validierung findet mit Messdaten bei einem Luftspalt von  $20$  mm statt.

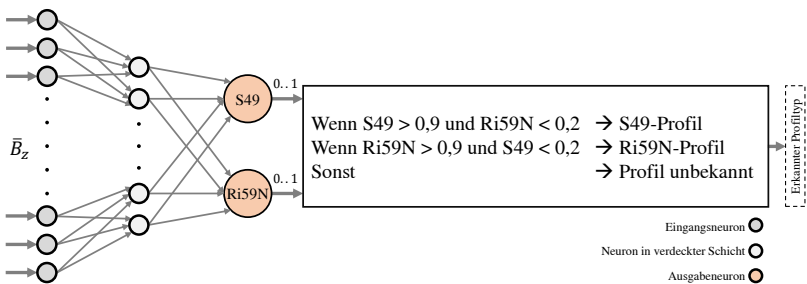


Bild 4.5: Neuronales Netz zur Klassifizierung des Schienenprofils mit abschließender Auswertung

**Ablauf der Klassifikation** Das neuronale Netz berechnet aus den Messdaten einen Wert, der angibt, welchem Profiltyp die Messdaten am ehesten zuzuordnen sind. Je näher der Wert eines bestimmten Ausgabeneurons an 1 liegt, desto wahrscheinlicher handelt es sich um diesen Schienenprofiltyp. Zu sicheren Bestimmung des Schienenprofils wird eine nachgelagerte Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Der Wert des einen Ausgangsneurons muss 0,9 überschreiten, während der Wert des anderen Ausgangsneurons 0,2 unterschreiten muss. Es stellt ein Widerspruch dar, wenn beide Profile mit hoher Wahrscheinlichkeit gleichzeitig erkannt werden. Wertekombinationen, die keinen eindeutigen Rückschluss auf einen Profiltyp zulassen, werden als *Profil unbekannt* gewertet.

**Validierung des Klassifikators** Zum Nachweis der korrekten Erkennung der Profile wird das Netz mit vorher nicht zum Training verwendeten Messdaten auf die Eignung als Klassifikator überprüft. Die Testdaten bestehen aus realen Messwerten beider Profile mit den Luftspalten 10 mm bis 30 mm in 2 mm-Schritten. Die Lateralposition wird dabei über den festgelegten Messbereich des Sensors von  $-10$  mm bis 10 mm in 0,05 mm-Schritten variiert.

Der Klassifikator erkennt in allen Testfällen (Fehler von 0%) das richtige Schienenprofil (siehe Tabelle 4.1). Der Mittelwert der jeweiligen Ausgangsneuronen ist sehr nahe dem Wert 1 und auch die Standardabweichung ist klein. Der Klassifikator bietet in den richtig erkannten Fällen auch eine hohe Erkennungsgüte. In einem generierten Testdatensatz mit normal-verteiltem Rauschen (NR) wird zu keiner Zeit fälschlicherweise ein Profil erkannt. Ein Klassifikator auf Basis künstlicher neuronaler Netze ist prinzipiell zur Unterscheidung der unter dem Sensor befindlichen Schienenprofile geeignet. Er kann mit zusätzlichen Trainingsdaten zur Erkennung weiterer Profile oder zur Detektion anderweitiger Trassierungselemente verwendet werden.

$h$ mm	S49			Ri59N		
	Fehler %	Mittel- wert	Standard- abweichung	Fehler %	Mittel- wert	Standard- abweichung
NR	0	0.00	0.00206	0	0.01	0.01647
10	0	0,99	0,00085	0	0,99	0,00252
12	0	0,99	0,00086	0	0,99	0,00204
14	0	0,99	0,00084	0	0,99	0,00179
16	0	0,99	0,00080	0	0,99	0,00158
18	0	0,99	0,00075	0	0,98	0,00167
20	0	0,99	0,00072	0	0,98	0,00214
22	0	0,99	0,00068	0	0,98	0,00232
24	0	0,99	0,00078	0	0,97	0,00315
26	0	0,99	0,00080	0	0,97	0,00493
28	0	0,99	0,00105	0	0,97	0,00798
30	0	0,99	0,00163	0	0,96	0,01270

Tabelle 4.1: Prozentualer Fehler der Klassifizierung sowie Mittelwert und Standardabweichung des jeweiligen Ausgabeneurons bei unterschiedlichen Luftspalten am S49- und Ri59N-Profil im Vergleich mit normal-verteiltem Rauschen (NR).

### 4.3 Lateralpositionsbestimmung

Nach erfolgreicher Klassifizierung des Schienenprofils wird in der dritten Phase aus den normierten Messdaten die Lateralposition berechnet. Der erkannte Profiltyp bestimmt dabei, welcher profilspezifische Algorithmus zur Anwendung kommt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden anhand des S49-Profiles verschiedene Ansätze zur Berechnung der Lateralposition auf Basis der Daten  $\bar{B}_y$  und  $\bar{B}_z$  vorgestellt. Es soll gezeigt werden, welche Ansätze prinzipiell geeignet sind. In

Abschnitt 4.3.4 werden die Ansätze gesamthaft mit verschiedenen Testdaten anhand von Kennzahlen verglichen.

Die Algorithmenentwicklung wird zum Einen mit dem Wissen über die qualitativen Verläufe analytisch mittels Regression durchgeführt. Die Algorithmen nutzen dabei in  $\bar{B}_y$  die Korrelation zwischen Schienenprofilmitte und Nulldurchgang aus und bestimmen darüber die Lateralposition (Abschnitt 4.3.1). In  $\bar{B}_z$  wird die Mitte des Maximumplateaus bestimmt, welche ebenfalls mit der Profilmitte korreliert (Abschnitt 4.3.2).

Zum Anderen wird alternativ bei beiden Komponenten ein neuronales Netz trainiert und überprüft, ob künstliche neuronale Netze prinzipiell geeignet sind, die Lateralposition zu bestimmen (Abschnitt 4.3.3).

### 4.3.1 Algorithmen unter Verwendung von $\bar{B}_y$

Im folgenden Abschnitt werden drei Ansätze beschrieben. Die ersten zwei Ansätze verwendenden eine lineare Regression als Basis und werden mit *Lineare Regression* und *erweiterter linearer Regression* bezeichnet. Der dritte Ansatz nutzt eine Spline-Regression und wird *Spline-Regression- $\bar{B}_y$*  genannt.

#### Lineare Regression

Der Nulldurchgang von  $\bar{B}_y$  wird mittels einer Geraden im Profilmittenbereich angenähert. Abbildung 4.6 zeigt die Funktionsweise dieses Ansatzes. Als erstes werden die Messpunkte der beiden Extrema gesucht (rote Markierungen). Die Extrema umschließen den Profilmittenbereich (Intervall), der grün hinterlegt ist. Über alle Messpunkte des Profilmittenbereichs wird mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (engl. Least-Square, LSQ) eine Ausgleichsgerade (LSQ Gerade, grün) bestimmt.

Die x-Koordinate des Schnittpunkts (gelbe Markierung) der Ausgleichsgeraden mit der x-Achse ist die berechnete Lateralposition des Profils und der Ausgabewert des Algorithmus'.



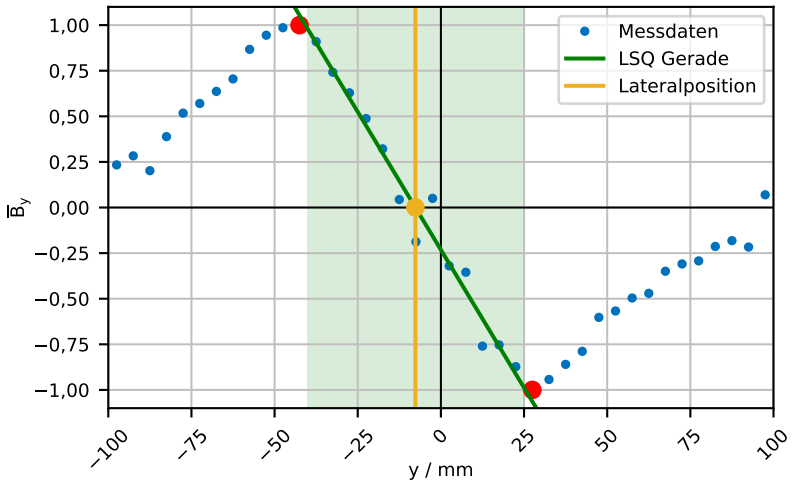


Bild 4.6: Funktionsweise Lateralpositionsbestimmung *Lineare Regression*  $\bar{B}_y$

### Erweiterte lineare Regression

Die Bestimmung des Maximums bzw. Minimums innerhalb der *linearen Regression* erfolgt durch eine einfache Suche des größten bzw. kleinsten Werts innerhalb der Messdaten. Die Messdaten werden beginnend bei  $x = -97,5\text{ mm}$  nacheinander in positive  $x$ -Richtung verglichen. Diese Art der Extremasuche eignet sich nur bedingt zur korrekten Bestimmung des Intervalls für die Ausgleichsgerade. Durch Störungen in den Messdaten können die Extrema nach außen verschoben werden. Abbildung 4.7 zeigt die zur Regression verwendeten Extrema mit roten Markierungen auf einem Datensatz, dessen Maximum sehr flach ausgeprägt ist. Die roten Kreuze sind Messdatenpunkte, die ebenfalls Kandidaten zur Festlegung der Intervallgrenze darstellen. Die Ausgleichsgerade kann mit kleineren Fehlerquadraten berechnet werden, wenn der Messpunkt weiter rechts im Maximum verwendet wird. Das Intervall wird um den rot hinterlegten Bereich verkleinert. Am Minimum ist in der Darstellung bereits der beste Messpunkt

gewählt.

Dieser Ansatz mit verbesserter Extremasuche wird als *erweiterte lineare*

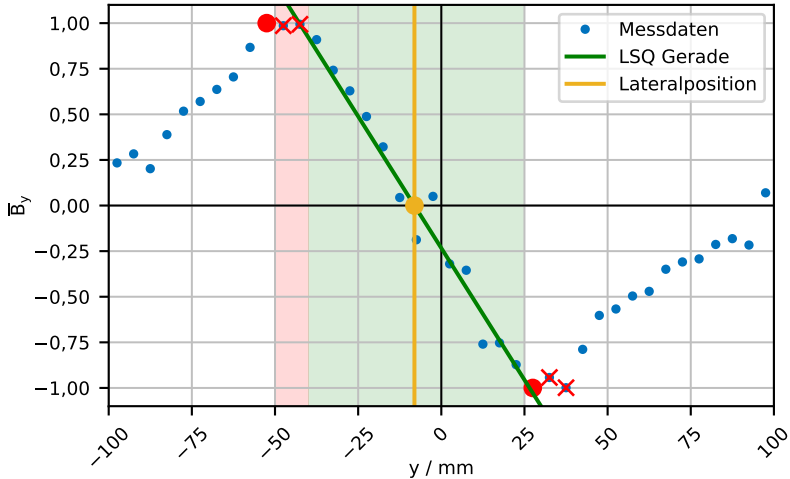
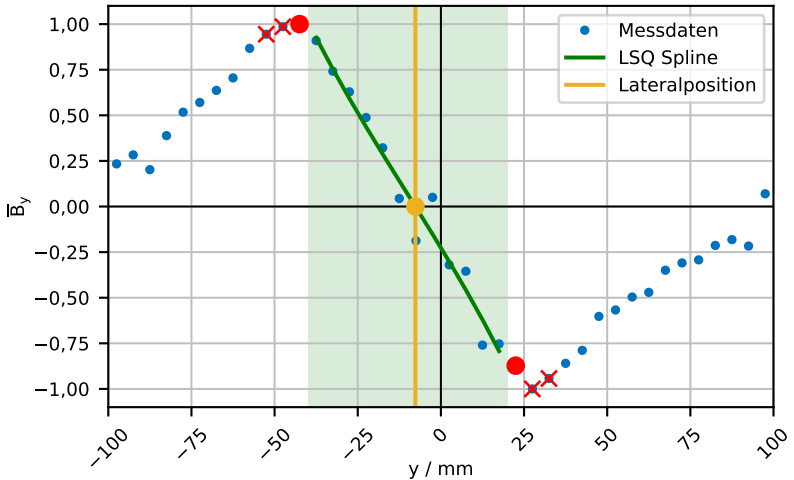


Bild 4.7: Erweiterte Funktionsweise der linearen Regression  $\bar{B}_y$

*Regression* bezeichnet. Die Extremasuche beginnt mit der Suche nach den jeweils drei Messpunkten mit maximalen bzw. minimalen Wert. Aus diesen drei Punkten wird jeweils der Punkt mit der kleinsten betragsmäßigen  $x$ -Koordinate ausgewählt. Die Ausgleichsgerade wird anschließend auf dem einschließenden Intervall (im Beispiel grün hinterlegt) berechnet. Mit dieser Erweiterung wird ein kleinerer Fehler der Lateralpositionsbestimmung erwartet.

### Spline-Regression- $\bar{B}_y$

Gemäß der Extremasuche der *erweiterten linearen Regression* wird innerhalb des Intervalls (grün hinterlegt) eine Ausgleichs-Spline 3.-Grades bestimmt (siehe Abbildung 4.8). Der Schnittpunkt der Spline mit der  $x$ -Achse ist die berechnete Lateralposition (gelb). Die Spline kann im Vergleich zur

Bild 4.8: Funktionsweise der Spline-Regression  $\bar{B}_y$ 

linearen Regression einen nicht ideal geraden Verlauf des Nulldurchgangs, wie in Abbildung 3.35a zu sehen, besser abbilden und möglicherweise bessere Ergebnisse bei der Lateralpositionsberechnung aufweisen.

#### 4.3.2 Algorithmen unter Verwendung von $\bar{B}_z$

Zur Bestimmung der Lateralposition mittels  $\bar{B}_z$  werden in diesem Abschnitt zwei Ansätze vorgestellt. Die Ansätze bestimmen jeweils die Plateaumitte durch Regressionsverfahren. Der erste Ansatz wird mit *Spline-Regression- $\bar{B}_z$*  bezeichnet, der zweite mit *Spline-Regression an den Ästen*.

##### Spline-Regression- $\bar{B}_z$

Im Kurvenverlauf von  $\bar{B}_z$  wird der Bereich um das Maximum mit einer Spline angenähert. Dazu wird im ersten Schritt das Maximum der Messdaten gesucht (siehe Abbildung 4.9, rote Markierung). Im Intervall  $\pm 50$  mm um das Maximum wird durch die Messdaten eine Ausgleichs-Spline 4.-Grades

gelegt. Das Maximum der Spline wird berechnet und die x-Koordinate des Maximums als berechnete Lateralposition ausgegeben.

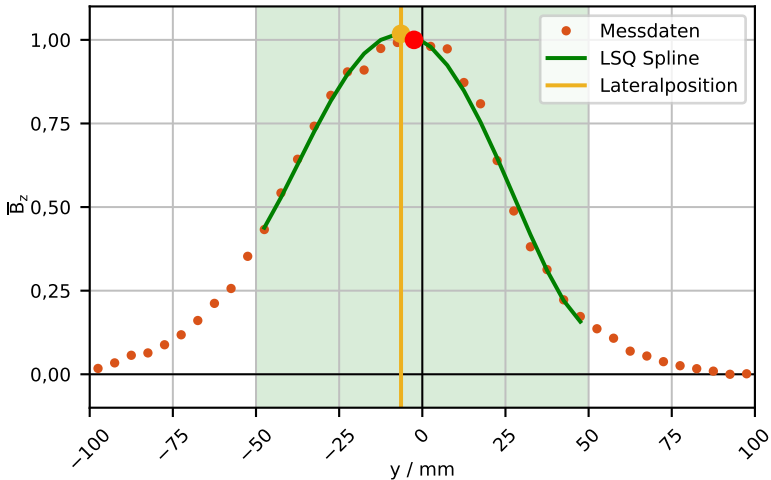


Bild 4.9: Funktionsweise der Spline-Regression in  $\bar{B}_z$

## Spline-Regression an den Ästen

Bei diesem Ansatz wird der rechte und linke Ast des Maximumplateaus durch Splines angenähert. Die Funktionsweise wird anhand Abbildung 4.10 beispielhaft beschrieben.

Zuerst wird das Maximum aus den Messdaten bestimmt (rote Markierung). Im zweiten Schritt wird über den Parameter  $a$  rechts- und linksseitig der Intervallbeginn an den jeweiligen Ästen festgelegt. Die Breite des Intervalls wird über den Parameter  $b$  beschrieben. Innerhalb der Intervalle wird jeweils eine Spline-Regression durchgeführt (grüne Kurven). Beide Splines werden mit einer Parallelen zur x-Achse (schwarz) geschnitten (grüne Schnittpunkte). Die Höhe der Schnittparallele wird über den Parameter  $c$  festgelegt. Auf der Schnittparallelen wird die Mitte (gelbe Markierung) zwischen den bei-

den Schnittpunkte der Splines bestimmt. Die  $x$ -Koordinate dieses Schnittpunkts wird als der berechnete Lateralversatz ausgegeben.

Eine vollfaktorielle Optimierung über verschiedene Luftspalte und Lateralpositionen liefert die Parameter  $a = 35\text{ mm}$ ,  $b = 20\text{ mm}$  und  $c = 0,5$ . Die Abbildung 4.10 verwendet zur Verbesserung der Anschaulichkeit andere Werte.

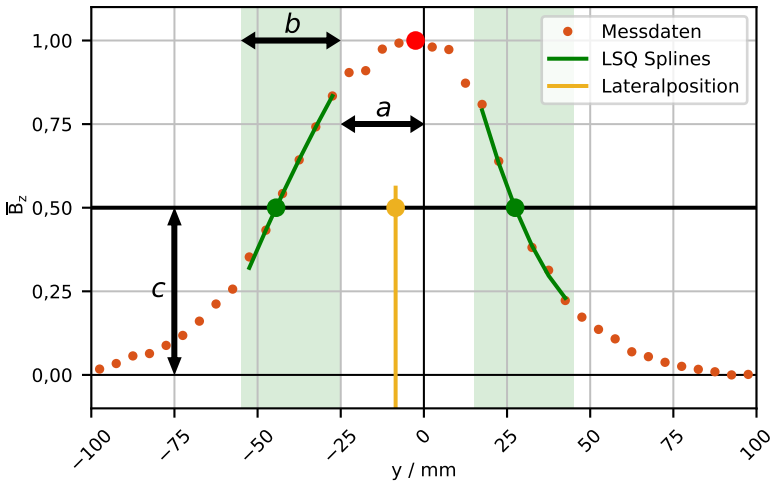


Bild 4.10: Funktionsweise mit Spline-Regression auf rechten und linkem Ast in  $\bar{B}_z$

### 4.3.3 Neuronale Netze

Als letzter Ansatz werden neuronale Netze zur Berechnung der Lateralposition untersucht. Die Eignung neuronaler Netze wird an beiden Magnetfeldkomponenten überprüft. Es werden dazu zwei separate Netze trainiert. Das jeweils verwendete neuronale Netz besteht aus einer Eingangsschicht mit 40 Eingangsneuronen für die 40 normierten Werte der entsprechenden Magnetfeldkomponente. Der weitere Aufbau besteht aus einer verdeckten Schicht

mit 80 Neuronen und einer Ausgangsschicht mit einem Neuron. Als Aktivierungsfunktion wird eine lineare Aktivierungsfunktion verwendet.

Die Trainingsdaten des neuronalen Netzes bestehen aus einem Datensatz realer Messwerte. Die Lateralposition wird von  $-20$  mm bis  $20$  mm in  $0,05$  mm-Schritten bei einem Luftspalt von  $18$  mm variiert. Der Trainingsbereich wird absichtlich größer als der spätere Messbereich gewählt um bei  $\pm 10$  mm keine Randeffekte zu erhalten.

### 4.3.4 Vergleich der Algorithmen

Zunächst wird das Vorgehen der Nachweisführung und die verwendeten Kennzahlen beschrieben. Die Kennzahlen werden mittels der gleichen realen Messdatensätze für jeden vorgestellten Ansatz berechnet. Im Anschluss können die Algorithmen anhand der Kennzahlen verglichen und somit eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der Algorithmen getroffen werden. Der Vergleich erfolgt zunächst getrennt nach Magnetfeldkomponenten. Abschließend wird eine Kombination zweier Algorithmen zur Fehlerreduzierung und Genauigkeitsverbesserung diskutiert.

### Nachweisführung

Für den Testdatensatz werden auf dem Prüfstand mit einem S49-Profil reale Messdaten generiert und abgespeichert. Die Berechnung der Kennwerte findet im Anschluss offline statt. Die Lateralposition wird von  $-10$  mm bis  $10$  mm in  $0,05$  mm-Schritten, der Luftspalt von  $10$  mm bis  $30$  mm in  $2$  mm-Schritten variiert. Der Prüfstand wird bei der Aufzeichnung der Messdaten nicht gegenüber dem Erdmagnetfeld verdreht und die Kompensationsdaten enthalten den Erdmagnetfeldeinfluss, der damit vollständig kompensiert wird. Es befindet sich kein weiteres ferromagnetisches Material im Erfassungsbereich.

Mit jedem Algorithmus wird für jeden Messdatenpunkt die Lateralposition berechnet. An jedem Messdatenpunkt ist die real eingestellte Lateralposi-

tion zusätzlich abgespeichert. Somit kann für jeden Messdatenpunkt die Abweichung zwischen eingestellter und gemessener Lateralposition bestimmt werden. Aus den Abweichungen werden zwei Kennzahlen pro eingestelltem Luftspalt abgeleitet. Die Kennzahl  $e_{max}$  beschreibt den maximalen absoluten Messfehler der Lateralposition in mm. Die Kennzahl  $\sigma_e$  beschreibt die Standardabweichung der absoluten Messfehler in mm.

Eine höhere Genauigkeit ist mit kleineren  $e_{max}$  zu erreichen. Kleinere Werte von  $\sigma_e$  bedeuten eine niedrigere Streuung der Messwerte und damit eine höhere Leistungsfähigkeit des Ansatzes. Ein geeigneter Ansatz minimiert beide Kennzahlen gleichermaßen.

### Ergebnisse $\bar{B}_y$

Tabelle 4.2 zeigt die Kennzahlen der Algorithmen basierend auf  $\bar{B}_y$ . Die *erweiterte lineare Regression* kann in fast allen Testfällen die besten Ergebnisse liefern. Sowohl der maximale Fehler als auch die Standardabweichung sind im Vergleich am kleinsten. Die *Spline-Regression* kann gegenüber der *linearen Regression* nicht überzeugen. Sie schneidet zwar nicht in allen Testfällen schlechter als die *erweiterte lineare Regression* ab, ist jedoch im Mittel weniger geeignet.

Das *neuronale Netz* zeigt für Luftspalte bis 26 mm gute Ergebnisse. Es liefert in diesem Bereich der *Spline-Regression* ähnliche Werte. Für Luftspalte größer 26 mm ist das Netz nicht praktikabel, da es keine plausiblen Ergebnisse liefert.

Unter den Ansätzen ist die *erweiterte lineare Regression* am besten als Berechnungsalgorithmus für die Lateralposition geeignet. Die *lineare Regression* und die *Spline-Regression* sind jedoch nicht wesentlich schlechter und liefern ebenfalls niedrige absolute Abweichungen  $< 1,05$  mm.

Das *neuronale Netz* ist zwar prinzipiell geeignet, liefert jedoch bei großem Luftspalt keine brauchbaren Werte. Da die Leistungsfähigkeit neuronaler Netze direkt vom Aufbau, von den verwendeten Trainingsdaten und der Art

des Trainings bestimmt wird, ist hier noch Potential zur Verbesserung vorhanden. Dies kann aber im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden.

### **Ergebnisse $\overline{B}_z$**

Tabelle 4.3 zeigt die Kennzahlen der drei Ansätze auf Basis von  $\overline{B}_z$ . Die *Spline-Regression* liefert oft maximale Abweichungen  $>1$  mm. Die Standardabweichungen sind mit  $>0,50$  mm ebenfalls hoch. Die *Spline-Regression an den Ästen* zeigt ein besseres Verhalten, jedoch sind auch maximale Abweichungen  $>1$  mm vorhanden. Die Standardabweichung ist hier aber zum größten Teil  $<0,50$  mm.

Das *neuronale Netz* kann über alle Luftspalte  $>10$  mm die besten Ergebnisse liefern. Die maximale Abweichung und die Standardabweichung sinken sogar mit steigendem Luftspalt.

Aus den drei Verfahren ist das neuronale Netz am besten geeignet. Die Regressionsverfahren liefern deutlich größere Abweichungen.

### **Vergleich zwischen $B_y$ und $B_z$**

Grundsätzlich ist die maximale Messabweichung der Algorithmen in  $B_z$  größer als die der Algorithmen in  $B_y$ . Dies kann auf den einfach zu berechnenden Nulldurchgang in  $B_y$  zurückgeführt werden. Dieser ist in den Messdaten stets deutlich ausgeprägt und einfacher zu bestimmen als die Position des Maximums in  $B_z$ . Unerwarteterweise kann das neuronale Netz in  $B_z$  besser aus den Messdaten auf die Lateralposition zurückschließen. Es bietet sich für weitere Forschungen an, die Eigenschaften des Kurvenverlaufs, die das neuronale Netz für die Berechnung nutzt, zu untersuchen.

Die Standardabweichungen fallen im Mittel in  $B_z$  höher aus und streuen damit weiter als die in  $B_y$ . Für eine höhere Messgenauigkeit unter Verwendung eines einzelnen Algorithmus sind daher die Algorithmen in  $B_y$  besser geeignet. Ein Hallsensorarray zur Bestimmung der Lateralposition kann somit auch mit der alleinigen Messung der Komponente  $B_y$  umgesetzt werden.



$\bar{B}_y$									
Luftspalt	Lineare Regression		erw. lineare Regression		Spline-Regression		Neuronales Netz		
	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$e_{max}$	$\sigma_e$
10	0,51	0,23	0,31	0,13	1,05	0,39	0,43	0,28	
12	0,57	0,27	0,32	0,14	0,94	0,37	0,44	0,31	
14	0,63	0,27	0,35	0,14	0,84	0,35	0,53	0,34	
16	0,60	0,27	0,33	0,14	0,76	0,33	0,56	0,36	
18	0,59	0,26	0,42	0,16	0,76	0,32	0,54	0,36	
20	0,59	0,26	0,42	0,17	0,72	0,31	0,50	0,34	
22	0,68	0,28	0,42	0,17	0,69	0,29	0,45	0,31	
24	0,80	0,30	0,39	0,16	0,64	0,29	0,43	0,29	
26	0,79	0,32	0,43	0,16	0,62	0,27	0,36	0,24	
28	0,68	0,27	0,52	0,20	0,53	0,25	3348,05	824,50	
30	0,59	0,25	0,61	0,25	0,42	0,22	2841,87	884,94	
	0,80	0,27	0,61	0,17	1,05	0,31	2848,05	155,66	

Tabelle 4.2: Vergleich der Ansätze in  $\bar{B}_y$ . Alle Angaben in mm. Die unterste Zeile zeigt die maximale Abweichung bzw. den Mittelwert der Standardabweichungen innerhalb einer Spalte.

		$B_z$							
		Spline-Regression			Spline-Regression an den Ästen			Neuronales Netz	
Luftspalt	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$	
10	1,32	0,59	0,95	0,43	0,92	0,53			
12	1,02	0,51	0,84	0,29	0,73	0,43			
14	0,86	0,49	0,75	0,24	0,56	0,35			
16	0,93	0,50	0,65	0,22	0,49	0,28			
18	0,99	0,51	0,55	0,22	0,45	0,23			
20	1,01	0,53	0,69	0,24	0,43	0,20			
22	1,07	0,54	0,83	0,27	0,38	0,18			
24	1,13	0,59	1,07	0,40	0,44	0,19			
26	1,16	0,59	1,04	0,42	0,29	0,11			
28	1,21	0,62	1,19	0,51	0,30	0,12			
30	1,27	0,64	1,28	0,60	0,27	0,11			
	1,27	0,56	1,28	0,35	0,92	0,25			

Tabella 4.3: Vergleich der Ansätze in  $B_z$ . Alle Angaben in mm. Die unterste Zeile zeigt die maximale Abweichung bzw. den Mittelwert der Standardabweichungen innerhalb einer Spalte.

## Kombination von Algorithmen

Im entwickelten Prototyp werden bei jeder Messung des Hallarrays alle Magnetfeldkomponenten gemessen. Es liegt also nahe, die Berechnungsverfahren der Lateralposition zu kombinieren. Durch die Kombination wird eine Verbesserung der Genauigkeit erwartet. Dazu wird in diesem Abschnitt ein Kombinationsverfahren vorgestellt und anhand von Testdaten bewertet.

In den vorherigen Vergleichen, Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3, konnte für jede Magnetfeldkomponente das am besten geeignete Verfahren identifiziert werden. Für die Kombination wird in  $\bar{B}_y$  die *erweiterte lineare Regression* und in  $\bar{B}_z$  das *neuronale Netz* gewählt. Der kombinierte Messwert  $\hat{s}$  wird aus dem gewichteten Mittel der Einzelmesswerte  $\hat{s}_{\bar{B}_y}$  und  $\hat{s}_{\bar{B}_z}$  bestimmt (Gleichung 4.1). Die Gewichte sind die Kehrwerte der erreichten gemittelten Standardabweichungen  $\bar{\sigma}_y$  und  $\bar{\sigma}_z$  der jeweiligen Algorithmen.

$$\hat{s} = \frac{\bar{\sigma}_z \cdot \hat{s}_{\bar{B}_y} + \bar{\sigma}_y \cdot \hat{s}_{\bar{B}_z}}{\bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_z} \quad \bar{\sigma}_y = 0,17, \bar{\sigma}_z = 0,25 \quad (4.1)$$

Tabelle 4.4 zeigt den Vergleich der Einzelansätze gegenüber dem kombinierten Ansatz. Bei festem Luftspalt zeigt sich größtenteils eine Verbesserung der Standardabweichung gegenüber den Einzelansätzen. Die maximale Abweichung kann in diesem Bereich ebenfalls stark reduziert werden. Nur bei großen Luftspalten, 28 mm und 30 mm, ist die Standardabweichung gleich oder etwas schlechter als die der Einzelalgorithmen (in der Tabelle hervorgehoben).

Für das Sensorkonzept wird daher die Kombination aus den Einzelansätzen als Grundlage zur Berechnung der Lateralposition  $\hat{s}$  gewählt.

## 4.4 Messgüteindex

Der Sensor berechnet zusätzlich zur Messgröße den geforderten Messgüteindex. Der Messgüteindex  $i_{MG}$  wird als eine dimensionslose Zahl auf dem

Luftspalt	$\bar{B}_y$		$\bar{B}_z$			
	erw. lineare Regression		Neuronales Netz		Kombination	
	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$
10	0,31	0,13	0,92	0,53	0,19	0,08
12	0,32	0,14	0,73	0,43	0,23	0,08
14	0,35	0,14	0,56	0,35	0,24	0,08
16	0,33	0,14	0,49	0,28	0,21	0,08
18	0,42	0,16	0,45	0,23	0,23	0,09
20	0,42	0,17	0,43	0,20	0,21	0,09
22	0,42	0,17	0,38	0,18	0,28	0,10
24	0,39	0,16	0,44	0,19	0,31	0,11
26	0,43	0,16	0,29	0,11	0,26	0,10
28	0,52	0,20	0,30	0,12	0,28	<b>0,12</b>
30	0,61	0,25	0,27	0,11	0,29	<b>0,13</b>

Tabelle 4.4: Vergleich der besten Einzelansätze und der Kombination. Alle Angaben in mm.

Intervall  $[0, 1]$  definiert. Ein Wert  $> 0,9$  entspricht einer Messung mit ausreichender Güte und Genauigkeit zur Weiterverarbeitung im aktiven Fahrwerk. Werte  $< 0,9$  zeigen eine unzureichend genaue Messung an und sollen von der Fahrwerksteuerung nicht ausgewertet werden. Eine unzureichende Messung kann unter anderem durch eine nicht erfolgreiche Klassifizierung, durch Störsignale oder durch den Ausfall eines oder mehrerer Hallelemente ausgelöst werden.

In diesem Unterkapitel wird eine Methode zur Berechnung des Messgüteindex in drei Schritten vorgestellt (Abbildung 4.11). Innerhalb der Schritte müssen verschiedene Bedingungen erfüllt werden. Wird eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, so handelt es sich um eine ungültige Messung mit

Messgüteindex  $i_{MG} = 0$ . Durch die Ausgabe des Messgüteindex kann die Fahrwerksteuerung zu jeder Zeit entscheiden, welche drei Sensoren die genauesten Messergebnisse ausgeben. Der vierte Sensor kann zusätzlich zur Plausibilitätsprüfung eingesetzt werden. Siehe auch Abschnitt 3.2.2 für Überlegungen zur Redundanz.

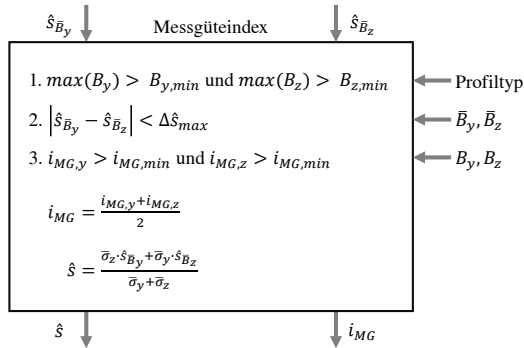


Bild 4.11: Berechnungsvorschrift der Lateralposition und des Messgüteindex in der 4. Phase

#### 4.4.1 Ablauf

Der erste Schritt prüft die Messung auf eine ausreichende Signalstärke. Im zweiten Schritt werden die berechneten Lateralpositionen verglichen. Für den dritten Schritt werden zunächst zwei Einzelmessgüteindizes  $i_{MG,y}$  und  $i_{MG,z}$  aus den Messdaten berechnet und gegenüber einem Grenzwert geprüft. Sind alle Bedingungen erfüllt, so wird der Gesamtmessgüteindex  $i_{MG}$  als arithmetisches Mittel und die Messgröße  $\hat{s}$  als gewichtetes Mittel nach Abschnitt 4.3.4 berechnet.

**1. Schritt** Im ersten Schritt werden die kompensierten Messdaten auf eine ausreichende Signalstärke überprüft. Die Maximalwerte der Magnetfeldkomponenten  $\max(B)$  müssen dabei über einem Grenzwert  $B_{min}$  liegen.

Liegt eine der beiden Komponenten darunter, so wird die Messung als ungültig angesehen und als Messgüteindex wird 0 ausgegeben. Die weiteren Bedingungen werden nicht überprüft.

Als Grenzwerte werden  $B_{y,min} = 200\ \mu\text{T}$  und  $B_{z,min} = 700\ \mu\text{T}$  gewählt. Auswertungen der Maximalwerte der Messdaten bei einem Luftspalt von 30 mm ergeben im Mittel in  $B_y \approx 345\ \mu\text{T}$  und in  $B_z \approx 800\ \mu\text{T}$ .

**2. Schritt** Im zweiten Schritt werden die berechneten Lateralpositionen der Algorithmen in  $\bar{B}_y$  und  $\bar{B}_z$  auf Plausibilität geprüft. Hierzu wird die unabhängige Messung in beiden Komponenten und die unterschiedlichen Berechnungsverfahren ausgenutzt. Beide Algorithmen sollten für einen Datensatz ungefähr das gleiche Messergebnis berechnen. Weichen die beiden berechneten Lateralpositionen zu stark von einander ab, so wird die Messung als ungültig verworfen. Eine einzelne gestörte Komponente kann dadurch erkannt werden. Der Grenzwert wird auf  $\Delta\hat{s}_{max} = 1\ \text{mm}$  festgelegt, da dies ungefähr der maximal möglichen Messabweichung nach Tabelle 4.4, Spalten  $\bar{B}_y$  und  $\bar{B}_z$ , entspricht.

**3. Schritt** Im dritten Schritt werden zwei getrennte Messgüteindizes  $i_{MG,y}$  und  $i_{MG,z}$  aus den normierten Messdaten berechnet. Die Funktionsweisen werden in den folgenden Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 detailliert beschrieben. Da die Einzelmessgüteindizes auch gestörte Messungen als gut bewerten können, ist eine nachgelagerte Prüfung notwendig. Jeder Index wird daher zunächst separat auf die Einhaltung des Grenzwerts  $i_{MG,min} = 0,9$  überprüft. Erst wenn im dritten Schritt alle Bedingungen erfüllt sind, wird die Lateralposition und der Gesamtmessgüteindex gemäß den Gleichungen 4.1 und 4.2 berechnet und anschließend an die Fahrwerksteuerung ausgegeben.

$$i_{MG} = \frac{i_{MG,y} + i_{MG,z}}{2} \quad (4.2)$$

Durch die aufwendige Prüfung verschiedener Merkmale der Messdaten, auch in den beiden Einzelkomponenten, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass fehlerhafte Messungen zuverlässig erkannt werden.

#### 4.4.2 Berechnung Einzelmessgüteindex $i_{MG,y}$

Zur Berechnung des Einzelmessgüteindex  $i_{MG,y}$  wird eine Vorschrift definiert, die die Abweichung der Messdaten zum erwarteten charakteristischen Verlauf in  $\bar{B}_y$  beschreibt.

Als Basisdaten wird der charakteristische Verlauf einer Messung mit hoher Güte und Genauigkeit in  $\bar{B}_y$  als Referenzkurve dauerhaft abgespeichert. Die Referenzkurve wird als Mittelwert aus 100 Einzelmessungen an der Lateralposition  $s = 0$  bei einem Luftspalt von 20 mm berechnet.

Im ersten Schritt wird die Referenzkurve um die berechnete Lateralposition  $\hat{s}_y$  verschoben. Ist die Lateralposition korrekt berechnet worden und sind die Messdaten von ausreichender Güte, so liegen Messdaten und Referenzkurve übereinander (siehe Abbildung 4.12). Im nächsten Schritt werden die beiden Kurven miteinander multipliziert. Da beide Kurven normiert sind, liegt auch die resultierende Kurve auf dem Intervall  $[-1, 1]$ . Liegen die Extrema der Messdaten zusätzlich an der erwarteten Position, die durch die Referenzkurve vorgegeben wird, so besitzt die resultierende Produktkurve zwei ausgeprägte Maxima,  $\bar{B}_{y,max,1}$  und  $\bar{B}_{y,max,2}$ . Zwischen den x-Koordinaten der Maxima liegt die berechnete Lateralposition. Liegen die Maxima über dem experimentell ermittelten Grenzwert von 0,8, so wird die Messung als gültig bewertet. Die betragsmäßige Differenz zwischen den Maximalwerten (siehe Gleichung 4.3) bestimmt abschließend den Wert des Einzelmessgüteindex nach Gleichung 4.4.

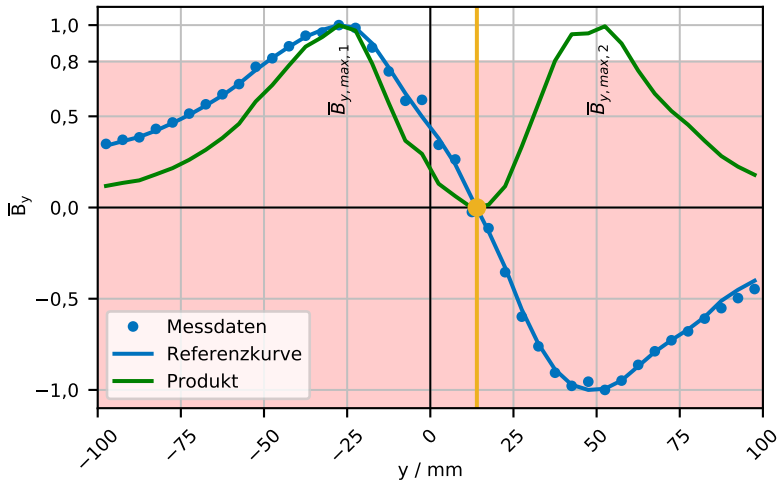


Bild 4.12: Grafische Darstellung der Berechnung des Einzelmessgüteindex

$$\Delta_{\bar{B}_{y,max}} = |\bar{B}_{y,max,1} - \bar{B}_{y,max,2}| \quad (4.3)$$

$$i_{MG,y} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta_{\bar{B}_{y,max}}}{0,8} & \bar{B}_{y,max,1} > 0,8 \text{ und } \bar{B}_{y,max,2} > 0,8 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.4)$$

Durch den Vergleich mit der Referenzkurve können Messdaten auf ihren Verlauf hin untersucht werden. Gestörte Messsignale, die nicht vom Klassifikator als *Profil unbekannt* erkannt wurden, können bereits hier teilweise erkannt werden.

Dieses Verfahren stellt einen Ansatz zur Berechnung des Einzelmessindex dar. Es sind weitere Ansätze denkbar, die andere Eigenschaften des charakteristischen Verlaufs ausnutzen. Da nicht alle Einflüsse und Störungen bekannt sind, kann dieses Verfahren auch falsche Berechnungen als eine ausreichend genaue Messung mit hoher Güte bewerten.



### 4.4.3 Berechnung Einzelmessgüteindex $i_{MG,z}$

Zur Berechnung des Einzelmessgüteindex  $i_{MG,z}$  wird die berechnete Lateralposition  $\hat{s}_z$  des neuronalen Netzes auf Plausibilität überprüft. Dazu wird die Abweichung der Lateralposition zum Ergebnis eines weiteren Algorithmus' berechnet. Der zweitbeste Algorithmus zur Berechnung der Lateralposition ist die *Spline-Regression an den Ästen* des Maximums in  $\bar{B}_z$  (siehe Tabelle 4.3). Als Maß der Übereinstimmung wird die betragsmäßige Abweichung der berechneten Lateralpositionen zwischen neuronalem Netz und Spline-Regression an den Ästen,  $\Delta\hat{s}_{B_z}$ , gewählt (siehe Gleichung 4.5).

Ist die Abweichung größer als 2 mm, wird die Messung als ungültig gewertet und ein Einzelmessgüteindex von 0 ausgegeben. Bei einer Abweichung geringer als 2 mm wird der Einzelmessgüteindex gemäß Gleichung 4.6 als Projektion der Abweichung auf das Intervall  $[0, 1]$  berechnet. Bei einer Abweichung von 0 mm wird ein Index von 1 ausgegeben.

$$\Delta\hat{s}_{B_z} = \left| \hat{s}_{B_z} - \hat{s}_{B_z, \text{Spline}} \right| \quad (4.5)$$

$$i_{MG,z} = \begin{cases} 0 & \Delta\hat{s}_{B_z} > 2 \text{ mm} \\ 1 - \frac{\Delta\hat{s}_{B_z}}{2 \text{ mm}} & 2 \text{ mm} \geq \Delta\hat{s}_{B_z} \end{cases} \quad (4.6)$$

## 4.5 Störeinflüsse

Zur Teilvalidierung der Funktionsweise des Messgüteindex wird am Prüfstand eine Fahrt über verschiedene Störobjekte durchgeführt. Der Sensor wird bei einem Luftspalt von 20 mm entlang der x-Achse über ein S49-Profil bewegt. Die Bewegung startet bei  $x = 0$  mm und endet bei  $x = 240$  mm. Die Störobjekte werden bei  $x = 150$  mm mittig neben der Schiene auf Höhe der Schienenoberkante platziert und berühren diese.

Als Störobjekte werden stochastische Einflüsse gewählt, da Trassierungsele-

mente auf Grund ihres Volumens und ihrer Masse nicht auf dem Prüfstand eingesetzt werden können und der Sensorprototyp nicht portabel ist. Es werden eine 5-Cent-Münze, ein Schlüssel und ein Metallblock untersucht. Die Münze und der Schlüssel sollen oft verlorene, ferromagnetische Gegenstände, die in einer Stadt anzutreffen sind, darstellen. Der Metallblock soll dabei eine Abdeckung, wie sie z.B. bei einem Regenablauf oder einer Weiche vorkommen, nachbilden. Der Block wird mit der langen Seite (130 mm) entlang der Schiene ausgerichtet. Die Breite des Blocks beträgt 70 mm. Für jedes dieser Störelemente wird eine Testfahrt durchgeführt.

Abbildung 4.13 zeigt in zwei vertikal angeordneten Diagrammen die Auswertung der Fahrt über den Schlüssel, wobei die  $x$ -Position der Schlüsselmitte mit einer roten Linie gekennzeichnet ist. Das obere Diagramm zeigt die betragsmäßige Abweichung  $\Delta\hat{s}$  der berechneten Lateralposition von der erwarteten, korrekten Lateralposition. Das untere Diagramm zeigt den Gesamtmessgüteindex  $i_{MG}$ . Bereiche mit Werten des Messgüteindex kleiner 0,9 sind rot hinterlegt.

In der Abbildung ist deutlich die vom Schlüssel hervorgerufene Messabweichung zu erkennen. Durch den Einfluss des Störobjektes wird die Lateralposition teilweise mit Messabweichungen größer 0,5 mm berechnet. In diesem Bereich kann jedoch über den Messgüteindex kleiner 0,9 sicher die unzureichend genaue Messung des Sensors angezeigt werden. Die vorgestellte Methode zur Berechnung des Messgüteindex kann auch in den anderen untersuchten Testfällen Störungen im Fahrweg sicher erkennen. Die Auswertung dazu findet sich im Anhang (Abschnitt A.1).

**Diskussion** Für den Einsatz im Straßenbahnnetz ist noch weiterer Forschungsbedarf vorhanden. Die gewählten Störobjekte decken nur einen kleinen Teil der möglichen Störungen ab. Prinzipiell zeigt der gewählte Ansatz in der Teilvalidierung sehr gute Ergebnisse. Selbst die vergleichsweise kleine 5-Cent-Münze wird sicher detektiert. Kommen nun größere ferromagnetische Objekte, wie Weichenzungen, Herzstücke und Kreuzungen in den Er-

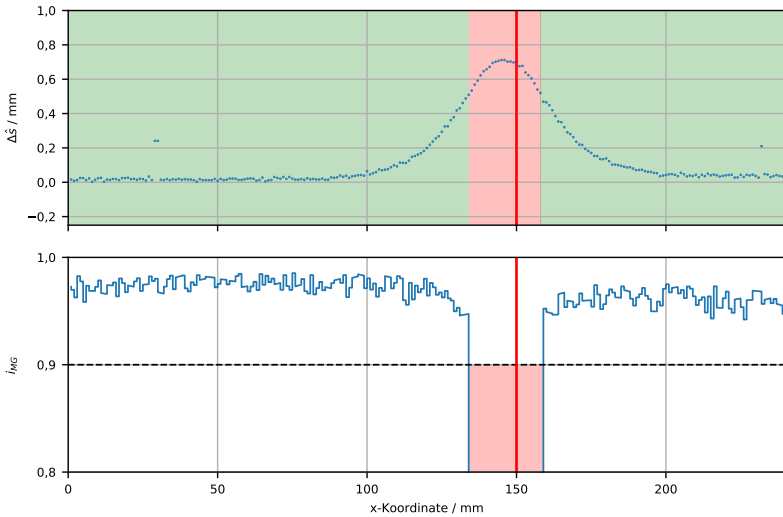


Bild 4.13: Überfahrt über einen Schlüssel an der Position  $x = 150$  mm.

fassungsbereich des Sensors, so werden diese mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls sicher erkannt, da die Beeinflussung deutlich stärker ausfällt. Zur Weiterentwicklung sind dennoch umfangreiche Messungen mit dem Sensor an einer Straßenbahn notwendig, um eine ausreichende Datenbasis zur Algorithmenerweiterung und Vollvalidierung zu erlangen. Die Messungen müssen dabei zusätzlich mit einem Referenzsensor durchgeführt werden, um die Lateralpositionsabweichung  $\Delta s$  im Betrieb bestimmen zu können. Der Messgüteindex kann anschließend offline auf diesen Daten ausgewertet werden. In Bereichen hoher Lateralpositionsabweichung muss der Messgüteindex dies anzeigen. Ist dies nicht der Fall, so muss die Ursache genauer untersucht werden. Dazu wird empfohlen, eine Kamera auf die Schiene unter dem Sensor zu richten, um bei auffälligen Messungen die Fahrt über die Störstelle zu filmen. Im Nachgang kann dann Messdaten, die keine genaue Lateralpositionsbestimmung zulassen, der mögliche Einfluss auf den Sensor durch das Videomaterial zugeordnet werden.



## 5 Validierung

In diesem Kapitel wird der entwickelte Sensor auf seine Anwendungseignung im aktiv gelenkten Radpaar untersucht. Dieser Schritt ist notwendig, da die bereits nachgewiesene korrekte Funktionsweise des vom Restsystem isolierten Sensors in Kapitel 4 nicht zwangsläufig zu einem stabilen Regelverhalten des Fahrwerks ohne Spurkranzanlauf führt. Der Sensor muss in seiner Systemumgebung bestehend aus Fahrwerk, Messkonzept und Regler sowie deren Wechselwirkungen validiert werden.

Die Validierung wird in drei aufeinander aufbauenden Validierungsschritten durchgeführt.

Zuerst wird der Sensor innerhalb der Systemumgebung des vorgestellten Messkonzepts validiert (Abschnitt 5.1). Es wird geprüft, ob das Messkonzept mittels der Hilfsmessgrößen die zu messenden Zustandsgrößen Anlaufwinkel und Lateralversatz ausreichend genau bestimmen kann. Dabei werden das Messrauschen und die Messabweichungen bei verschiedenen Luftspalten untersucht.

Im zweiten Schritt werden Testszenarien definiert. Die Testszenarien stellen eine Fahrt des Fahrwerks auf einer Strecke mit wechselnder Trassierung (Gerade und Kurveneinfahrt) dar und testen so das dynamische Verhalten des aktiv gelenkten Radpaars im geschlossenen Regelkreis. Das Verhalten der Sensoren wird dabei zunächst mit einem Kennfeld nachgebildet. Die Simulationsergebnisse werden anschließend mittels Kennzahlen verglichen. Die Kennzahlen bewerten das Fahrverhalten des AGRs und geben über die Regelgüte der aktiven Spurführung Auskunft.

Im dritten Schritt werden aus den simulierten Testszenarien zwei Testfahrten mit hohen Anforderungen an die Regelung ausgewählt und mittels Hard-

ware-in-the-loop-Ansatz erneut durchfahren. Der Sensorprototyp wird dabei über den Prüfstand in die Fahrwerksimulation eingebunden. Dies weist die Gültigkeit der mit dem Sensorkennfeld berechneten Ergebnisse des vorherigen Validierungsschritts nach.

### 5.1 Validierung der Zustandsmessung

In diesem Validierungsschritt wird das Messkonzept aus Abschnitt 3.2.2 verwendet und mit dem entwickelten Sensor implementiert. Die Verbindung aus Messkonzept und Sensor wird im Folgenden als Teilsystem *Zustandsmessung* bezeichnet. Es wird untersucht, wie sich die implementierte Zustandsmessung zur Bestimmung von Anlaufwinkel und Lateralversatz unter Einsatz des Sensorprototyps verhält. Als charakterisierende Größen werden Messrauschen und Messabweichung bestimmt.

Die folgenden Abschnitte gliedern sich in die Vorstellung der Methodik, der anschließenden Diskussion der Ergebnisse und der Einordnung im Gesamtsystem des AGRs.

#### 5.1.1 Methodik

Zuerst wird das Messrauschen der Zustandsmessung untersucht. Das Messrauschen beschreibt die Streuung der Messwerte von Anlaufwinkel und Lateralversatz im statischen Fall. Hierfür wird das Fahrwerk virtuell an einer Position festgehalten, und es werden dort über einen Zeitraum von 100 ms Messwerte aufgenommen. Eine Messung meint hier das Erfassen der Hilfsmessgrößen mit dem Sensorprototyp unter Einsatz der Algorithmen aus Kapitel 4 und die Berechnung der Messwerte  $\hat{\alpha}$  und  $\hat{\nu}$ . Der Einbauabstand wird für die weitere Validierung auf 0,2 mm festgelegt.

Zur Bestimmung der Messabweichungen der Zustandsmessung wird der Parameterraum der Eingangsgrößen Anlaufwinkel, Lateralversatz und Luftspalt vollfaktoriell untersucht und die Messergebnisse mit diesen Eingangs-

werten verglichen. Der Parameterraum wird durch die Maximalwerte von Anlaufwinkel, Lateralversatz und Luftspalt begrenzt. Der Luftspalt wird zwischen 10, 20 und 30 mm, der Anlaufwinkel zwischen  $-10$  mrad bis  $10$  mrad in  $0,5$  mrad-Schritten und der Lateralversatz  $-3$  mm bis  $3$  mm in  $0,2$  mm-Schritten variiert. Abbildung 5.1 zeigt die Vorgehensweise mit Parameterraum, Zustandsmessung und Ergebnisdatensatz. Die Zustandsmessung implementiert zusätzlich ein inverses Messkonzept, die in Kapitel 4 entwickelten Algorithmen zur Berechnung der Lateralposition des Sensors und das in Kapitel 3 beschriebene Messkonzept. Die Sensoren innerhalb der Zustandsmessung werden über den Prüfstand angebunden. Die Messabweichungen für einen bestimmten Luftspalt  $h$  werden aus dem Ergebnisdatensatz mit  $\alpha$ ,  $\nu$ ,  $\hat{\alpha}$  und  $\hat{\nu}$  berechnet.

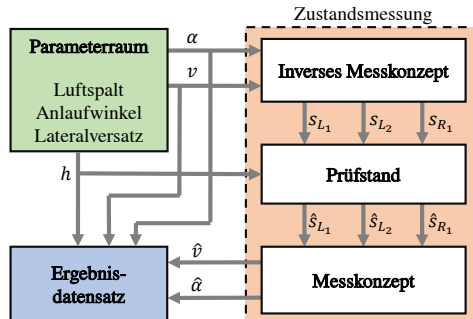


Bild 5.1: Ablauf der Validierung des Sensors im Messkonzept am Prüfstand

## Inverses Messkonzept

Aus den durch den Parameterraum vorgegebenen Zustandsgrößen von Anlaufwinkel  $\alpha$  und Lateralversatz  $\nu$  werden in der Zustandsmessung zunächst die Sollwerte der Hilfsmessgrößen  $s_*$  berechnet. Diese Berechnung wird als *inverses Messkonzept* bezeichnet und ist für jeden Validierungsschritt notwendig. Im Einsatz an einer Straßenbahn müssen diese Werte nicht berech-

net werden, da sie sich über den Fahrwerkszustand und den mechanischen Aufbau nach Vorgaben des Messkonzepts aus Abschnitt 3.2.2 direkt ergeben.

Zur Berechnung der Zustandsgrößen aus den Hilfsmessgrößen werden  $s_{L_1}$ ,  $s_{L_2}$  und  $s_{R_1}$  ausgewählt, da zur eindeutigen Bestimmung von Anlaufwinkel und Lateralversatz nach Abschnitt 3.2.2 nur drei der vier Hilfsmessgrößen benötigt werden.

$$s_{L_1}(\alpha, v) = R + v - \sqrt{R^2 - L^2 - 2L\alpha(v + R)} \quad (5.1)$$

$$s_{L_2}(\alpha, v) = s_{L_1}(-\alpha, v) \quad (5.2)$$

$$s_{R_1}(\alpha, v) = s_{L_1}(\alpha, -v) \quad (5.3)$$

Gleichung 5.1 zeigt die Berechnungsvorschrift für die Hilfsmessgröße  $s_{L_1}$  in Abhängigkeit der Zustandsgrößen, wie sie geometrisch aus dem Messkonzept abgeleitet wurde. Die Gleichung wurde über die Kleinwinkelnäherung vereinfacht.

Da der Kurvenradius während der Fahrt nicht bekannt ist und die Kurve auf der betrachteten Länge als Gerade betrachtet werden kann, wird für die Berechnung der Hilfsmessgrößensollwerte der Kurvenradius vernachlässigt. Der Radius wird mit einem hohem Wert<sup>1</sup> angenommen. Die weiteren Hilfsmessgrößen ergeben sich aus der symmetrischen Anordnung der Sensoren (Gleichungen 5.2 und 5.3). Der linke hintere Sensor  $s_{L_2}$  (vgl. Abbildung 3.7) erfährt den gleichen Lateralversatz wie der Sensor vor dem Rad  $s_{L_1}$ , jedoch wird er um  $-\alpha$  ausgelenkt. Der Sensor an der rechten vorderen Radseite  $s_{R_1}$  erfährt den gleich Anlaufwinkel wie der Sensor auf der anderen Seite vorne, der Lateralversatz geht jedoch negativ in die Hilfsmessgröße ein.

---

<sup>1</sup>  $R_{Gerade} = 10 \cdot 10^6 \text{m}$



## Prüfstand

Der in Abschnitt 3.6.6 aufgebaute Prüfstand kann lediglich die Messung einer Hilfsmessgröße zeitgleich abbilden. Weiterhin ist nur ein Sensorprototyp vorhanden und für eine experimentelle Umsetzung des Messkonzepts müsste das AGR-Fahrwerk bestehend aus Lenkhebeln, Lenkstange und mechanischem Sensoranbau im Maßstab 1:1 nachgebildet werden, was zeit- und kostenintensiv ist.

Zur Reduzierung des Validierungsaufwands werden die Hilfsmessgrößen sequentiell am Prüfstand gemessen. Der Prüfstand erhält dabei als Eingabeparameter den Sollwert der Hilfsmessgröße  $s_*$  und stellt diesen Wert mittels des Roboters als relative Position des Sensors zur Schiene ein. Der Luftspalt wird ebenfalls entsprechend der Vorgabe eingestellt. Abschließend wird eine Messung ausgelöst. Sind alle drei Hilfsmessgrößen erfasst, so werden die Messergebnisse  $\hat{s}_*$  gemeinsam ausgegeben.

## Messkonzept

Die Berechnung der Zustandsgrößen aus den vom Prüfstand erfassten Hilfsmessgrößen  $\hat{s}_*$  erfolgt über die Gleichungen 3.6 und 3.8.

### 5.1.2 Rauschverhalten

Die in der Methodik vorgestellte Messung an einer festen Position über den Zeitraum von 100 ms wird verwendet, um die Rauschcharakteristik analog zu Wei [54] zu bestimmen. In seiner Dissertation verwendet Wei zur Reglerauslegung das Messrauschen eines Laserdistanzensors als Grundlage der Systemmodellierung. Das Messrauschen der Zustandsmessung mit Messkonzept und Sensor sollte ähnlich ausgeprägt sein, um die Modellgrenzen nicht zu verletzen. Der Regler ist zwar robust ausgelegt, jedoch können Abweichungen der Implementierung zur Modellierung nur begrenzt kompensiert werden.

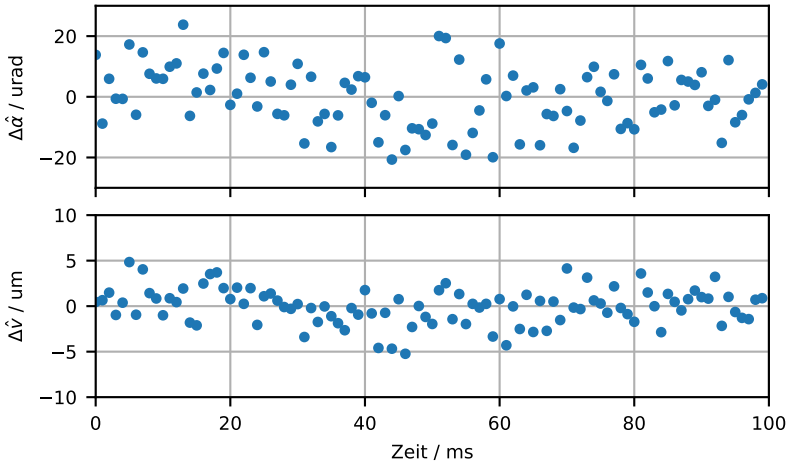


Bild 5.2: Messrauschen Zustandsmessung an der Position  $\alpha = 5 \text{ mrad}$ ,  $v = 1,5 \text{ mm}$  und  $h = 20 \text{ mm}$

Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf der Fehleramplituden des Anlaufwinkels  $\Delta\hat{\alpha}$  und des Lateralversatzes  $\Delta\hat{v}$  über der Zeit. In den Verläufen ist zu erkennen, dass grundsätzlich sehr kleine Fehleramplituden bei beiden Messgrößen erreicht werden. Das Messrauschen ist gering und in dieser Größenordnung nicht relevant.

**Einordnung der Ergebnisse** Die Zustandsmessung mit drei Sensoren weißt auf dem Prüfstand unter kontrollierten statischen Bedingungen ein sehr geringes Messrauschen auf. Die durch den entwickelten Sensor in den Regelkreis eingebrachten Fehler durch Messrauschen sind klein. Unter Berücksichtigung der Versuchsbedingungen muss das Rauschverhalten im Gesamtkontext des aktiven Fahrwerks eingeordnet werden. In der implementierten Zustandsmessung werden alle Anbauteile, Lenkhebel und Rahmen als starr sowie der Luftspalt als konstant angenommen. Dies ist im späteren Betrieb an einer Straßenbahn nicht gegeben. Weiterhin sind die Störeinflüsse

Luftspalt	Anlaufwinkel		Lateralversatz	
	$e_{max}$	$\sigma_e$	$e_{max}$	$\sigma_e$
mm	mrاد	mrاد	mm	mm
10	0,41	0,16	0,08	0,03
20	0,61	0,21	0,16	0,04
30	0,95	0,35	0,15	0,06

Tabelle 5.1: Kennzahlen des Messkonzepts bei Variation von Luftspalt, Anlaufwinkel und Lateralversatz

durch externe magnetische Felder sowie durch das Erdmagnetfeld am Prüfstand ebenfalls konstant. Das statische Rauschverhalten lässt damit keine Rückschlüsse auf das Spurführungsverhalten im geschlossenen Regelkreis des AGRs zu. Es handelt sich hauptsächlich um das durch die Lateralpositionsberechnung verstärkte Rauschen der Hallsensorelemente.

### 5.1.3 Messabweichungen

Für die Zustandsmessung werden analog zu Kapitel 4 die maximale Messabweichung  $e_{max}$  und die Standardabweichung der Messabweichung  $\sigma_e$  berechnet. Tabelle 5.1 zeigt für die untersuchten Luftspalte die Kennzahlen für Anlaufwinkel und Lateralversatz.

Erwartungsgemäß erhöhen sich die maximale Messabweichung und die Standardabweichung bei beiden Messgrößen mit steigendem Luftspalt. Dies lässt sich auf die Einzelmessungen der Hilfsmessgrößen durch den Sensor zurückführen. Die Kennzahlen des Sensors verschlechtern sich nach Tabelle 4.4 ebenfalls mit steigendem Luftspalt.

Die maximale Abweichung des Lateralversatzes liegt unter 0,16 mm. We modelliert das Rauschverhalten des Lateralversatzes mit einer maximalen Fehleramplitude von  $\approx 0,2$  mm [54]. Die Messabweichung der Zustands-

messung liegt somit im von ihm definierten Bereich.

Für den Anlaufwinkel nimmt Wei das gleiche Messrauschen an, skaliert es dabei jedoch auf den Arbeitsbereich des Anlaufwinkels. Dies resultiert in einer Fehleramplitude von  $0,6$  mrad. Die Zustandsmessung erreicht eine maximale Fehleramplitude von  $0,95$  mrad und verlässt damit die Modellgrenzen des Reglers. Die Auswirkung auf das Spurführungsverhalten des AGRs kann jedoch erst mit Fahrsimulationen konkretisiert werden.

**Rauschverhalten der Zustandsmessung** Durch die Berechnung des Lateralversatzes über die zwei Sensoren links und rechts im Fahrwerk ( $s_{L_2}$  und  $s_{R_1}$ ) kann ein deutlich geringeres Messrauschen des Lateralversatzes im Vergleich zum Messrauschen des Einzelsensors erreicht werden. Der Grund hierfür liegt an der Differenzbildung zur Lateralversatzberechnung nach Gleichung 3.3. Das Messrauschen des Anlaufwinkels lässt sich ebenfalls in Relation zum Messrauschen der Hilfsmessgrößen betrachten. Durch den Einbau der Sensoren im Lenkhebelsystem erfährt die Messgröße  $\hat{\alpha}$  eine Verstärkung durch den Einbauabstand  $L$ :

$$\tan(\hat{\alpha}) = \frac{\hat{s}_2 - \hat{s}_1}{2L} \approx \frac{\hat{\alpha}}{\text{mrad}} = 5 \cdot \frac{\hat{s}_2 - \hat{s}_1}{2\text{mm}} \quad (5.4)$$

Das Messrauschen des Anlaufwinkels ist näherungsweise 5-fach größer als das des Lateralversatzes. Zur Quantifizierung des Rauschverhaltens wird die Zustandsmessung numerisch untersucht. Die Zustandsmessung aus Abbildung 5.1 wird dazu ohne Integration des Prüfstands verwendet. Stattdessen wird ein idealer Sensor mit bekanntem normal-verteiltem Messrauschen nach Gleichung 5.5 angenommen. Der ideale Sensor ist unabhängig vom Luftspalt und weist außer Messrauschen keine weiteren Fehler auf. So kann

Standardabweichung		
Hilfsmessgröße	Anlaufwinkel	Lateralversatz
$\hat{s}_* / \text{mm}$	$\hat{\alpha} / \text{mrad}$	$\hat{v} / \text{mm}$
0,100	0,352	0,070

Tabelle 5.2: Rauschverhalten der Zustandsmessung mit idealem Sensor

der Einfluss der Implementierung von *inversem Messkonzept* und *Messkonzept* gesamthaft untersucht werden.

$$\hat{s}_* = s_* + \text{Rauschen} \quad (5.5)$$

Die Standardabweichung des Messrauschens beträgt 0,1 mm und orientiert sich an der Standardabweichung der Lateralpositionsberechnung der kombinierten Algorithmen aus Tabelle 4.4. Der bereits beschriebene Parameterraum aus Abschnitt 5.1.1 wird verwendet, um die Kennzahlen für diese Untersuchung zu berechnen.

Tabelle 5.2 zeigt die Standardabweichungen des Messrauschens der Zustandsmessung für Anlaufwinkel und Lateralversatz. Die Zustandsmessung kann die Auswirkungen des Messrauschens der Hilfsmessgrößen auf den Lateralversatz verringern. Der Anlaufwinkel hingegen wird stark vom Sensormessrauschen beeinflusst. Es findet die oben beschriebene Verstärkung statt. Dies bestätigen auch die vorherigen experimentellen Ergebnisse aus Tabelle 5.1. Da die Verstärkung systembedingt ist, kann diese nur durch ein anderes Messkonzept verringert werden. Eine Einstellmöglichkeit bietet der Einbauabstand. Längere Abstände zur Radhochachse verringern die Verstärkung, können jedoch praktisch nicht umgesetzt werden, da der entwickelte Sensor über der Schiene im Fahrwerk angebracht werden muss. Hier kommt es zu einem Bauraumkonflikt des Sensors mit der Systemumgebung des Fahrwerks.

## 5.2 Validierung des Sensors mittels Fahrscenarien

Die Validierung des Sensors findet im geschlossenen Regelkreis bestehend aus AGR-Fahrwerk, Zustandsmessung, Regler und Aktor statt. Es werden zunächst verschiedene Testszenarien definiert, welche in einer Simulation durchfahren werden. Anschließend werden die Simulationsergebnisse mittels Kennzahlen ausgewertet. Die Kennzahlen beschreiben die Performance der aktiven Spurführung. Eine daraus abgeleitete, gute aktive Spurführung ohne Spurkranzanzlauf lässt auf eine gute Eignung der in dieser Arbeit entwickelten direkten Zustandsmessung für das AGR schließen.

### 5.2.1 Methodik

Die Fahrdynamik des AGRs im geschlossenen Regelkreis wird mittels einer gekoppelten Simulation zwischen MATLAB/SIMULINK, SIMPACK und der Zustandsmessung dargestellt. Die Kopplung mehrerer Simulationsprogramme wird auch Co-Simulation genannt, welche für jedes Teilsystem ein problemspezifisches Programm zur Berechnung nutzt. Der Aufbau der Co-Simulation entspricht der in Wei erstellen Validierungsumgebung und wird lediglich um die Sensorumgebung erweitert. Abbildung 5.3 zeigt den Aufbau des aktiv gelenkten Radpaars in der verwendeten Co-Simulation mit externer Vorgabe der Fahrscenarien.

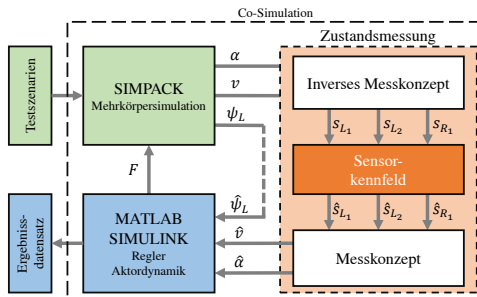


Bild 5.3: Co-Simulation mit Sensorkennfeld

SIMPACK berechnet die Fahrwerkdy­namik mittels einer Mehrkörper­simulation. Das AGR-Fahrwerk ist hier gemäß Wei implementiert und fährt entlang der extern vorgegeben Teststrecke. Die zu messenden Zustandsgrößen des Fahrwerks  $\alpha$ ,  $v$  und  $\psi_L$  werden an MATLAB/SIMULINK ausgegeben. Die Zustandsgrößen geben den korrekten aktuellen Zustand wieder und sind nicht rauschbehaftet. Die Zustandsgrößen Anlaufwinkel und Lateralversatz werden an die Zustandsmessung weitergeben. Die Messung des Lenkwinkels wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet und wird wie in Wei [54] rauschbehaftet an den Regler weitergegeben.

Die Zustandsmessung wird ähnlich Abschnitt 5.1.1 umgesetzt, um Anlaufwinkel und Lateralversatz zu bestimmen. Die veränderte Implementierung der Zustandsmessung wird im folgenden Abschnitt 5.2.2 detailliert beschrieben. Aus der Zustandsmessung werden die gemessenen, nun rauschbehafteten Messgrößen der Zustände  $\hat{\alpha}$  und  $\hat{v}$  an MATLAB/SIMULINK zurückgegeben. Alle gemessenen Zustandsgrößen werden in MATLAB dem Regler zugeführt. Der Regler berechnet daraus die am Aktor einzustellende Kraft, welche wiederum an SIMPACK ausgegeben wird. Der Regelkreis ist damit geschlossen.

Die Aktorkraft ist auf  $\pm 1000$  N begrenzt. Berechnet der Regler größere Kräfte, so können diese nicht gestellt werden, und die Aktorkraft läuft in die Sättigung. [54]

## 5.2.2 Implementierung der Zustandsmessung

Für die Zustandsmessung der Co-Simulation werden das inverse Messkonzept und das Messkonzept aus Abschnitt 5.1.1 ohne Veränderungen übernommen. Der Prüfstand mit realem Sensor wird für diesen Validierungsschritt durch ein Sensorkennfeld ersetzt, welches aus den Sollwerten der Hilfsmessgrößen die Messwerte der Hilfsmessgrößen berechnet. Der Luftspalt der Einzelsensoren wird nicht durch SIMPACK, sondern extern über das Fahrsczenario vorgegeben.

## Sensorkennfeld

Das Sensorkennfeld bildet zum Sollwert der Hilfsmessgröße  $s_*$  den Messwert  $\hat{s}_*$  über eine Tabelle ab. Das Kennfeld als Ersatz für die zeitaufwendige Messung am Prüfstand ist notwendig, da die Anzahl der Fahrscenarien sonst nicht in vertretbarer Zeit simuliert werden kann.

Das Kennfeld wird auf Basis der vorhandenen Messdaten und Algorithmen aus Kapitel 4 berechnet. Die Lateralposition  $s_*$  als Sollwert wird dabei zwischen  $\pm 10$  mm in 0,05 mm-Schritten aufgelöst und der Luftspalt mit den Werten 10 mm, 20 mm und 30 mm variiert. Jedem Sollwert  $s_*$  wird über das Kennfeld beim Luftspalt  $h$  ein Messwert  $\hat{s}_*$  zugeordnet:

$$\hat{s}_* = \text{Kennfeld}(s_*, h) + \text{Rauschen}$$

Entspricht der Sollwert  $s_*$  nicht exakt einem der gemessenen Kennfeldpunkte, so wird der auszugebende Messwert zwischen den beiden nächstgelegenen in der Tabelle abgelegten Messwerten linear interpoliert.

Zusätzlich zum bereits im Kennfeld enthaltenen Messrauschen wird ein normal-verteiltcs Rauschen mit einer Rauschamplitude von 0,02 mm additiv auf Messwert  $\hat{s}_*$  aufgebracht. Dies entspricht einem Zehntel der von Weingenommenen Rauschamplitude. Das Kennfeld liefert damit Messwerte mit größerem Rauschen als dies bei einer Messung des Sensors am Prüfstand der Fall ist. Die Untersuchung mittels Kennfeld ist somit konservativer.

## Testscenarien

Die Testscenarien zur Validierung werden aus der Dissertation von Wei übernommen und erweitert. Die Testscenarien bestehen aus generischen Streckenabschnitten und lassen sich in eine Kurveneinfahrt und Geradeausfahrt unterteilen. Die Kurveneinfahrt beginnt mit einem geraden Teilstück, welches in einem Übergangsbogen mündet. Der Übergangsbogen in Form einer Klothoide sorgt für einen konstanten Anstieg der Krümmung und be-



grenzt den Ruck am Fahrwerk. Am Ende der Klothoide schließt die Teststrecke mit einer Kurve konstanten Radius' ab. [54]

Bei allen Testszenarien wird die Achslast des Fahrwerks sowie der Reibwert des Rad-Schiene-Kontakts variiert. Auf der Geradeausfahrt wird die Geschwindigkeit des Fahrwerks direkt vorgegeben, in der Kurvencinfahrt wird diese aus Querbeschleunigung und Kurvenradius berechnet. Die Testszenarien werden um den Parameter des Luftspalts zwischen Sensoren und Schiene erweitert. Für alle drei verwendeten Sensoren der Zustandsmessung wird der selbe Luftspalt angenommen. Abbildung 5.4 zeigt den Parameterbaum der Testszenarien. Durch vollfaktorielle Kombination werden insgesamt 702 Szenarien, davon 486 Kurvencinfahrten und 216 Geradeausfahrten, untersucht.

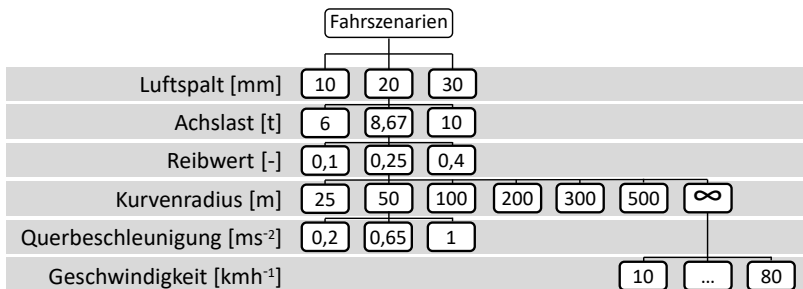


Bild 5.4: Erweiterung der Testszenarien nach Wei [54] um den Luftspalt zwischen Sensor und Schiene

Jedes Szenario wird zusätzlich mit Gleislagefehlern beaufschlagt. Dabei werden Längshöhenlagefehler, Richtungslagefehler, Spurweitenfehler und Querhöhenlagefehler aufgebracht. Die Gleislagefehler werden ab Streckenmeter 10 aufgeschaltet, sodass das Fahrwerk zu Beginn keine Störungen erfährt. [33] [54]

### 5.2.3 Kennzahlen zur Auswertung

Zur Auswertung der Testszenarien werden aus den Simulationsergebnissen Kennzahlen für jedes Szenario berechnet. Anhand der Kennzahlen erfolgt die Beurteilung des Spurführungsverhaltens des AGRs mit der entwickelten Zustandsmessung. Es werden Kennzahlen für Anlaufwinkel, Lateralversatz und Aktorkraft berechnet, die im Folgenden vorgestellt werden.

**Lateralversatz** Ein konstanter geringer Lateralversatz zeigt eine gute Spurführung durch das aktive Fahrwerk an. Ein kleiner Lateralversatz wurde deshalb bereits in der Reglerauslegung als Regelziel definiert, da dadurch ein Spurkranzanlauf effektiv verhindert werden kann. Der Lateralversatz stellt somit ein wichtiges Beurteilungskriterium dar. Als Kennzahlen werden der maximal betragsmäßig erreichte Lateralversatz  $v_{max}$  und das quadratische Mittel des Lateralversatzes (engl. root mean square)  $v_{rms}$  festgelegt. Bis zu einem maximalen Lateralversatz  $v_{max}$  von 3 mm bleibt das Fahrwerk im definierten Arbeitsbereich (siehe Tabelle 3.1). Ab 4,5 mm droht mit der verwendeten Profilpaarung ein Spurkranzanlauf. Je geringer der quadratische Mittelwert  $v_{rms}$ , desto genauer folgt das Fahrwerk dauerhaft der Gleismitte und Auslenkungen werden unterdrückt. [54]

$$v_{max} = \max_{j=1, \dots, n} \{|v_j|\} \quad (5.6)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j^2} \quad (5.7)$$

**Anlaufwinkel** Die Kennzahlen des Anlaufwinkels werden analog zum Lateralversatz definiert. Ein kleiner Anlaufwinkel ist ebenfalls notwendig, um Spurkranzanläufe zu vermeiden, da größere Anlaufwinkel das Spurspiel zwischen Spurkranz und Schienenflanke verkleinern. In Kurven muss jedoch ein kleiner Anlaufwinkel ausgebildet werden, um die notwendigen

Querkräfte über den Rad-Schiene-Kontakt zu übertragen. Der Anlaufwinkel alleine kann daher nur eingeschränkt als Beurteilungskriterium der aktiven Spurführung herangezogen werden. [54]

$$\alpha_{max} = \max_{j=1, \dots, n} \{|\alpha_j|\} \quad (5.8)$$

$$\alpha_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_j^2} \quad (5.9)$$

**Aktorkraft** Der Aktor und dessen dynamisches Verhalten wurden bereits in die Reglerauslegung einbezogen und modelliert. Der Aktor kann dabei eine maximale Lenkkraft von 1000 N aufbringen. Höhere Werte können, selbst wenn sie vom Regler ausgegeben werden, in der Simulation nicht gestellt werden. Es gilt zu untersuchen, ob der Aktor innerhalb seiner Grenzen belastet wird.

Für die Aktorkraft  $F_A$  werden daher analog zu den bereits vorgestellten Kennzahlen ebenfalls die betragsmäßig maximal auftretende Kraft  $F_{A,max}$  und das quadratische Mittel der Aktorkräfte  $F_{A,rms}$  über einer Testfahrt berechnet.

$$F_{A,max} = \max_{j=1, \dots, n} \{|F_{A,j}|\} \quad (5.10)$$

$$F_{A,rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_{A,j}^2} \quad (5.11)$$

Der Maximalwert zeigt die erreichte Maximalkraft, die der Regler auf der untersuchten Teststrecke vom Aktor fordert, an. Der quadratische Mittelwert lässt auf den durchschnittlichen Kraftbedarf schließen. Ein geringer Kraftbedarf ist erstrebenswert, da der Aktor dann kleiner ausgelegt werden kann und im Betrieb weniger Energie benötigt. Auch können kleinere Stell-

eingriffe die Lebensdauer des Aktors und der Fahrwerksmechanik durch die geringere Belastung verlängern.

### 5.2.4 Auswertung der Fahrscenarien

Für die 702 Testscenarien nach Abbildung 5.4 werden in den Abbildungen 5.5, 5.6 und 5.7 die vorgestellten sechs Kennzahlen über den Fahrscenarien aufgetragen. In den Abbildungen zeigen die ersten 486 Szenarien Kurveneinfahrten und sind blau hinterlegt. Die folgenden 216 Szenarien sind Fahrten auf gerader Strecke und orange hinterlegt.

#### Lateralversatz

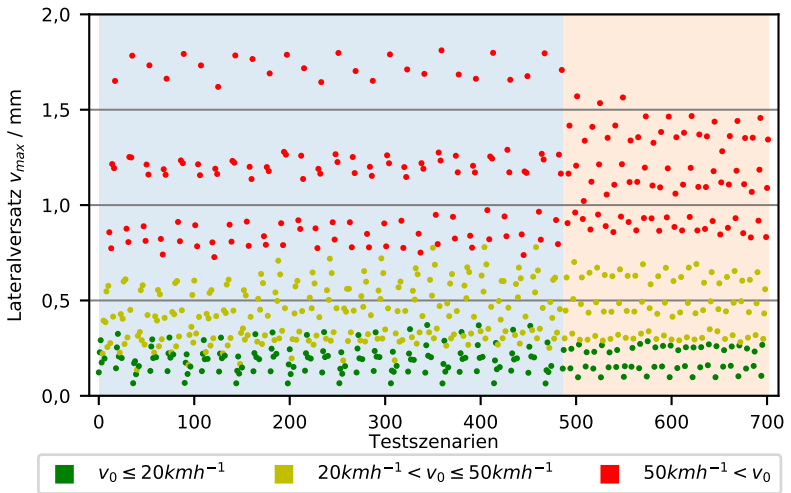
In Abbildung 5.5 werden die Kennzahlen des Lateralversatzes dargestellt. Jede Kennzahl wird im Diagramm entsprechend der Fahrgeschwindigkeit des untersuchten Szenarios eingefärbt. Szenarien mit einer Geschwindigkeit kleiner  $20 \text{ km h}^{-1}$  werden dunkelgrün, Szenarien mit einer Geschwindigkeit zwischen  $20 \text{ km h}^{-1}$  bis  $50 \text{ km h}^{-1}$  hellgrün und Szenarien mit einer Geschwindigkeit von über  $50 \text{ km h}^{-1}$  rot eingefärbt.

Mit steigender Geschwindigkeit nimmt erwartungsgemäß in allen Testfällen auch der maximale Lateralversatz zu. In niedrigen Geschwindigkeitsbereichen kleiner  $50 \text{ km h}^{-1}$  überschreitet der maximale Lateralversatz  $0,8 \text{ mm}$  nicht.

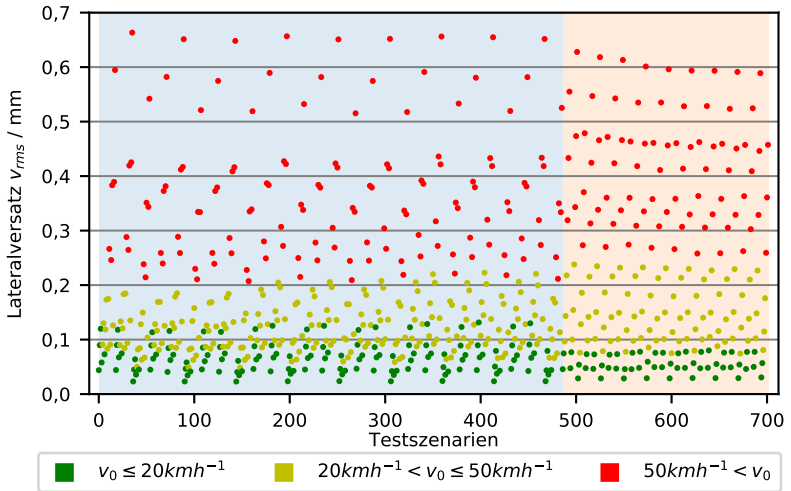
Grundsätzlich überschreitet der maximale Lateralversatz in keinem der untersuchten Testscenarien einen Wert von  $1,85 \text{ mm}$  und ein Spurkranz anlauf kann somit vollständig verhindert werden.

Szenarien mit einem maximalen Lateralversatz von über  $1,5 \text{ mm}$  entsprechen Fahrten mit der Maximalgeschwindigkeit von  $80 \text{ km h}^{-1}$ . Diese wird neben der Geradeausfahrt auch in der Kurve bei einer Querbeschleunigung von  $1 \text{ ms}^{-2}$  und einem Kurvenradius von  $500 \text{ m}$  erreicht.

In diesen Fällen wird die aktive Spurführung maximal gefordert, denn zusätzlich zu den Gleislagefehlern muss die hohe Querkraft in der Kurve



(a)



(b)

Bild 5.5: Kennzahlen des Lateralversatzes über alle Fahrscenarien mit Sensorkennfeld

kompensiert werden. Durch einen größeren Anlaufwinkel in diesen Fällen kommt es im Vergleich zur Geradeausfahrt zu einer größeren Lateralverschiebung des Fahrwerks im Gleis.

In Abbildung 5.5b werden die quadratischen Mittelwerte des Lateralversatzes betrachtet. Auch hier zeigt sich analog zu Abbildung 5.5a der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit deutlich. Bei niedrigen Geschwindigkeiten kann ein Wert kleiner 0,25 mm eingehalten werden. Ab einer Geschwindigkeit größer  $50 \text{ km h}^{-1}$  streuen die Werte über einen größeren Bereich und erreichen Maximalwerte von fast 0,7 mm.

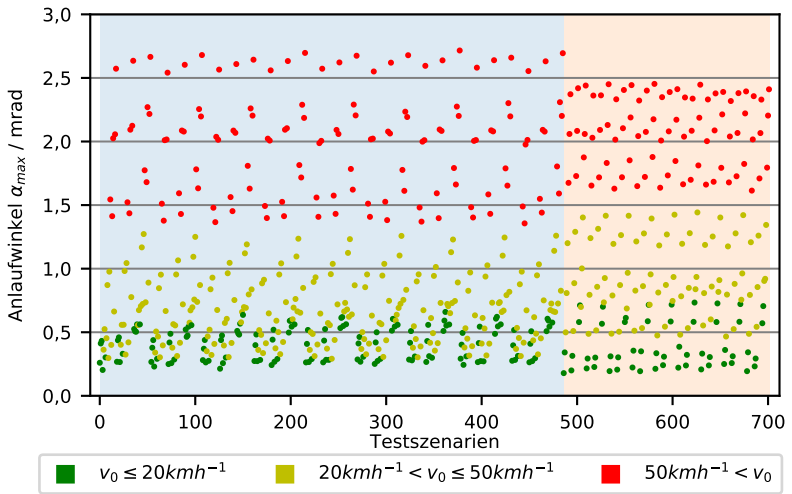
Insgesamt kann jedoch in allen untersuchten Testfällen eine gute Spurführung mit kleinem Lateralversatz erreicht werden.

In der Dissertation von Wei bleibt der Mittelwert des Lateralversatzes ebenfalls unter 0,7 mm. Das AGR kann mit der Erweiterung um die Zustandsmessung mit dem entwickelten Sensor eine ähnlich gute Spurführung im geschlossenen Regelkreis aufweisen. Eine Verschlechterung des Fahrverhaltens ist nicht erkennbar.

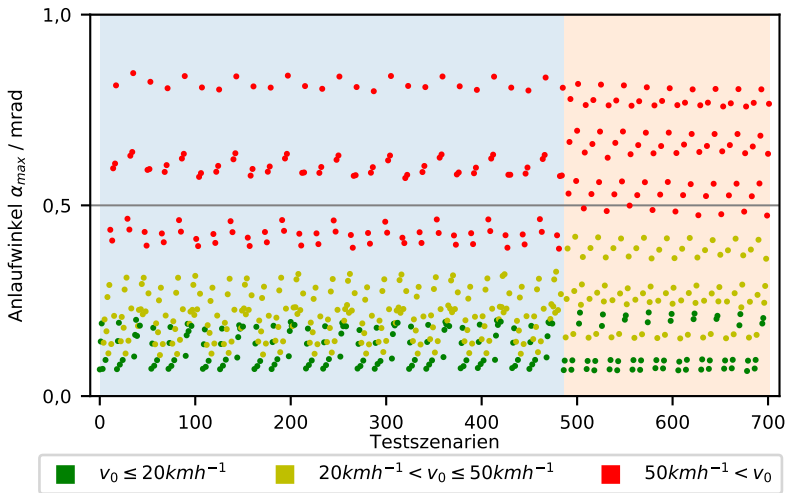
### **Anlaufwinkel**

Abbildung 5.6 zeigt die Kennzahlen des Anlaufwinkel, wobei die Werte gemäß der Auswertung des Lateralversatzes abhängig von der Fahrgeschwindigkeit des Szenarios eingefärbt werden.

Bei Betrachtung der maximalen Anlaufwinkel in Abbildung 5.6a zeigt das Fahrwerk ein ähnliches Verhalten wie die Kennzahlen des Lateralversatzes aus Abbildung 5.5a. Mit steigender Geschwindigkeit werden die erreichten maximalen Anlaufwinkel größer. Bei Geschwindigkeiten von  $80 \text{ km h}^{-1}$  überschreitet der Anlaufwinkel bei Kurvenfahrten mit Radius 500 m den Wert 2,5 mrad und kommt der Arbeitsbereichsgrenze von 3 mrad sehr nahe. Ein Spurkranzanlauf tritt durch Auswertung des Lateralversatzes in diesen Szenarien großer Anlaufwinkel dennoch nachweislich nicht auf.



(a)



(b)

Bild 5.6: Kennzahlen des Anlaufwinkels über alle Fahrscenarien mit Sensorkennfeld

Trotz der hohen maximalen Anlaufwinkel zeigt der quadratische Mittelwert stets kleine Werte unter 1 mrad. Da das quadratische Mittel größere Werte mit einem stärkerem Gewicht bewertet, kann gefolgert werden, dass zwar hohe maximale Anlaufwinkel in einigen Testfällen entstehen, diese aber bezogen auf die Gesamtstrecke nicht sehr häufig auftreten. Es sind durch Gleislagefehler und Messrauschen hervorgerufene, kurzzeitig auftretende Ereignisse.

Bezogen auf die Ergebnisse von Wei weist das AGR-Fahrwerk mit erweiterter Zustandsmessung keine wesentlich verschiedenen Mittelwerte des Anlaufwinkels auf. Eine Veränderung des Spurführungsverhaltens bezogen auf diese Größe ist nicht feststellbar.

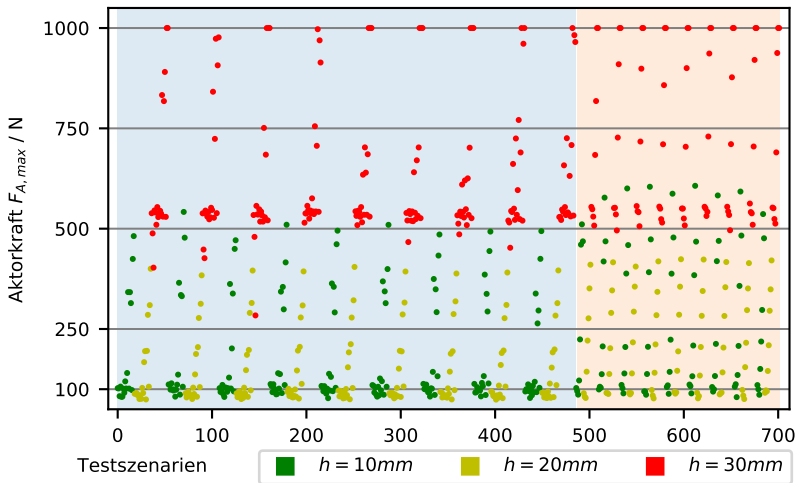
### **Aktorkraft**

In Abbildung 5.7 werden die Kennzahlen der Aktorkraft dargestellt. Die Werte der Testszenarien werden dabei gemäß des eingestellten Luftspalts eingefärbt. Szenarien mit einem Luftspalt von 10 mm bzw. 20 mm werden dunkelgrün bzw. hellgrün eingefärbt. Szenarien mit einem Luftspalt von 30 mm werden rot eingefärbt.

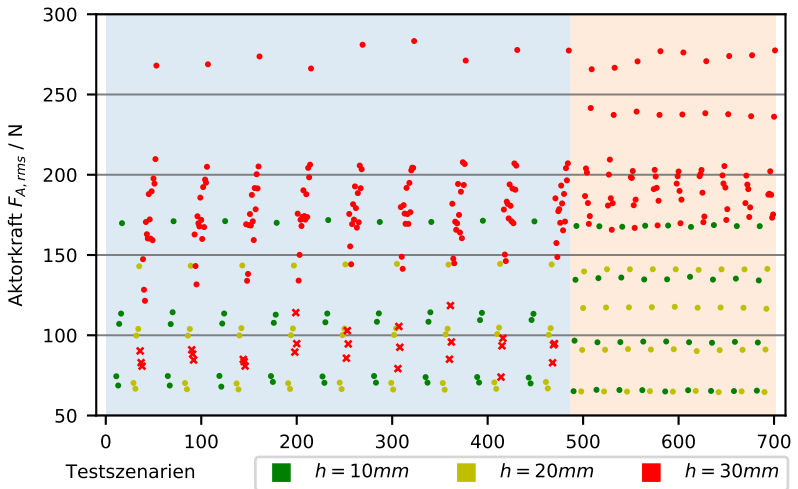
Die maximal erreichte Aktorkraft  $F_{A,max}$  wird in Abbildung 5.7a gezeigt. Grundsätzlich werden mit größerem Luftspalt höhere maximale Aktorkräfte angefordert. Während die Werte bei 20 mm bis 30 mm Luftspalt noch unter 600 N liegen, so steigen diese stark an, sobald der Luftspalt auf 30 mm erhöht wird. Einige Testfälle zeigen Fahrten, bei denen die maximal verfügbare Aktorkraft von 1000 N erreicht wird.

Der Sensor wurde für einen nominellen Luftspalt von 20 mm ausgelegt. Die Testfälle mit 30 mm Luftspalt stellen aus diesem Grund einen Worst-Case dar. Hier erhöht sich das Messrauschen bei gleichzeitig sinkender Genauigkeit der Lateralpositionsbestimmung in den Einzelsensoren der Zustandsmessung. Magnetische Störungen und das Messrauschen der Hallelemente haben hier einen prozentual höheren Einfluss auf das Messergebnis. Die ent-





(a)



(b)

Bild 5.7: Kennzahlen der Aktorkraft über alle Fahrscenarien mit Sensorkennfeld

wickelten Algorithmen sind nicht in der Lage, auf den geringen gemessenen Änderungen des Magnetfeldes die Position der Schiene mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen.

Zur Verbesserung des Sensorverhaltens bei größeren Luftspalten kann die Magnetfeldstärke des Sensors erhöht werden. Dies ist mit dem Sensorprototyp nicht darstellbar, da die Spule bereits an ihrer Auslegungsgrenze betrieben wird. Weitere Untersuchungen in dieser Richtung sind daher notwendig.

Obwohl in einigen Testfällen die maximale Aktorkraft von 1000 N erreicht wird, kann aus den Kennwerten von Lateralversatz und Anlaufwinkel eine Spurführung ohne Spurkranz-anlauf gefolgert werden. Der Regler ist mit dem entwickelten Sensor in der Lage, das Fahrwerk auch bei großen Luftspalten gleismittig zu führen. Die Mehrzahl der Testfälle mit Luftspalt 10 mm bis 20 mm liegt unter einem maximalen Kraftbedarf von 250 N.

Der mittlere Kraftbedarf des Fahrwerks wird in Abbildung 5.7b dargestellt. Mit steigendem Luftspalt steigt auch hier analog zum Maximalwert  $F_{A,max}$  der Mittelwert  $F_{A,rms}$  und überschreitet in wenigen Testfällen 250 N. Bei einem Luftspalt von 10 mm bis 20 mm treten jedoch stets Mittelwerte kleiner 175 N auf. Die mit roten Kreuzen gekennzeichneten Punkte der Mittelwerte bei einem Luftspalt von 30 mm entsprechen Kurveneinfahrten mit einem Kurvenradius von 25 m bei einer Geschwindigkeit von ca.  $8 \text{ kmh}^{-1}$ . Hier kann das AGR auch bei großem Luftspalt den Kraftbedarf niedrig halten. Grund ist die geringe Fahrgeschwindigkeit und die damit verbundene geringere Anregung des Fahrwerks durch Gleislagefehler. Erst mit höheren Geschwindigkeiten bei größeren Radien oder auf gerader Strecke steigt die mittlere Aktorkraft bei einem Luftspalt von 30 mm stark an.

Die Mittelwerte weisen bei allen Luftspalten eine weite Streuung der Kennzahl  $F_{A,rms}$  auf. Grundsätzlich sind kleine Mittelwerte Fahrten mit niedrigen Geschwindigkeiten und hohe Mittelwerte dementsprechend Fahrten mit hoher Geschwindigkeit, die häufigere Stelleingriffe des Reglers mit höheren Aktorkräften zur Folge haben.

### Zusammenfassung

Die Auswertung des Lateralversatzes als wichtiges Beurteilungskriterium zeigt, dass ein Spurkranz-anlauf in allen Fällen vermieden wird, und auch die Mittelwerte des Lateralversatzes sind klein und unterstützen diese Aussage. Die Kennzahlen des Anlaufwinkels weisen zudem ebenfalls auf eine gute Spurführung hin. Betrachtet man die Aktorkraft, so wird ein hoher maximaler Kraftbedarf in einigen Testfällen deutlich. Hier wird zum Teil die Maximalkraft des Aktors angefordert, ohne jedoch die Spurführung zu verschlechtern. Der mittlere Kraftbedarf bei kleinen Luftspalten ist jedoch gering.

Werden die Kennzahlen auf die implementierte direkte Zustandsmessung bezogen, so werden die Zustandsgrößen Anlaufwinkel und Lateralversatz mit ausreichender Genauigkeit bestimmt. Die direkte Zustandsmessung mittels eines Hallsensorarrays ist prinzipiell in der Lage die aktive Spurführung nach Wei umzusetzen.

### 5.3 Überprüfung der Ergebnisse mittels Hardware-in-the-loop

Die durch das Kennfeld berechneten Ergebnisse werden abschließend anhand ausgewählter Testszenarien mittels eines Hardware-in-the-loop-Ansatzes (HIL) überprüft. Das Sensorkennfeld als Ersatz für den realen Sensor am Prüfstand stellt eine Vereinfachung dar, deren Gültigkeit nachgewiesen werden muss. Durch den Nachweis können die getroffenen Aussagen über die aktive Spurführung im geschlossenen Regelkreis, die entwickelte Zustandsmessung und den Sensorprototypen untermauert werden.

#### 5.3.1 Methodik

Die Methodik des vorherigen Abschnitts wird grundsätzlich beibehalten. Bei einem Hardware-in-the-loop-Ansatz wird das zu untersuchende Teilsystem experimentell aufgebaut. Die restlichen Komponenten und Teilsys-

teme des Gesamtsystems werden simuliert. Über eine Schnittstelle wird das zu untersuchende Teilsystem in die Gesamtsystemsimulation eingebunden. Das Verhalten des zu untersuchenden Teilsystems im Gesamtsystem kann so getestet werden, ohne das Restsystem physisch aufzubauen.

Der Sensorprototyp als das zu untersuchende Teilsystem wird über den Prüfstand als Schnittstelle in die Zustandserfassung der Co-Simulation eingebunden. Abbildung 5.8 zeigt den Aufbau der verwendeten Hardware-in-the-loop-Umgebung.

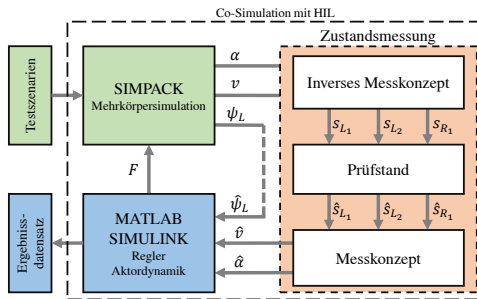


Bild 5.8: Co-Simulation mit Hardware-in-the-loop. Sensorprototyp wird über den Prüfstand in die Gesamtsystemsimation eingebunden.

Die Teilsimulationen in MATLAB/SIMULINK und SIMPACK werden nicht verändert. Innerhalb der Zustandsmessung werden die drei Hilfsmessgrößen auf dem Prüfstand real gemessen. Die vom inversen Messkonzept berechneten Sollwerte der Einzelmessgrößen  $s_*$  werden durch den Roboter des Prüfstands sequentiell angefahren. Der Sensor befindet sich damit an der relativen Position zur Schiene, die sich aus den Zustandsgrößen  $\alpha$  und  $v$  der Mehrkörpersimulation ergibt. Aus den auf diese Weise gemessenen Hilfsmessgrößen  $\hat{s}_*$  werden anschließend die Zustandsgrößen  $\hat{\alpha}$  und  $\hat{v}$  durch das Messkonzept berechnet. Der Sensor und der Prüfstand müssen für den hier umgesetzten HIL-Ansatz nicht echtzeitfähig sein, da die anderen Simulationsprogramme mit der Fortführung ihrer Berechnung warten, bis das Messergebnis der Zustandsbestimmung vorliegt.

	Szenario A	Szenario B
$\alpha_{max}$ / mrad	2,71	2,39
$\alpha_{rms}$ / mrad	0,81	0,75
$v_{max}$ / mm	1,68	1,28
$v_{rms}$ / mm	0,53	0,45
$F_{A,max}$ / N	1000	1000
$F_{A,rms}$ / N	271	274

Tabelle 5.3: Übersicht der Kennzahlen aus den Simulationen mit Kennfeld für die ausgewählten Szenarien A und B.

Durch den Einsatz von Hardware-in-the-loop kann das Verhalten des AGR-Fahrwerks mit der entwickelten Zustandsbestimmung realitätsgetreu nachgebildet werden, ohne das gesamte Fahrwerk prototypisch aufzubauen. Eine Einschränkung liegt im fehlenden Einfluss fahrdynamischer Effekte, die sich aus der Relativgeschwindigkeit von Sensor und Schiene ergeben, sowie der mechanischen Anbindung der Sensoren im Fahrwerk. Diese Effekte können mit dem verwendeten Prüfstand zwar teilweise nachgebildet werden, sind aber nicht Bestandteil dieser Arbeit.

### Ausgewählte Fahrscenarien

Zur Sicherstellung der Qualität der Simulationsergebnisse mittels Kennfeld werden zwei Worst-Case Szenarien ausgewählt und mit Szenario A und B bezeichnet. In diesen Szenarien wird die aktive Spurführung maximal beansprucht. Die Zustandsmessung hat in diesen Szenarien einen großen Einfluss auf die Regelgüte der Spurführung. Tabelle 5.3 zeigt zusammengefasst die Kennwerte der ausgewählten Szenarien aus den Simulationsergebnissen mit Kennfeld.

**Szenario A** Dieses Szenario beschreibt eine Kurveneinfahrt mit der Achslast 10 t, einem Reibwert von 0,1, einem Kurvenradius von 500 m, einer Querschleunigung von  $1 \text{ ms}^{-2}$  bei einem von Luftspalt 30 mm.

Das Szenario wird ausgewählt, da nach Tabelle 5.3 die maximale Aktorkraft angefordert wird. Die Achslast ist dabei sehr hoch, das Fahrwerk als dynamisches System somit träge. Der Reibwert ist minimal und durch den großen Radius bei einer Querschleunigung von  $1 \text{ ms}^{-2}$  wird die Höchstgeschwindigkeit von  $80 \text{ km s}^{-1}$  erreicht. Bei dieser Geschwindigkeit stellen Gleislagefehler hohe Anforderungen an den Regler.

Zusätzlich werden die Sensoren mit einem Luftspalt von 30 mm weit über der Schiene platziert, was eine geringe Genauigkeit der Zustandsbestimmung zur Folge hat. Das Messrauschen ist beim gewählten Luftspalt am größten.

**Szenario B** Zusätzlich zum Worst-Case Szenario A wird eine Geradeausfahrt untersucht. Die gerade Strecke wird mit einer Achslast von 10 t, bei einem Reibwert von 0,1 mit der Maximalgeschwindigkeit von  $80 \text{ km h}^{-1}$  durchfahren. Der Sensor wird analog zu Szenario A bei einem Luftspalt von 30 mm platziert.

Es gelten die gleichen Überlegungen wie bei Szenario A.

### 5.3.2 Auswertung ausgewählter Szenarien

Für die Auswertung werden die Ergebnisdaten der Testläufe über der Strecke dargestellt. Als betrachtete Größen werden der Lateralversatz  $v$ , der Anlaufwinkel  $\alpha$  und die Aktorkraft  $F_A$  gewählt, da sie für die Kennzahlenberechnung verwendet wurden. Zusätzlich wird die Messabweichung für den Lateralversatz  $\Delta v$  und den Anlaufwinkel  $\Delta \alpha$  berechnet. Die Messabweichungen beschreiben dabei die Differenz der durch die Zustandsbestimmung gemessenen Größen von Anlaufwinkel und Lateralversatz zu den wahren Zustandsgrößen, wie sie in der Mehrkörpersimulation berechnet

werden. Mit den Abweichungen können das Messrauschen und die Genauigkeit ausgewertet werden.

In den Abbildungen 5.9 und 5.10 werden die Größen jeweils gesammelt für ein Szenario aufgetragen. Die blauen Verläufe bezeichnen die Simulationsdaten der Teststrecke mit Sensorkennfeld aus dem vorherigen Abschnitt 5.2. Die gelben Verläufe stellen die Ergebnisse mittels HIL dar.

Wie zu erwarten ist der Lateralversatz klein und schwingt hauptsächlich im Intervall  $\pm 1$  mm. Ein Spurkranzanlauf findet nicht statt. Zu Beginn sind deutlich die ersten 10 m ohne Gleislagefehler zu erkennen. Dort fährt das Fahrwerk nahezu perfekt gleismittig. Mit Beginn der Gleislagefehler muss der Regler stärker in die Querführung des Fahrwerks eingreifen, was der Verlauf der Aktorkraft  $F_A$  bestätigt.

In den Verläufen von Lateralversatz und Anlaufwinkel sind die periodisch auftretenden Gleislagenfehler zu erkennen. Das Fahrwerk ist jedoch über die Zustandsbestimmung in der Lage, diese sicher zu messen und auszugleichen.

Die Schwingungsbreite der Aktorkraft ist bei der HIL-Simulation geringer. Dies lässt sich auf das verwendete Sensorkennfeld zurückführen, welches mit zusätzlichem Messrauschen beaufschlagt wurde. Im Mittel sind die Aktorkräfte  $F_{A,rms}$  der beiden Szenarien gleich (siehe Tabelle 5.4). Ausschläge der Aktorkraft bis an die Grenzen des Arbeitsbereichs sind bei der Kennfeld-Simulation erkennbar, die HIL-Simulation weist deutlich geringere maximale Aktorkräfte auf. Die hohen Messabweichungen im Anlaufwinkel  $\Delta\alpha$  der Kennfeldsimulation können die Ursache für große beobachtete Schwingungsbreite der Aktorkraft sein. Die Messabweichungen überschreiten dort oft die maximale Fehleramplitude von  $0,6$  mrad. Im HIL-Versuch ist dies nicht der Fall und die Messabweichung begrenzt sich auf den modellierten Arbeitsbereich.

Die Messabweichungen zeigen bei den HIL-Versuchen generell eine geringere Fehleramplitude, als dies bei der Kennfeld-Simulation der Fall ist. Die Fehleramplitude des Lateralversatzes im HIL-Versuch liegt bei ungefähr

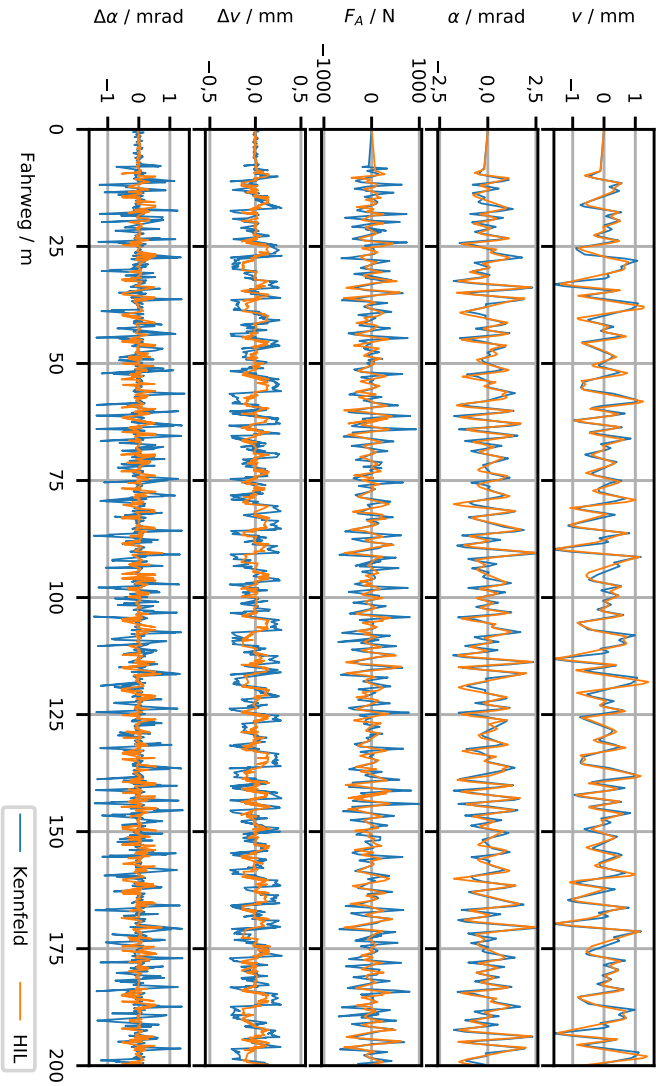


Bild 5.9: Szenario A: Vergleich zwischen Kenfeld und Hill-Prüftauf. Kurvenfahrt mit Achslast 10 t, Reibwert 0,1, Kurvenradius 500 m, Querbeschleunigung  $1 \text{ m s}^{-2}$ , Luftspalt 30 mm



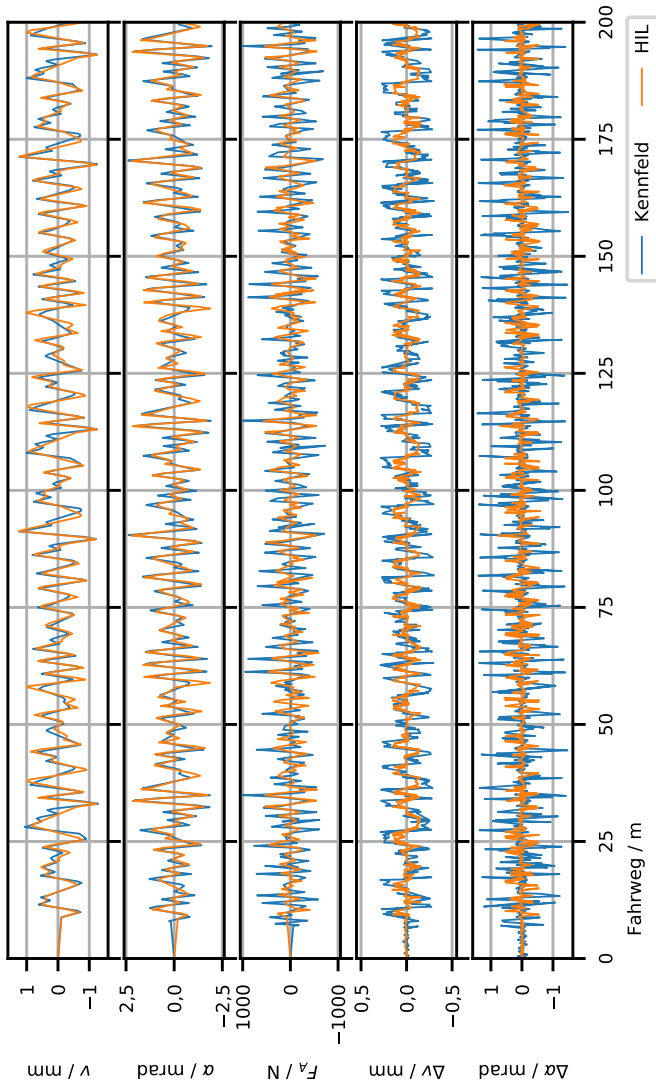


Bild 5.10: Szenario B: Vergleich zwischen Kennfeld und HIL-Prüflauf. Gerade Strecke mit Achslast 10 t, Reibwert 0, 1, Geschwindigkeit  $80 \text{ km h}^{-1}$ , Luftspalt 30 mm

		Szenario A	Szenario B
$F_{A,max} / N$	Kennfeld	1000	1000
	HIL	618	592
$F_{A,rms} / N$	Kennfeld	271	274
	HIL	190	191

Tabelle 5.4: Vergleich der Aktorkraft in den Szenarien A und B zwischen Kennfeld- und HIL-Simulation. Der Luftspalt beträgt 30 mm.

0,2 mm. Diese entspricht dem in der Reglerauslegung modellierten Messrauschen, sodass dadurch keine negative Auswirkung auf die Aktorkraft erwartet wird.

Zusammenfassend kann aus der Betrachtung der Szenarien A und B geschlossen werden, dass die Ergebnisse durch Simulation mittels Kennfeld gültig sind. Die Kennzahlen der Kennfelddaten fallen durch das zusätzliche Messrauschen tendenziell schlechter aus. Die Überprüfung mittels HIL-Versuchen zeigt ein deutlich besseres Verhalten unter realistischeren Einsatzbedingungen, was ebenfalls für alle anderen Testszenarien sehr wahrscheinlich ist. Die Aussagen der Auswertung der Kennfeldsimulation können auf die entwickelte Zustandsbestimmung und damit auf den Sensorprototypen übertragen werden.

## 5.4 Bewertung

Zu Beginn der Arbeit wurden in Abschnitt 3.3 die Einflüsse und Anforderungen an das Sensorkonzept aufgestellt. Nach Abschluss der Validierung sollen nun die Ergebnisse darauf bezogen eingeordnet werden.

**Marktanforderungen und Gesellschaft** Bei der Validierung konnte in 702 Testszenarien eine aktive Spurführung ohne Spurkranzanzlauf nachge-

wiesen werden. Das Fahren ohne Spurkranzanlauf reduziert Verschleiß und Lärm und bietet Potential zu Komfortsteigerungen. Durch die nicht vorhandene Achse zwischen den Losrädern können Fahrzeuge mit hohem Niederfluranteil umgesetzt werden. Eine erste Materialkostenrechnung deutet auf eine günstige Produktion des Sensorkonzeptes hin, was die anteiligen Kosten der Messtechnik an einer Straßenbahn mit mechatronischen Fahrwerken reduziert. Durch die Kompensation der Magnetfeldausbreitung können zusätzlich Fertigungskosten durch höhere erlaubte Toleranzen gesenkt werden. Ein aufwendiger Kalibrierungsprozess zur Bestimmung des Kompensationsvektors kann durch die Messung der Magnetfeldausbreitung durch die Hallelemente selbst entfallen.

**Funktion und Einbausituation** Das Messkonzept mit vier Sensoren jeweils vor und hinter dem Rad auf jeder Seite nutzt Bauräume im Bereich über der Schiene, die noch ausreichend Einbauraum besitzen. Die berührungslose Messung erlaubt es den Sensor geschützt im Fahrwerk anzubringen, was die Abreißgefahr senkt. Der technische Funktionsnachweis einer direkten Messung der Zustandsgrößen mittels Magnetfeldern wurde in dieser Arbeit erbracht. Für größere Luftspalte sinkt die erreichbare Genauigkeit. Dies kann jedoch durch ein stärkeres Erregermagnetfeld ausgeglichen werden. Das Sensorkonzept kommt ohne bewegliche Bauteile aus und kann vollständig in einem einzigen Bauteil integriert werden. Die Spule und die Sensorplatine können vergossen werden und sind damit vor Witterung optimal geschützt.

**Sicherheit, robuste Messung und Einflüsse der Systemumwelt** Die Betriebssicherheit des AGRs hängt direkt mit der genauen Messung der Zustandsgrößen zusammen. Aus diesem Grund wurde bereits in den Anforderungen und der Problemdefinition die zusätzliche Berechnung eines Messgüteindex gefordert. Das entwickelte Sensorkonzept berechnet zu jeder Messung einen Messgüteindex und kann so unzureichend genaue Messun-

gen der Fahrwerksteuerung anzeigen. In der Verbindung des Messgüteindex mit der Redundanz des Messkonzepts bietet das aktiv gelenkte Radpaar zusätzliches Potential. Die Erkennung von Störeinflüssen durch den Messgüteindex konnte bereits in Ansätzen nachgewiesen werden.

Mit der Berechnung des Messgüteindex wird der Sensor ein wesentlicher Bestandteil der Fahrzeugintelligenz, die darauf basierend Entscheidungen trifft. Durch die Verwendung mehrerer Hallsensorelemente als integrierte Sensoren kann mit der Lateralposition der Schiene unter dem Sensor eine Messgröße bestimmt werden, die mit einem einzelnen Sensorelement alleine nicht messbar ist. Der entwickelte Sensor lässt sich somit gemäß Abschnitt 2.2.2 als smarter Sensor bezeichnen.

Äußere Einflüsse wie statische Magnetfelder insbesondere das Erdmagnetfeld können teilweise vollständig kompensiert werden. Über die Einflüsse von anderen elektro-magnetischen Komponenten im Fahrwerk kann hier keine Aussage getroffen werden.

Die Witterung spielt eine untergeordnete Rolle, da Wasser als Regen oder Schnee keine relevanten magnetischen Eigenschaften besitzt. Sonneneinstrahlung oder Fremdlicht beeinflussen das Sensorkonzept ebenfalls nicht. Temperaturänderungen können zu einem Drift der Messwerte in den Hallsensorelementen führen. Die verwendeten Hallelemente besitzen jedoch eine interne Temperaturkompensation.

Die Rückwirkungen des Sensors auf die Umwelt sind als gering anzusehen. Durch die Verwendung eines statischen Magnetfeldes kann eine Induktion elektrischer Ströme auf umliegende Bauteile effektiv vermieden werden. Die verwendete Feldstärke ist niedrig und fällt mit der Entfernung zum Sensor stark ab, sodass sich in Relation zum Sensor bewegende Objekte zwar eine Induktion erfahren können, diese jedoch als sehr gering anzunehmen ist. Zusätzlich kann eine Schirmung die Ausstrahlung des Magnetfeldes nach oben stark reduzieren. Es ist dann jedoch zu prüfen, ob eine Lateralpositionsbestimmung trotz Schirmung noch mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

**Anforderungen des AGRs** Durch die Wahl des AGRs als Anwendungsobjekt der aktiven Spurführung ist die Messung der Zustandsgrößen Anlaufwinkel und Lateralversatz vorgegeben. Zur Bestimmung dieser Größen während der Fahrt konnte aus der Literatur ein Messkonzept abgeleitet und validiert werden. Die direkte Messung der Zustände wird über Hilfsmessgrößen umgesetzt, die vom entwickelten Sensorkonzept gemessen werden. Der Sensor erfüllt in der Bestimmung des Lateralversatzes die modellierten Regleranforderungen. Die Genauigkeit der Anlaufwinkelmessung überschreitet teilweise die definierte Messabweichung. Zur genaueren Sensorcharakterisierung wurden bereits in der Entwicklungsphase wichtige Einflüsse auf den Sensor untersucht. In der durchgeführten Verifizierung und Validierung konnte der Sensor charakterisiert werden.

#### 5.4.1 Reglerneuauslegung

Der von Wei nach der  $\mu$ -Synthese ausgelegte Regler kann mit der entwickelten Zustandsmessung eine aktive Spurführung ohne Spurkranzlauf sicherstellen. Durch die Auswertung der Testläufe wird jedoch ein erhöhter Kraftbedarf deutlich. Die im Vergleich zu den Kennfelduntersuchungen kleineren Messabweichungen der Zustandsgrößen führen in den HIL-Versuchen zu einem reduzierten Kraftbedarf des Aktors. Der Anlaufwinkel verlässt in den Kennfeldversuchen den modellierten Arbeitsbereich und scheint das Reglerverhalten zu beeinflussen. An dieser Stelle kann eine erneute Reglerauslegung ansetzen und den Regelkreis auf den neu entwickelten Sensor abstimmen.

Für die modellgestützte Reglerneuauslegung nach der  $\mu$ -Synthese dient die in dieser Arbeit ermittelte Sensorcharakteristik als Basis. Werden bereits in der Reglerauslegung die im Vergleich zum Lateralversatz größeren Messabweichungen des Anlaufwinkels berücksichtigt, so kann der neu ausgelegte Regler diesen Einfluss auf den Kraftbedarf möglicherweise vermindern. Die Folge wäre eine Reduktion der maximalen sowie mittleren Aktorkräfte bei

einem ähnlichem Spurführungsverhalten. Der abgestimmte Regelkreis kann mit der aufgebauten HIL-Umgebung erneut untersucht werden. Bei einer weiteren Verbesserung der Kennzahlen bietet sich die zukünftige Umsetzung eines AGR-Prototypens auf einem Rollenprüfstand an.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Mechatronische Fahrwerke können im Vergleich zu konventionellen Fahrwerken bessere Spurführungseigenschaften aufweisen. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen grundsätzlich, dass eine Verbesserung durch den aktiven Eingriff in die Querdynamik möglich ist und ein Spurkranzanlauf vermieden werden kann. Die Umsetzung dieser Fahrwerke ist jedoch herausfordernd, da die notwendigen Messgrößen nur schwer direkt messbar sind. Alternativen wie eine Zustandsschätzung liefern nicht in allen Betrachtungen die benötigte Genauigkeit.

In dieser Arbeit wurde daher für ein mechatronisches Fahrwerk ein berührungsloses Sensorkonzept zur direkten Bestimmung von Zustandsgrößen entwickelt und validiert. Die direkte Messung der Größen Anlaufwinkel und Lateralversatz wird berührungslos über einen Luftspalt von 20 mm umgesetzt und nutzt ein künstlich erzeugtes Magnetfeld.

Das Aktiv Gelenkte Radpaar (AGR) nach Wei [54] wird als Beispiel eines mechatronischen Fahrwerks mit aktiver Spurführung ausgewählt. Das AGR besteht aus einem lenkbaren Einzelrad-Einzelfahrwerk, dessen Räder über den Lenkwinkel ausgelenkt werden können. Die Lenkkraft zur Beeinflussung des Lenkwinkels wird dabei über einen Aktor aufgebracht. Die Regelung der Lateralposition des Fahrwerks im Gleis wird über die Messung der Zustandsgrößen Anlaufwinkel, Lateralversatz und Lenkwinkel umgesetzt. Das Regelziel ist ein kleiner Lateralversatz um einen Spurkranzanlauf zu vermeiden. Die Vermeidung des Spurkranzanslaufs führt zu einer Verschleiß- und Lärmreduktion.

Aus der Literatur wird ein Messkonzept zur Bestimmung der Zustandsgrößen Anlaufwinkel und Lateralversatz unter der Verwendung von vier Hilfsmessgrößen abgeleitet. Der Lenkwinkel wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, da er auf dem Fahrwerk einfach zu bestimmen ist.

Aus den vier Hilfsmessgrößen, für deren Messung ein einziger Sensortyp ausreichend ist, können die Zustandsgrößen Anlaufwinkel und Lateralversatz direkt berechnet werden. Zur Bestimmung der Hilfsmessgröße wird aufbauend auf dem V-Modell [2] in drei Makrozyklen ein neuartiger Magnetfeldsensor entwickelt. Der entwickelte Sensor wird im Fahrwerk über der Schiene angebracht und misst dabei seine relative Position in Lateralrichtung zur Schiene. Ein durchgängiges Simulationsmodell des Sensors sichert kontinuierlich die geforderten Sensoreigenschaften ab.

Der aufgebaute Sensorprototyp nutzt 40 Hallsensorelemente, die die Veränderung eines künstlich erzeugten Magnetfelds durch die ferromagnetische Schiene messen. Die Magnetfeldänderung wird dabei in zwei Raumrichtungen erfasst. Aus der gemessenen Magnetfeldänderung wird die Lateralposition der Schiene als Messgröße berechnet. Dazu werden sieben verschiedene Berechnungsansätze implementiert und verglichen. Zur experimentellen Untersuchung wird ein automatisierter Prüfstand aufgebaut, der den Sensorprototyp und die Algorithmen in vollfaktoriellen Versuchen verifizieren kann. Die Auswertungen zeigen, dass mittels zwei der Algorithmen eine für das AGR ausreichend genaue Messgrößenbestimmung möglich ist.

Zusätzlich zur Messgröße wird ein Messgüteindex berechnet. Der Index gibt die aktuelle Messgenauigkeit des Sensors wieder und wird zur Detektion von Störgrößen im Messbereich eingesetzt. Die übergeordnete Fahrzeugsteuerung kann mit Hilfe des Messgüteindex das Fahrwerk in einen sicheren Zustand überführen, falls eine genaue Messung der Zustandsgrößen für die aktive Spurführung nicht möglich ist.

Für die Berechnung des Messgüteindex wird ein Algorithmus entwickelt, beispielhaft an drei Störobjekten auf dem Prüfstand getestet und die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen.



Nach der erfolgreichen Verifizierung des Sensorkonzepts wird der Sensorprototyp in einer Co-Simulation validiert. Die Co-Simulation verbindet eine Mehrkörpersimulation zur Berechnung der Fahrwerksdynamik mit dem bereits vorhandenen Regelalgorithmus [54] der aktiven Spurführung. Der Sensorprototyp wird über ein Kennfeld des Sensors, und in ausgewählten Szenarien mittels Hardware-in-the-loop-Ansatz, in die Simulation integriert.

In 702 Testszenarien, bestehend aus Kurveneinfahrten und Fahrten auf gerader Strecke, wird das AGR auf das Spurführungsverhalten untersucht. In den Fahrerszenarien werden Achslast, Reibwert des Rad-Schiene-Kontakts, die Geschwindigkeit und der Luftspalt variiert. Die Auswertung anhand von Kennzahlen des Lateralversatzes und Anlaufwinkels zeigt, dass ein Spurkranz-anlauf in allen Testfällen vermieden wird.

Das entwickelte Sensorkonzept konnte somit in seiner Systemumgebung validiert werden. Der entwickelte Sensorprototyp ist in der Lage wichtige Zustandsgrößen aktiver Fahrwerke durch eine direkte Messung zu bestimmen.

## 6.2 Ausblick

Diese Arbeit ergänzt den Forschungsstand des AGRs um das neu entwickelte Messkonzept und den Hallarraysensor. Abbildung 6.1 zeigt den aktualisierten Stand der Forschungsaufgaben unterteilt in die drei Hauptgruppen: Konzept, Sensor und Aktor. Jede dieser Gruppen kann zudem in Theorie, Laboruntersuchungen und Streckenversuche als Forschungsschwerpunkte unterteilt werden. Die grau hinterlegten Aufgaben sind bereits durch Wei am Teilinstitut Bahnsystemtechnik untersucht worden. Diagonal gefüllte Felder entsprechen teilweise untersuchten Aufgabenbereichen. Die grün hinterlegten Aufgaben werden durch diese Arbeit ergänzt. [54]

Die prototypische Umsetzung des AGR-Fahrwerks auf Laborebene kann mittels des entwickelten Sensors anwendungsnah durchgeführt werden. Das Fahrwerk kann dazu zunächst auf einem Rollenprüfstand untersucht wer-

	Konzept		Sensor	Aktor
Theorie	AGR	Angetriebenes AGR	Laser-Distanz-Sensor	Elektrohydraulisch Elektromechanisch
	AGR-Fahrzeug		Hallarraysensor	
			weitere Sensoren...	
Labor	Funktionsmuster auf Rollenprüfstand		Laser-Distanz-Sensor auf Schienenprüfstand	Aktorprüfstand
			Hallarraysensor auf Prüfstand	
			Auf Rollenprüfstand	
Streckenversuch	Erprobungsträger mit Funktionsmuster		Untersuchung von Sensorkonzepten an Karlsruher Messstraßenbahn	

Bild 6.1: Aktualisierter Forschungsstand zum AGR nach [54].

den. Auch andere Fahrwerkkonzepte mit einer ähnlichen Messaufgabe können auf den hier entwickelten Sensor zurückgreifen. Sind die Laborversuche erfolgreich, so bieten sich anschließend Streckenversuche des Prototyps an.

Im Bereich der Hauptgruppe Sensor bieten sich zwei direkte Anknüpfungspunkte. Zum einen kann der Sensor im täglichen Betrieb einer Straßenbahn detaillierter untersucht werden. Zum anderen können das Sensor-konzept und der Sensoraufbau weiterentwickelt werden.

**Sensorvalidierung im Betrieb** Bevor das Sensorkonzept verbessert werden sollte, ist eine erweiterte Validierung im realen Straßenbahnbetrieb sinnvoll. Der entwickelte Sensor wird dazu mit einem Referenzmesssystem an einer Straßenbahn angebracht. Durch die Fahrt im Straßenbahnnetz können die tatsächlich auftretenden Randbedingungen und Einflüsse genauer charakterisiert und untersucht werden. Die Messwerte können direkt mit den Daten des Referenzsensors verglichen werden, sodass eine Aussage über

die Messgenauigkeit unter realen Bedingungen getätigt werden kann. Dieser Ansatz kann ebenfalls zur Verbesserung der Störgrößenerkennung beitragen. Der Algorithmus des Messgüteindex kann anhand realer Messdaten wesentlich genauer abgestimmt werden. Der Messgüteindex kann um die Erkennung bis dahin unbekannter Störgrößen ausgebaut werden.

Zur Validierung im Betrieb bietet die *Karlsruher Messstraßenbahn* des Teilinstituts Bahnsystemtechnik eine geeignete Plattform. Diese um Messtechnik erweiterte Straßenbahn des Typs NET 2012 integriert eine modulare Messdatenerfassung mit einer Funkschnittstelle zur direkten Übertragung der Daten an das Teilinstitut. Die Straßenbahn bedient im regulären Betrieb innerstädtische Haltestellen und erreicht auf Außenstrecken die Maximalgeschwindigkeit von  $80 \text{ km h}^{-1}$ . Die Anbindung des Sensorprototyps ist durch die vorhandene Messtechnik einfach möglich. [46]

Der Sensor kann durch den Einsatz an der Messstraßenbahn bereits frühzeitig andere Aufgaben übernehmen. Denkbar ist die kontinuierliche Zustandsüberwachung der Schieneninfrastruktur. Insbesondere die Spurweite kann während der Fahrt gemessen und an die Leitzentrale übertragen werden. Zusammen mit der Position der Messung im Netz, welche die Straßenbahn ebenfalls aufzeichnet, kann die Lage und Art von Gleislagefehlern frühzeitig erkannt werden. Eine zustandsbasierte Instandhaltung wird möglich.

**Sensorweiterentwicklung** Die Weiterentwicklung des Sensors kann an verschiedenen Stellen erfolgen. In dieser Arbeit wurde der Einfluss einer magnetischen Schirmung nicht betrachtet. Durch die Schirmung kann sowohl die Ausstrahlung des Sensors als auch die Einstrahlung äußerer Störeinflüsse reduziert werden. Das Messrauschen und die Messfehler können reduziert werden. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass trotz zusätzlicher Schirmung die messbare Magnetfeldänderung ausreichend ist, die Lateralposition der Schiene präzise zu bestimmen.

Weiterhin kann die Magnetfelderzeugung auch als eine gedruckte Spule auf einer Leiterplatte ausgeführt werden. Dies spart den Herstellungsauf-

wand der gewickelten Erregerspule ein und senkt die Systemkomplexität. Zum Erreichen höherer Windungszahlen können zudem mehrere Platinen übereinander angeordnet werden. Die Leiterbahnen der gedruckten Spule sind hinsichtlich ihrer Strombelastbarkeit begrenzt. Das Konzept muss daher dahingehend analysiert werden, ob eine ausreichende Magnetfeldstärke erreicht werden kann.

Die Hallsensorelemente wurden in dieser Arbeit mit einem Abstand von 5 mm entlang einer Linie auf der Sensorplatine angebracht. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit kann dieser Abstand reduziert werden, indem die Platine beidseitig mit Hallsensorelementen bestückt wird. Die Hallelemente der einen Seite sind gegenüber der anderen Platinenseite um 2,5 mm verschoben. Der Diskretisierungsabstand wird somit halbiert, das Magnetfeld wird höher auflösend abgetastet.

Die maximal erreichbare Messfrequenz des Sensorkonzepts wurde nicht ausreichend betrachtet. Für den Einsatz unter Echtzeitanforderungen wird vom AGR eine Messfrequenz von 1000 Hz gefordert. Dies ist mit den ausgewählten Hallsensorelementen nur unter Reduzierung der Messgenauigkeit möglich. Zusätzlich wird durch die Datenübertragung via USB-Schnittstelle die maximale Messfrequenz begrenzt. Neben einer ausreichend hohen Messfrequenz muss zusätzlich die Latenz der Datenübertragung mit berücksichtigt werden. Die Auswertung und Berechnung der Lateralposition muss ebenfalls in den Mikrocontroller integriert werden.

# A Anhang

## A.1 Störeinflüsse

Dieser Abschnitt ergänzt die Ausführungen aus Abschnitt 4.5 und erläutert die dort nicht diskutierten Testfahrten über Störgrößen.

Abbildung A.1 zeigt die Ergebnisse der Überfahrt über die drei Störgrößen 5-Cent-Münze, Schlüssel und Metallblock. Die rote Markierung bei  $x = 150\text{ mm}$  zeigt die Position des Störobjektes an.

Die Abbildung besteht aus vier vertikal angeordneten Diagrammen. Im oberen Diagramm ist die absolute Abweichung der Lateralposition  $\Delta\hat{s}$  aufgetragen. Der Bereich mit Abweichungen größer 1 mm ist dabei rot hinterlegt. Die mittleren Diagramme zeigen die Verläufe des Einzelmessgüteindizes  $i_{MG,y}$  und  $i_{MG,z}$ , das untere Diagramm die Verläufe des Gesamtmessgüteindex  $i_{MG}$ . Der Wertebereich kleiner 0,9 ist in diesen drei Diagrammen jeweils rot hinterlegt.

Im Vergleich zur 5-Cent-Münze zeigen die anderen beiden Störobjekte größere Lateralpositionsabweichungen. Im Fall des Metallblocks reichen diese bis zu 2 mm. In allen Testfahrten wird jedoch eine hohe Messabweichung durch den Messgüteindex sicher angezeigt. Der Messgüteindex fällt bei der Annäherung zum Störobjekt bereits unter 0,9 bevor eine Lateralpositionsabweichung von  $\approx 0,5\text{ mm}$  erreicht wird. Selbst die vergleichsweise kleine 5-Cent-Münze wird sicher erkannt.

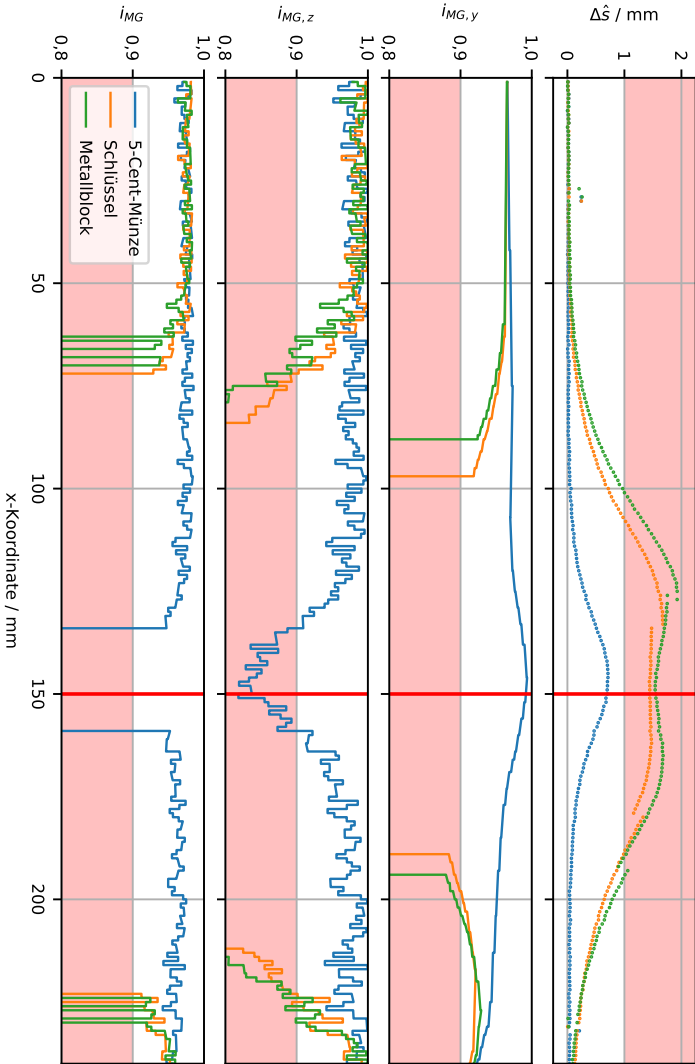


Bild A.1: Überfahrt über Störobjekte an der Position  $x = 150$  mm.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Einflussfaktoren auf Straßenbahnen mit mechatronischen Fahrwerken. Bild des Fahrwerks aus [54]. . . . .	3
2.1	Aktive Fahrwerke als mechatronisches System, nach [2] . . . . .	8
2.2	Abgrenzungen zum Sensorbegriff . . . . .	10
2.3	Smart Sensor Topologie . . . . .	13
2.4	Wirbelstromsensoraufbau nach [4] . . . . .	16
2.5	Wirbelstromsensorenanordnung nach [24] . . . . .	17
2.6	Kraft-Momenten-Sensor (blau) im Rad . . . . .	18
2.7	Schräge und horizontale Abtastung mit optischen Abstandssensoren . . . . .	20
2.8	Flexx Tronic Drehgestell von Bombardier [8] . . . . .	24
2.9	Schematischer Aufbau eines Hallelements, nach [51] . . . . .	26
2.10	Makrozyklus (V-Modell) nach [2] . . . . .	28
2.11	Mehrfache Durchläufe des V-Modells aus [2] . . . . .	30
3.1	Übersicht der Vorgehensweise . . . . .	36
3.2	Aufbau des aktiv gelenkten Radpaars (AGR) [54] . . . . .	40
3.3	AGR als Systemdarstellung. Energieflüsse in blau, Informationsflüsse in gelb. . . . .	42
3.4	Definition Anlaufwinkel (a) und Lateralversatz (b) . . . . .	43
3.5	Messkonzept für Anlaufwinkel [54] . . . . .	44
3.6	Einzelmesskonzept für Lateralversatz [54] . . . . .	45
3.7	Abgeleitetes Messkonzept für das AGR . . . . .	47
3.8	Einflüsse auf den Sensor im AGR . . . . .	51

---

3.9	Sensor-Schiene-System . . . . .	56
3.10	Ergebnis der Ideengenerierung: Ferromagnetisches Objekt verändert ein homogenes Magnetfeld messbar . . . . .	57
3.11	Modellaufbau Makrozyklus I - Rechteckiges Eisenprofil in konstantem magnetischen Fluss mit Messlinie . . . . .	59
3.12	Magnetfeldverlauf mit Rechteckprofil bei 1 mT . . . . .	61
3.13	Zerlegung B-Feld nach Komponenten mit Messlinie und Rechteckprofil . . . . .	62
3.14	Magnetfeldverlauf bei verschiedenen Feldstärken mit Rechteckprofil . . . . .	64
3.15	Magnetfeldverlauf bei verschiedenen Profildbreiten des Rechteckprofils . . . . .	65
3.16	Draufsicht auf Rechteckspule mit Hallelementen in der Mitte . . . . .	71
3.17	Magnetfeldverlauf der ovalen Spule ohne weiteres ferromagnetisches Material . . . . .	73
3.18	Magnetfeldverläufe des Rechteckprofils mit 280 A Spulenstrom . . . . .	74
3.19	S49-Schienenprofil mit 67 mm Kopfbreite [52] . . . . .	75
3.20	Vergleich der Magnetfeldverläufe von Rechteckprofil und S49-Profil . . . . .	76
3.21	Aufbau Hallarraysensor . . . . .	81
3.22	Hallarrayplatine Oberseite mit Anschlüssen (a) und Unterseite (b) mit Hallelementen . . . . .	82
3.23	Sensorprototyp mit Spulenträger, Prüfstandsadapter und Verschraubungen . . . . .	86
3.24	Sensorprototyp mit ovaler Spule und Hallarrayplatine mit 40 Hallelementen . . . . .	87
3.25	Gesamtsystemübersicht des Prüfstands . . . . .	89
3.26	Sensorprototyp am Roboterarm mit darunterliegendem Schienenprofil . . . . .	89
3.27	Versuchsplanung und -durchführung . . . . .	91
3.28	Standardabweichungen aller Sensoren in allen Raumrichtungen . . . . .	92



---

3.29	Standardabweichungen eines Hallelements über der Messzeit . . .	94
3.30	Standardabweichungen eines Hallelements über die Analogver- stärkung . . . . .	95
3.31	$B_x$ und $B_y$ eines Hallelements über die Drehung um die z-Achse. Mittelwerte der Sinusverläufe sind hervorgehoben. . . . .	96
3.32	Vergleich zwischen Simulationen mit variierten Spulenstrom und Messung . . . . .	98
3.33	Vergleich zwischen Simulationen mit/ohne Robotereinfluss und Messung . . . . .	102
3.34	Vergleich 30mm-Rechteckprofil zwischen Simulation und Mes- sung mit verschiedenen Luftspalten . . . . .	103
3.35	Vergleich S49-Profil zwischen Simulation und Messung . . . . .	105
3.36	Vergleich Ri59N-Profil zwischen Simulation und Messung . . .	106
3.37	Ri59N-Rillenschienenprofil mit 56 mm Kopfbreite [52] . . . . .	107
4.1	Ablaufdiagramm der Lateralpositionsberechnung und der Be- stimmung des Messgüteindex . . . . .	109
4.2	Auswirkung der Kompensation bei einem 30 mm-Rechteckpro- fil. Der Nullzustand berücksichtigt den Anbau am Roboterarm. Normierte Skala zusätzlich an rechter Seite angegeben. . . . .	111
4.3	Vergleich der normierten Magnetfeldverläufe bei verschiedenen Luftspalten mit S49-Profil (Simulation) . . . . .	114
4.4	Beispiel einer Verschiebung von $B_y$ entlang der y-Achse durch das Erdmagnetfeld. Durch Normierung (rechte Skala) kann die korrekte Lateralposition (blaue bzw. gelbe Markierung) be- stimmt werden. . . . .	116
4.5	Neuronales Netz zur Klassifikation des Schienenprofils mit ab- schließender Auswertung . . . . .	117
4.6	Funktionsweise Lateralpositionsbestimmung <i>Lineare Regressi- on <math>\bar{B}_y</math></i> . . . . .	121
4.7	Erweiterte Funktionsweise der linearen Regression $\bar{B}_y$ . . . . .	122

4.8	Funktionsweise der Spline-Regression $\bar{B}_y$ . . . . .	123
4.9	Funktionsweise der Spline-Regression in $\bar{B}_z$ . . . . .	124
4.10	Funktionsweise mit Spline-Regression auf rechten und linkem Ast in $\bar{B}_z$ . . . . .	125
4.11	Berechnungsvorschrift der Lateralposition und des Messgüteindex in der 4. Phase . . . . .	133
4.12	Grafische Darstellung der Berechnung des Einzelmessgüteindex	136
4.13	Überfahrt über einen Schlüssel an der Position $x = 150\text{mm}$ . . . . .	139
5.1	Ablauf der Validierung des Sensors im Messkonzept am Prüfstand	143
5.2	Messrauschen Zustandsmessung an der Position $\alpha = 5\text{mrad}$ , $v = 1,5\text{mm}$ und $h = 20\text{mm}$ . . . . .	146
5.3	Co-Simulation mit Sensorkennfeld . . . . .	150
5.4	Erweiterung der Testszenarien nach Wei [54] um den Luftspalt zwischen Sensor und Schiene . . . . .	153
5.5	Kennzahlen des Lateralversatzes über alle Fahrscenarien mit Sensorkennfeld . . . . .	157
5.6	Kennzahlen des Anlaufwinkels über alle Fahrscenarien mit Sen- sorkennfeld . . . . .	159
5.7	Kennzahlen der Aktorkraft über alle Fahrscenarien mit Sensor- kennfeld . . . . .	161
5.8	Co-Simulation mit Hardware-in-the-loop. Sensorprototyp wird über den Prüfstand in die Gesamtsystemsimulation eingebunden.	164
5.9	Szenario A: Vergleich zwischen Kennfeld und HIL-Prüflauf. Kurveneinfahrt mit Achslast 10 t, Reibwert 0,1, Kurvenradius 500 m, Querbeschleunigung $1\text{ms}^{-2}$ , Luftspalt 30 mm . . . . .	168
5.10	Szenario B: Vergleich zwischen Kennfeld und HIL-Prüflauf. Gerade Strecke mit Achslast 10 t, Reibwert 0,1, Geschwindig- keit $80\text{kmh}^{-1}$ , Luftspalt 30 mm . . . . .	169
6.1	Aktualisierter Forschungsstand zum AGR nach [54]. . . . .	178

A.1 Überfahrt über Störobjekte an der Position  $x = 150$  mm. . . . . 182



## Tabellenverzeichnis

3.1	Definierter Arbeitsbereich der Fahrwerkszustände Anlaufwinkel und Lateralversatz nach Wei [54] . . . . .	48
3.2	Gemittelte Standardabweichung über alle Hallelemente . . . . .	92
3.3	Kostenabschätzung Sensorprototyp . . . . .	108
4.1	Prozentualer Fehler der Klassifizierung sowie Mittelwert und Standardabweichung des jeweiligen Ausgabeneurons bei unterschiedlichen Luftspalten am S49- und Ri59N-Profil im Vergleich mit normal-verteiltem Rauschen (NR). . . . .	119
4.2	Vergleich der Ansätze in $\bar{B}_y$ . Alle Angaben in mm. Die unterste Zeile zeigt die maximale Abweichung bzw. den Mittelwert der Standardabweichungen innerhalb einer Spalte. . . . .	129
4.3	Vergleich der Ansätze in $\bar{B}_z$ . Alle Angaben in mm. Die unterste Zeile zeigt die maximale Abweichung bzw. den Mittelwert der Standardabweichungen innerhalb einer Spalte. . . . .	130
4.4	Vergleich der besten Einzelansätze und der Kombination. Alle Angaben in mm. . . . .	132
5.1	Kennzahlen des Messkonzepts bei Variation von Luftspalt, Anlaufwinkel und Lateralversatz . . . . .	147
5.2	Rauschverhalten der Zustandsmessung mit idealem Sensor . . .	149
5.3	Übersicht der Kennzahlen aus den Simulationen mit Kennfeld für die ausgewählten Szenarien A und B. . . . .	165
5.4	Vergleich der Aktorkraft in den Szenarien A und B zwischen Kennfeld- und HIL-Simulation. Der Luftspalt beträgt 30 mm. . .	170



## Literatur

- [1] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag Mai 1993.
- [2] VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag Juni 2004.
- [3] Bundesverordnung: Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV). Bundesrepublik Deutschland. Letzte Neufassung 14.08.2013.
- [4] Aknin, P.; Placko, D. und Ayasse, J.-B.: Eddy current sensor for the measurement of a lateral displacement – Applications in the railway domain, *Sensors and Actuators A: Physical*, 31 (1992) H. 1, S. 17–23, DOI: 10.1016/0924-4247(92)80074-D.
- [5] Albers, A. et al.: SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development, 15th International Conference on Engineering, Melbourne, 15 - 18 August 2005. In: *Engineering design and the global economy*. Melbourne: The Design Society 2005.
- [6] Bakr, M. A. und Lee, S.: Distributed Multisensor Data Fusion under Unknown Correlation and Data Inconsistency, *Sensors*, Artikel 2472 (2017), DOI: 10.3390/s17112472.
- [7] Block Transformatoren-Elektronik GmbH: Kupferlackdraht Typ 500 0,50. Internet: [https://www.block.eu/de\\_DE/produktvarianten/cu1-500050/](https://www.block.eu/de_DE/produktvarianten/cu1-500050/), Zugriff am: 12.08.2019.

- [8] Bombardier Transportation Presse Team: Flexx Tronic Bogie (Bild). In: Bildrechte per E-Mail eingeholt. Karlsruhe, 2019.
- [9] Bosch Sensortec GmbH: BNO055 Datasheet. Internet: [https://ae-bst.resource.bosch.com/media/\\_tech/media/datasheets/BST-BN0055-DS000.pdf](https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BN0055-DS000.pdf), Zugriff am: 12.07.2019.
- [10] Bruni, S. et al.: Control and monitoring for railway vehicle dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 45 (2007) H. 7-8, S. 743–779, DOI: 10.1080/00423110701426690.
- [11] Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe Methodeneinsatz Zusammenarbeit. In: Hanser eLibrary, Online-Ausg. München: Hanser Verlag 2013, ISBN: 978-3-446-43627-5.
- [12] EPSON Deutschland GmbH: Die EPSON LS-Serie. Internet: [https://neon.epson-europe.com/download.php?file=/files/assets/source/2/s/e/r/2405\\_datasheet\\_de\\_epson-scara-ls.pdf&name=Epson-SCARA-LS3-401S-mit-RC90-Steuerung-Brochures-8.pdf](https://neon.epson-europe.com/download.php?file=/files/assets/source/2/s/e/r/2405_datasheet_de_epson-scara-ls.pdf&name=Epson-SCARA-LS3-401S-mit-RC90-Steuerung-Brochures-8.pdf), Zugriff am: 14.08.2019.
- [13] Fastermann, P.: 3D-Drucken. In: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014, ISBN: 978-3-642-40963-9, DOI: 10.1007/978-3-642-40964-6.
- [14] Franz Jost und Peter Gratzfeld: Mechatronic Guidance for Tramways using a Novel Hall Sensor Concept. In: Proceedings of the 11th International Conference on Railway Bogies and Running Gears. István Zobory (Hrsg.), Budapest, 2019. Noch nicht veröffentlicht.
- [15] Franz Jost; Yunfan Wei und Peter Gratzfeld: Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. In: 4. interdisziplinäres Fachsymposium, Hannover, 11. - 12. Dezember 2014 ; Tagungsdokumentation des 4. Interdisziplinären Fachsymposiums



- Moderne Straßenbahntechnik, Band 52. Berlin: ifv Bahntechnik e.V. 2014.
- [16] Franz Jost; Yunfan Wei und Peter Gratzfeld: Mechatronic Track Guidance for Tramways –  $\mu$ -Synthesis Control Loop and Specially Developed Hall Sensors. In: EVS31: Electric Vehicle Symposium. Kobe, Japan, 2018.
- [17] Goodall, R. M.: Control engineering challenges for railway trains of the future, UKACC International Conference on CONTROL 2010, Coventry, UK, 7-10 Sept. 2010. In: S. 1–10. Piscataway, N.J.: IEEE 2010, DOI: 10.1049/ic.2010.0250.
- [18] Goodall, R. M.; Bruni, S. und Mei, T. X.: Concepts and prospects for actively controlled railway running gear, Vehicle System Dynamics, Supplement (2006) H. 44, S. 60–70, DOI: 10.1080/00423110600867374.
- [19] Gretzschel, M. und Bose, L.: A Mechatronic Approach for Active Influence on Railway Vehicle Running Behaviour, Vehicle System Dynamics, 33 (1999), S. 418–430.
- [20] Hagedorn, J.; Sell-Le Blanc, F. und Fleischer, J.: Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren – Ein Beitrag zur Energieeffizienz. In: SpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016, ISBN: 978-3-662-49210-9, DOI: 10.1007/978-3-662-49210-9.
- [21] Hermanns, M. und Dellmann, T.: Betrachtungen zu spurführungstechnischen Rückfallebenen eines mechatronischen Fahrwerks, ZEV-Rail Glasers Annalen 131, (2007) H. 11/12, S. 456–466.
- [22] Kataori, A. et al.: Development of Continuous Measurement Equipment for Angle of Attack and Results of Measurements. In: JR-East Technical Review, 19, S. 46–49. JR-East, Japan 2001.

- [23] Kionix: KMX62G-1033 Specifications. Internet: <http://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KMX62G-1033%20Specification%20Rev%202.0.pdf>, Zugriff am: 11.07.2019.
- [24] Kraft, D.: Sensoren zur elektronisch unterstützten Spurführung von Schienenfahrzeugen. In: Fortschrittberichte VDI : Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, 361. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, ISBN: 3-18-336112-4.
- [25] Kurzeck, B. und Valente, L.: A novel mechatronic running gear: concept, simulation and scaled roller rig testing. In: 9th World Congress on Railway Research. Lille, Frankreich, 2011.
- [26] Kurzeck, B. et al.: Mechatronic track guidance on disturbed track: the trade-off between actuator performance and wheel wear, *Vehicle System Dynamics, Supplement (2014) H. 52*, S. 109–124, DOI: 10.1080/00423114.2014.881514.
- [27] Li, H. und Goodall, R. M.: State estimation for active steering of railway vehicles, *IFAC Proceedings Volumes*, 32 (1999) H. 2, S. 4359–4364, DOI: 10.1016/S1474-6670(17)56743-9.
- [28] Marchthaler, R. und Dingler, S.: Kalman-Filter – Einführung in die Zustandsschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017.
- [29] Mei, T. X. und Goodall, R. M.: Robust control for independently rotating wheelsets on a railway vehicle using practical sensors, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 9 (2001) H. 4, S. 599–607, DOI: 10.1109/87.930970.
- [30] Mei, T. X. und Goodall, R. M.: Recent Development in Active Steering of Railway Vehicles, *Vehicle System Dynamics*, 39 (2003) H. 6, S. 415–436, DOI: 10.1076/vesd.39.6.415.14594.

- 
- [31] Mei, T. X.; Goodall, R. M. und Li, H.: Kalman filter for the state estimation of a 2-AXLE railway vehicle, 1999 European Control Conference (ECC), Karlsruhe, 8/31/1999 - 9/3/1999. In: European Control Conference (ECC), S. 2431–2435. Piscataway, New Jersey: IEEE 1999, DOI: 10.23919/ECC.1999.7099687.
- [32] Melexis: MLX90393 Triaxis® Magnetic Node. Internet: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90393-datasheet-melexis.pdf>, Zugriff am: 11.07.2019.
- [33] ORE B176: Bogies with steered or steering wheelsets, Report No. 1: Specifications and preliminary studies, Vol. 2, Specification for a bogie with improved curving characteristics. In: Utrecht: Fachbericht ORE 1989.
- [34] Pelgrom, M.: Analog-to-digital conversion. In: Third edition. Cham: Springer 2017, ISBN: 978-3-319-44971-5.
- [35] Perez, J.; Mauer, L. und Busturia, J. M.: Design of Active Steering Systems for Bogie-Based Railway Vehicles with Independently Rotating Wheels. In: Vehicle System Dynamics Supplement 37. 2002.
- [36] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Messung des Erdmagnetfeldes in der PTB. Internet: <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-251/live-daten-erdmagnetfeldmessung.html>, Zugriff am: 07.08.2019.
- [37] POWELL, A. J.: On The Dynamics of Actively Steered Railway Vehicles, Vehicle System Dynamics, Supplement (1998) H. 29, S. 506–520, DOI: 10.1080/00423119808969583.
- [38] POWELL, A. J. und WICKENS, A. H.: Active Guidance of Railway Vehicles Using Traction Motor Torque Control, Vehicle System Dynamics, 25 (1996) H. sup1, S. 573–584, DOI: 10.1080/00423119608969221.

- [39] Richard Schneider: Wankkompensation und aktive Radsatzsteuerung Flexx Tronic von Bombardier, Eisenbahn-Revue, (März 2010), S. 174–181.
- [40] Robert Bosch GmbH: Fourth generation long-range radar sensor (LRR4). Internet: [https://cds.bosch.us/themes/bosch\\_cross/amc\\_pdfs/LRR4\\_292000POZH\\_EN\\_low.pdf](https://cds.bosch.us/themes/bosch_cross/amc_pdfs/LRR4_292000POZH_EN_low.pdf), Zugriff am: 12.07.2019.
- [41] Schade, S.; Hermanns, M. und Dellmann, T.: Mechatronische Spurführungsregelung zur aktiven Spurführung von angetriebenen Losradfahrern, ZEV Rail, 134. (2010) H. 10, S. 404–410.
- [42] Schneider, R. und Himmelstein, G.: Active Radial Steering and Stability Control with the Mechatronic Bogie, Bombardier Transportation, o.V. (2008).
- [43] Schwarz, C.; Heckmann, A. und Keck, A.: Different Models of a Scaled Experimental Running Gear for the DLR RailwayDynamics Library. In: 11th International Modelica Conference, o.S. 2015.
- [44] Seiko Epson Corporation: SCARA-Roboter LS-Serie – Manipulator-Handbuch. Internet: <https://neon.epson-europe.com/download.php?file=/files/usermanuals/r11n/r11n001-dc0f7390-epson-teach-pendant-tp1-rev.2.pdf&name=EPSON-SCARA-LS3-401S-WITH-RC90-CONTROLLER-Usermanuals-61.pdf>, Zugriff am: 16.08.2019.
- [45] DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik – Teil 1: Grundbegriffe. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag Januar 1995.
- [46] Tesar, M.; Otto, P. und Gratzfeld, P.: Karlsruher Messstraßenbahn - AVG & KIT starten den Betrieb, Ingenieur-Spiegel, 2019 (2019) H. 2, S. 42–44.

- 
- [47] Texas Instruments: DRV5032 Ultra-Low-Power Digital-Switch Hall Effect Sensor datasheet (Rev. D). Internet: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5032.pdf>, Zugriff am: 11.07.2019.
- [48] Texas Instruments: DRV5055-Q1 Automotive Ratiometric Linear Hall Effect Sensor datasheet (Rev. C). Internet: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055-q1.pdf>, Zugriff am: 11.07.2019.
- [49] TOELLNER Electronic Instrumente GmbH: Einzel- und Doppel-Netzgeräte bis 400 W Ausgangsleistung – TOE 8951 & TOE 8952. Internet: [https://www.toellner.de/datenblaetter/de\\_8951\\_52.pdf](https://www.toellner.de/datenblaetter/de_8951_52.pdf), Zugriff am: 15.08.2019.
- [50] Tränkler, H.-R. und Fischerauer, G.: Das Ingenieurwissen: Messtechnik. Berlin: Springer Vieweg 2014, DOI: 10.1007/978-3-662-44030-8.
- [51] Tränkler, H.-R. und Reindl, L.: Sensortechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014, DOI: 10.1007/978-3-642-29942-1.
- [52] voestalpine Schienen GmbH: Hauptabmessungen der Vignolschienen. Internet: <https://www.voestalpine.com/schienen/static/sites/schienen/.downloads/Rail-Section-Program-2018.pdf>, Zugriff am: 15.08.2019.
- [53] WICKENS, A. H.: Dynamic Stability of Articulated and Steered Railway Vehicles Guided by Lateral Displacement Feedback, Vehicle System Dynamics, Supplement (1994) H. 23, S. 541–553, DOI: 10.1080/00423119308969539.
- [54] Yunfan Wei: Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. In: Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, 25. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2014, ISBN: 978-3-7315-0232-6, DOI: 10.5445/KSP/1000041687.