



MB

**FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU**

Integration von aktiven Regelsystemen in eine Gesamtfahrzeug-Mehrkörpersimulation

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von M.Sc. Salim Hobusch

geb. am 11.06.1996 in Köthen

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Elmar Woschke

Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion

Promotionskolloquium am 10.10.2024

Kurzfassung

Im Fahrzeugentwicklungsprozess bietet das Ersetzen physischer Prototypen durch virtuelle Simulationsmethodiken eine erhebliche Chance zur Effizienzsteigerung. Durch die zunehmende Relevanz von Steuergeräten und deren Auswirkungen auf die Bauteilbelastung ist die virtuelle Abbildung der Regelfunktionalitäten aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht eine wichtige Grundvoraussetzung für die Realisierung einer prototypenfreien Entwicklung, welche bisher unzureichend untersucht worden ist. In dieser Dissertationsschrift werden daher systematisch die Integrationsmöglichkeiten von Regelfunktionalitäten in Mehrkörpersimulationen im Hinblick auf die Lastdatenermittlung beurteilt. Am Beispiel eines Bremsregelsystems werden hierzu der geeignetste Kopplungsansatz identifiziert sowie eine sinnvolle Bedatung der notwendigen Kopplungsparameter bestimmt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird gezeigt, dass die Auswirkungen der Regelsysteme auf Betriebsfestigkeitsphänomene aussagekräftig abgebildet werden können und somit eine Nutzung der simulativen Lastdatenermittlung für eine prototypenfreie Entwicklung aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht möglich ist. Darüber hinaus wird eine Methodik vorgestellt, die durch die Abbildung von Regelfunktionalitäten mittels neuronaler Netze bisher nicht integrierbare Steuergeräte mit hohem Detaillierungsgrad für die Mehrkörpersimulation nutzbar macht. Durch die Anwendung dieser Methodik wird das hohe Potential für die Integration von neuronalen Netzen in die Mehrkörpersimulation sowie deren Adaption auf andere Einsatzfelder aufgezeigt.

Abstract

In the vehicle development process, replacing physical prototypes with virtual simulation methods offers a major opportunity to increase efficiency. Due to the increasing relevance of control systems and their effects on component loads, the virtual consideration of control functionalities is an important requirement for the realization of prototype-free development from a structural durability perspective. This dissertation therefore systematically assesses the integration possibilities of control functionalities concerning load data identification. Using the example of a brake control system, the most appropriate coupling approach is identified and the suitable configuration of the necessary coupling parameters is determined. Based on these findings, it is shown that the effects of the control systems on durability phenomena can be simulated accurately and can therefore be used for realistic, virtual load data determination. Furthermore, a methodology is introduced which, by modeling control functionalities using neural networks, enables the use of previously impractical to integrate control systems with high levels of detail for multi-body simulation. The use of this methodology demonstrates the high potential for the integration of neural networks in multi-body simulation and their adaptation to other fields of application.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	ii
Abbildungsverzeichnis	v
Nomenklatur	viii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	2
1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit	4
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Betriebsfestigkeit	7
2.1.1 Belastung und Beanspruchung	7
2.1.2 Beanspruchbarkeit	9
2.1.3 Lineare Schadensakkumulation	10
2.1.4 Bemessung	11
2.2 Mehrkörpersysteme	13
2.2.1 Grundgleichungen	13
2.2.2 Implementierung in ADAMS	15
2.3 Fahrdynamik	17
2.3.1 Koordinatensystem	17
2.3.2 Grundlagen der Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion	18
2.3.3 Bremsregelsysteme	20
2.3.4 Virtuelle Steuergeräte	22
2.4 Künstliche neuronale Netze	24
2.4.1 Aufbau	24
2.4.2 Feedforward Neural Networks	26
2.4.3 Recurrent Neural Network	26
2.4.4 Trainingsprozess	28
3 Fahrzeugmodellierung	31

3.1	Gesamtfahrzeugaufbau	31
3.2	Validierung	33
3.3	Regelssystemmodellierung	36
4	Kopplungsmöglichkeiten von Regelsystemen und Mehrkörpersimulationen	38
4.1	Klassifizierung von Kopplungsalgorithmen	39
4.2	Cosimulation	40
4.3	C-Code-Integration	41
4.4	Modelltransfer	42
4.5	Bewertung der Kopplungskonzepte zur Integration von Regelsystemen . . .	42
5	Analyse und Identifikation geeigneter Kopplungs- und Simulationsparameter	46
5.1	Kopplungs- und Simulationsparameter in Cosimulationen	46
5.2	Einfluss des Kommunikationsintervalls	47
5.3	Einfluss der Simulationsschrittweiten	53
5.4	Erkenntnisse für die Wahl von Simulations- und Kopplungsparametern . .	55
6	Integration des Bremsregelsystems zur Lastdatenbestimmung	57
6.1	Untersuchung der Abbildungsqualität der Fahrbahn-Fahrzeug-Interaktionen	57
6.2	Reproduktion einzelner Bremsmanöver	62
6.2.1	Bremsung auf ebener Straße	62
6.2.2	Bremsung auf unebener Straße	67
6.3	Reproduktion der Messstreuung	69
6.3.1	Streuung in den Messdaten	70
6.3.2	Erreichbare Simulationsgüte und Einfluss der Simulationsparameter	73
6.4	Anwendung für Dauerlauffahrversuche	78
7	Nutzung von neuronalen Netzen zur Abbildung des Bremsregelsystems	81
7.1	Vorgehen	82
7.2	Training des neuronalen Netzes	84
7.3	Bremsung auf ebener und unebener Fahrbahn	87
7.4	Auswertung eines Dauerlauffahrversuchs	92
7.5	Adaption der Methodik zur Rekonstruktion ausgefallener Messkanäle . . .	94
8	Fazit und Ausblick	102
	Literatur	105
	Disclaimer	112

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Illustration der Gliederung der Dissertation	6
2.1	Rainflowzählverfahren	8
2.2	Charakteristischer Verlauf einer Wöhlerkennlinie in Anlehnung an [26] . .	10
2.3	Schematische Darstellung der Dauerfestigkeitskonzepte in Anlehnung an [42]	12
2.4	Fahrzeugkoordinatensystem gemäß ISO 8855 [14]	17
2.5	Erklärung der Spannungssituation im Reifenlatsch in Anlehnung an [44] . .	19
2.6	Darstellung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Längskraft und Schlupf in Anlehnung an [63]	20
2.7	Schematischer Ablauf einer Bremsung mit ABS-Eingriff in Anlehnung an [3]	21
2.8	Architektur eines Steuergerätes gemäß AUTOSAR-Standard in Anlehnung an [22, 36]	24
2.9	Schematische Darstellung der Struktur eines künstlichen Neurons nach Mc- Culloch [53]	25
2.10	Exemplarischer Aufbau eines Feedforward Neural Network in Anlehnung an [77]	26
2.11	Darstellung der Struktur einer LSTM-Zelle	27
3.1	Achstopologie des verwendeten Fahrzeuges	32
3.2	Ergebnisse des gleichseitigen Durchfederns auf dem virtuellen K&C-Prüfstand	34
3.3	Ergebnisse des gegenseitigen Durchfederns auf dem virtuellen K&C-Prüfstand	34
3.4	Gegenüberstellung von relevanten Kennzahlen für Antriebsstrangparame- trierung	35
4.1	Schematische Darstellung des Ablaufs der Cosimulation in Anlehnung an [48]	41
5.1	Einfluss des Kommunikationsintervalls auf das Regelverhalten bei Voll- bremsungen für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten	49
5.2	Einfluss des Kommunikationsintervalls auf die Radgeschwindigkeit bei Voll- bremsungen für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten	50
5.3	Schematische Darstellung der Ursache der sich verstärkenden Abweichung der Simulationsergebnisse bei Variation des Kopplungsintervalls	51
5.4	Darstellung der spektralen Leistungsdichte des Bremsmomentes für Voll- bremsungen mit verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten	52

5.5	Einfluss des Kommunikationsintervalls auf die normierte Schädigung des Bremsmomentes für Vollbremsungen für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten	53
5.6	Einfluss der Simulationsschrittweite der CACSD-Simulationsumgebung auf das Regelverhalten des Bremsregelsystems	54
5.7	Einfluss der Ausgabeschrittweite der MKS-Simulationsumgebung auf die Radgeschwindigkeit	54
6.1	Simulationsergebnisse zum Einfluss des Reibungskoeffizienten auf grundsätzliche Bremseigenschaften	59
6.2	Gegenüberstellung von Fahrzeuggrößen aus Messung und Simulation für eine 60km/h-Vollbremsung	61
6.3	Ursprüngliche Simulationsergebnisse für Vollbremsung bei einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h	62
6.4	Einfluss der Verzögerungszeiten auf den Bremsverlauf	63
6.5	Einfluss der Verzögerung des Druckaufbaus auf den maximalen Schlupfwert beim ersten Regeleingriff	64
6.6	Abgleich ausgewählter Fahrgrößen für eine 60 km/h-Vollbremsung mit validierter Verzögerungszeit auf ebener Straße	65
6.7	Einfluss der Verzögerungszeit auf die vordere Lenkerkraft bei einer Vollbremsung auf ebener Straße	67
6.8	Abgleich ausgewählter Fahrgrößen für eine 60 km/h-Vollbremsung mit validierter Verzögerungszeit auf unebener Straße	68
6.9	Abweichung der tatsächlichen Startgeschwindigkeit von der nominalen Bremsstartgeschwindigkeit für eine 60-km/h-Vollbremsung	70
6.10	Übersicht der maximalen Variation von Messgrößen bei einer Vollbremsung mit einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h	72
6.11	Gegenüberstellung von Messgrößen auf der linken und rechten Fahrzeugseite	72
6.12	Fahrereinfluss auf Kraftvariation bei Vollbremsungen für die vordere Querlenkerkraft $F_{Q,VL}$	73
6.13	Einordnung der Simulationsergebnisse in maximale Variation von Messgrößen bei einer Vollbremsung mit einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h auf unebener Straße	74
6.14	Einordnung der Simulationsergebnisse in die maximale Variation von Messgrößen bei einer Vollbremsung mit einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h	76
6.15	Analyse der auftretenden Streuung der Schädigungswerte des unteren Querlenkers an der Hinterachse bei einer Dauerlaufmessung	78
6.16	Häufigkeitsverteilung der Schädigung einer simulierten Dauerlaufrunde bei Variation des Kommunikationsintervalls und der Bremsausgangsgeschwindigkeit	79

7.1	Schematische Darstellung der Methodik zur Integration von Regelfunktionalitäten durch neuronale Netze auf Basis von Level III/IV-Steuergeräten	82
7.2	Ausgewählte Ergebnisse der Hyperparameteroptimierung	86
7.3	Darstellung der Simulationsergebnisse für ein Bremsmanöver mit einer Startgeschwindigkeit von 80 km/h auf ebener Straße	88
7.4	Darstellung der Simulationsergebnisse für ein Bremsmanöver mit einer Startgeschwindigkeit von 80 km/h auf unebener Straße	90
7.5	Gegenüberstellung der Pseudoschädigung für ausgewählte Kräfte und charakteristische Zustandsgrößen bei einer Bremsung auf unebenem Untergrund	91
7.6	Simulationsergebnisse für ein Vollbremsmanöver aus 60 km/h bei Nutzung eines neuronalen Netzes mit einer unzureichend diversen Datenbasis	92
7.7	Vergleich der Rechenzeiten für die Dauerlaufsimulation	93
7.8	Gegenüberstellung der Pseudoschädigung für ausgewählte Kräfte und charakteristische Zustandsgrößen für eine Dauerlaufsimulation	94
7.9	Schematisches Vorgehen zur Rekonstruktion von ausgefallenen Messkanälen mittels neuronaler Netze	96
7.10	Übersicht des normierten Feature-Identifikationswerts ausgewählter Größen für die Längslenkerkraft	98
7.11	Ergebnisse der Hyperparameteroptimierung zur Identifizierung der optimalen Netzwerkarchitektur	98
7.12	Zeitlicher Verlauf der Abweichung der Pseudoschädigung für die vorhandenen Daten vor Messsignalausfall	99
7.13	Gegenüberstellung von rekonstruiertem und tatsächlichem Signal für Längslenkerkraft	100
7.14	Zeitlicher Verlauf der Abweichung der Pseudoschädigung für das rekonstruierte Signal	101

Nomenklatur

Abkürzungen

ABS	<u>A</u> ntiblockiersystem
ADAMS	<u>A</u> utomated <u>D</u> ynamic <u>A</u> nalysis of <u>M</u> echanical <u>S</u> ystems
AUTOSAR	<u>A</u> utomotive <u>O</u> pen <u>S</u> ystem <u>A</u> rchitecture
BDF	<u>B</u> ackward <u>D</u> ifferentiation <u>F</u> ormulas
BKZ	<u>B</u> elastungs <u>k</u> enn <u>z</u> ahl
CACSD	<u>C</u> omputer- <u>A</u> ided <u>C</u> ontrol <u>S</u> ystem <u>D</u> esign
CAN	<u>C</u> ontroller <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
CRG	<u>C</u> urved <u>R</u> egular <u>G</u> rid
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung
DAE	<u>D</u> ifferential- <u>A</u> lgebraic System of <u>E</u> quations
FC	<u>F</u> ully <u>C</u> onnected Layer
FKM	<u>F</u> orschungs <u>k</u> uratorium <u>M</u> aschinenbau
FMI	<u>F</u> unctional <u>M</u> ock-up <u>I</u> nterface
FMU	<u>F</u> unctional <u>M</u> ock-up <u>U</u> nit
FTIRE	<u>F</u> lexible Structure <u>T</u> ire-Model
ISO	<u>I</u> nternational <u>O</u> rganization for <u>S</u> tandardization
K&C	<u>K</u> inematics and <u>C</u> ompliance-Prüfstand
LSTM	<u>L</u> ong <u>S</u> hort- <u>T</u> erm <u>M</u> emory
MATLAB	<u>M</u> AT <u>r</u> ix <u>L</u> ABoratory
MKS	<u>M</u> ehrkörpersystem
MLP	<u>M</u> ultilayer <u>P</u> erceptron
ODE	<u>O</u> rdinary <u>D</u> ifferential <u>E</u> quation
PSD	<u>P</u> ower- <u>S</u> pectral- <u>D</u> ensity
RTE	<u>R</u> untime <u>E</u> nvironment
RMSE	<u>R</u> oot <u>M</u> ean <u>S</u> quare <u>E</u> rror
RNN	<u>R</u> ecurrent <u>N</u> eural <u>N</u> etwork
SI2	<u>S</u> tabilisierter <u>I</u> ndex 2-Formulierung
WRMSE	<u>W</u> eighted <u>R</u> oot <u>M</u> ean <u>S</u> quare <u>E</u> rror

Lateinische Bezeichnungen

a	Fahrzeugbeschleunigung	M_{\max}	Maximales Motormoment
a_{Rad}	Radumfangsbeschleunigung	M_{Nenn}	Nennmotormoment
A	Reifenaufstandsfläche, Trägheiten	M_Y	Radbremsmoment
b	Bias-Wert	o	Output-Gate
c	Zellstatus	p	Bremsdruck
C	Konstante, Zwangsbedingungen	P	Proportionalitätsfaktor
C_S	Federrate des Stabilisators	P_A	Ausfallwahrscheinlichkeit
D	Schädigung	q	Generalisierte Koordinaten
D_i	Teilschädigung	Q	Nichtkonservative Kräfte
f	Forget-Gate	r_{dyn}	Dynamischer Reifenradius
F	Äußere Kräfte	r_{stat}	Statischer Reifenradius
F_F	Federkraft	R	Rekursive Wichtung
F_{Gleit}	Gleitkraft	R_m	Zugfestigkeit
F_Q	Querlenkerkraft	S	Sicherheitsfaktor
F_x	Reifenumfangskraft	S_A	Schlupf (Antriebsfall)
F_y	Reifenseitenkraft	S_B	Schlupf (Bremsfall)
F_z	Reifenaufstandskraft	t	Zeit
i	Input-Gate	T	Kommunikationsintervall
k	Neigung der Festigkeitsgeraden	v	Fahrgeschwindigkeit
L	Lagrange-Funktion	v_{Rad}	Radgeschwindigkeit
n	Auftretende Schwingzahlspiele, Anzahl der Einzelkörper	v_{Ref}	Referenzgeschwindigkeit
N	Max. ertragbare Lastzyklen	v_{Schlupf}	Grenzschlupfgeschwindigkeit
N_D	Ecklastschwingspielzahl	W	Wichtungswert
m	Anzahl der Zwangsbedingungen	x	Eingabewert
M	Masse	x_F	Radhub
M_{ASF}	Antriebsstrangschutzmoment	y	Ausgabewert
		y_{pred}	Vorhergesagter Ausgabewert
		y_{True}	Tatsächlicher Ausgabewert

Griechische Bezeichnungen

α	Schräglaufwinkel	σ_{aB50}	Beanspruchungsmittelwert
δ	Lokaler Fehlergradient	σ_{aF}	Beanspruchbarkeit
δ_s	Regelabweichung	$\overline{\sigma_{aF}}$	Streuung der Beanspruchbarkeit
η	Lernrate	σ_{aF50}	Beanspruchbarkeitsmittelwert
λ	Lagrangemultiplikatoren	σ_D	Dauerfestigkeitsspannung
μ	Reibbeiwert	τ	Scherspannung
μ_H	Haftgrenzbeiwert	φ	Aktivierungsfunktion
μ_G	Gleitreibbeiwert	φ_s	Sigmoid-Aktivierungsfunktion
σ	Spannung	φ_t	tanh-Aktivierungsfunktion
σ_a	Spannungsamplitude	Ψ	Fehlerfunktion
σ_{aB}	Beanspruchung	ω	Radwinkelgeschwindigkeit
$\overline{\sigma_{aB}}$	Streuung der Beanspruchung	ζ	Zeitkonstante

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Um den steigenden Personalisierungswünschen sowie den zunehmend heterogener werdenden Kundenanforderungen gerecht zu werden, ist im Automobilbau eine immer größere Variantenvielfalt zu verzeichnen. Gleichzeitig unterliegt der Entwicklungsprozess für diese Variantenvielfalt angesichts des ausgeprägten Innovationsbedarfs einem kontinuierlich steigenden Zeit- und Kostendruck. [7]

Wie Potinecke et al. [58] und Stark et al. [78] in ihren Studien feststellten, besteht das umfangreichste Optimierungspotential zur Effizienzsteigerung im Fahrzeugentwicklungsprozess in der Verringerung bis hin zur vollständigen Abschaffung der Verwendung realer Prototypen. Vor diesem Hintergrund gewinnen Simulationsmethodiken besonders in der frühen Entwicklungsphase zunehmend an Bedeutung, da sie die Bewertung von Fahrzeugeigenschaften mittels virtueller Prototypen ermöglichen. Dies erlaubt wiederum die Optimierung der Produktqualität in vielen Bereichen bereits vor der physischen Prototypenerstellung. Die zunehmende Virtualisierung des Entwicklungsprozesses hat die Analyse- und Bewertungsmöglichkeiten hinsichtlich der Interaktion zwischen Mechanik und Elektronik signifikant erweitert. Dies begünstigt die Entwicklung mechatronischer Systeme mit gesteigerter Komplexität und erhöhter Effizienz. Durch die Aufwertung von Komfort-, Fahrdynamik- und Fahrsicherheitseigenschaften halten so auch immer mehr mechatronische Fahrwerkregelsysteme, wie beispielsweise aktive Dämpferregelungen, aktive Wankstabilisierungen und elektronische Stabilitätsprogramme, Einzug in alle Fahrzeugsegmente. [48, 28]

Mehrere Untersuchungen [9, 20] zeigen, dass die immer umfangreicheren Fahrwerkregelsysteme einen zunehmenden Einfluss auf die Belastungssituation im Fahrwerk bewirken, sodass diese im Entwicklungsprozess nicht mehr vernachlässigt werden können. So besitzt z. B. die hohe Dynamik am Rad durch Eingriffe der Fahrdynamikregelsysteme zur Kontrolle des Antriebs- und Bremsschlupfs einen großen Einfluss auf die Festigkeitsaus-

legung von Fahrwerks- und Antriebsstrangkomponenten. Bisher werden zur Ermittlung dieser Lastsituationen reale Prototypen eingesetzt, bei denen die auftretenden Lasten unter Einwirkung der aktiven Regelsysteme aufgezeichnet werden.

Um auch aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht eine prototypenfreie Entwicklung und somit eine Effizienzsteigerung im Fahrzeugentwicklungsprozess zu ermöglichen, müssen folglich auch die Einflüsse der Regelsysteme auf die Bauteilbelastung simulativ abgebildet und bewertet werden können. Im Kontext der Fahrzeugtechnik hat sich die Anwendung von Mehrkörpersimulation zur Ermittlung von Schnittkräften an individuellen Bauteilen bewährt. Dadurch ergibt sich nun die Notwendigkeit, Regelfunktionalitäten in diese Modelle zu integrieren, um den Entwicklungsprozess weiter zu virtualisieren und zu beschleunigen. Da für die korrekte Abbildung der Regelsystemalgorithmen eine Vielzahl von Fahrzustandsgrößen notwendig ist, ist nur die Integration der Regelfunktionalitäten in MKS-Gesamtfahrzeugsimulationen zielführend.

1.2 Stand der Technik

Bei der Lastdatenbestimmung für das Fahrwerk wird Bremsmanövern aufgrund ihres hohen Beitrags zur Schädigung der einzelnen Fahrwerkskomponenten eine besondere Bedeutung zugemessen. So zeigten Hägele et al. [29] bspw., dass durch die bei Bremsungen ins Fahrwerk eingeleiteten, hohen Längskräfte, Bremsungen maßgeblich für die betriebsfeste Bauteilbelastung entscheidend sind. Ebenso wurde in der Studie von Qian [61], in der die Fahrwerksbelastung auf Basis von realen Fahrzeugdaten analysiert wurde, die signifikante Rolle von Bremsvorgängen für die Belastung der Bauteile bestätigt.

Angesichts des signifikanten Einflusses von Bremsvorgängen auf die betriebsfeste Auslegung wird die simulative Abbildung von Bremsmanövern zur Lastdatenerfassung in einer Vielzahl von Publikationen thematisiert.

In [73] wurde die Betriebsfestigkeit während Bremsmanövern mittels einer MKS-Gesamtfahrzeugssimulation evaluiert. Aufgrund der fehlenden Integration eines Bremsregelmodells basieren die Simulationen auf der Annahme einer idealisierten Bremskraftverteilung über den gesamten Bremsvorgang. Diese Vereinfachung führt dazu, dass insbesondere auf unebenen Straßenoberflächen die simulierten Radrehzahlverläufe und somit die in das Fahrwerk eingeleiteten Kräfte nicht die realen Bedingungen widerspiegeln, da die real auftretende Dynamik aufgrund von ABS-Regelsystemeingriffen nicht abgebildet wird. Der enorme Einfluss der ABS-Regelsystemeingriffe auf die Fahrwerksbauteillasten wird ebenfalls in der Studie [46] identifiziert, in der ein Fahrwerksregelalgorithmus zur Berücksichtigung von Längs- und Vertikaldynamik vorgestellt und angewendet wird.

Um die Belastung von Bauteilen, die aus Bremsregelsystemeingriffen resultiert, realistischer abzubilden, werden in verschiedenen Veröffentlichungen die Entwicklung einfacher Bremsregelsysteme und deren Integration in die Mehrkörpersimulation untersucht.

Ein Beispiel hierfür findet sich in der Veröffentlichung von Gao et al. [23], in welcher ein MKS-Lastkraftwagenmodell durch eine Cosimulation mit einem eigens entwickelten Bremsregelsystem erweitert wird. Das entwickelte Bremsregelsystem wird mithilfe realer Messdaten parametrisiert. Durch die Einfachheit des modellierten Regelsystems sind die Simulationsergebnisse der Bremsmanöver nur bei dem zur Parametrisierung verwendeten Untergrund valide, wodurch eine individuelle Parametrierung für jeden Untergrund erforderlich ist.

In einer Vielzahl von weiteren Veröffentlichungen werden ähnliche Ansätze verfolgt [88, 32, 91, 4, 47]. In allen Veröffentlichungen zeigt sich zwar eine Verbesserung gegenüber einer Simulation ohne jegliches Regelsystem, jedoch werden bei der Gegenüberstellung mit realen Messdaten systematische Unterschiede deutlich.

Für die Erzeugung von realistischen Lastdaten, die für betriebsfeste Auslegungen oder gar zur virtuellen Absicherung verwendet werden können, ist die Modellierung des tatsächlichen Regelalgorithmus unumgänglich [52]. In der Studie von McCann und Khapane [52] wird daher die Verbesserung der Simulationsqualität durch die Einbindung des tatsächlichen Regelsystemalgorithmus beurteilt. Dazu wird mittels Cosimulation ein virtuelles Bremsregelsystem in ein MKS-Geländewagenmodell integriert und die Ergebnisse werden einem identischen Versuchsaufbau für verschiedene Bremsmanöver gegenübergestellt. Die qualitative Auswertung der Ergebnisse zeigt eine deutliche Verbesserung der Bremsdruck- und Kraftverläufe während des Bremsvorgangs gegenüber den vereinfachten Bremsregelmodellen. Eine detaillierte Diskussion der Regelsystemintegration und der zugehörigen Parameter oder eine quantitative Auswertung der Simulationsergebnisse wird nicht durchgeführt.

Auch in [83] sind experimentelle und simulative Ergebnisse bei Nutzung des identischen Regelsystemmodells verglichen worden. In der Studie wird so die Fragestellung untersucht, ob standardmäßige ABS-Algorithmen bei schwierigem Gelände funktionieren. Es kann sowohl simulativ mittels MKS-Modellierung als auch experimentell gezeigt werden, dass die Unebenheiten des Untergrundes Vibrationen und Messrauschen in den Eingangssignalen des Regelsystems induzieren. Dies wirkt sich negativ auf das Regelverhalten aus und geht mit hohen Bauteillasten einher. Das Vorgehen zur Integration der Regelfunktionalität und der zugehörigen Kopplungsparameter sowie die Bewertung der Simulationsgüte durch den Abgleich zwischen Simulation und Messung werden jedoch nicht explizit thematisiert.

In [48] integriert Mack das reale Bremsregelsystem durch Cosimulation in eine MKS-Gesamtfahrzeugsimulation und führt eine ausführliche Validierung von Bremsmanövern auf ebenem und unebenem Untergrund durch. Bei der Auswertung stellt er fest, dass die Abbildungsqualität bei der Fahrwerksbelastung von vielen Parametern und maßgeblich von der Abbildung des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes beeinflusst wird. Zusätzlich diskutiert er einzelne Bauteilmodellierungen und gibt Empfehlungen für zukünftige Integrationen von Regelsystemen.

Die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Regelsystemeinbindung werden von Brandes [8] erweitert und neben dem ABS-Regelsystem auch auf die Integration von Vertikal- und Querdynamikregelsystemen in Gesamtfahrzeugsimulationen übertragen. Auch in dieser Untersuchung wird die Ergebnisgüte für einzelne Bremsmanöver auf ebener und unebener Strecke bewertet und die hohe Schädigungsrelevanz von Bremsingriffen thematisiert. Die Veröffentlichungen zeigen, dass Integrationen der Regelfunktionalitäten grundsätzlich möglich sind und eine vielversprechende Abbildungsgüte erreichbar ist. Auch der Einfluss dieser Regelsysteme auf die Betriebsfestigkeit wird in einigen Publikationen bereits thematisiert. Die Untersuchungen beschränken sich jedoch auf die Reproduktion einzelner Bremsmanöver. Aussagen hinsichtlich Gesamtdauerlaufmessungen, welche für die Bauteildimensionierung und -freigabe entscheidend sind und aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht tatsächlich eine prototypenfreie Entwicklung ermöglichen würden, werden nicht thematisiert oder bewertet.

Des Weiteren beschränken sich die Untersuchungen auf die Abbildung der reinen Regelalgorithmen. Die häufig vorliegenden virtuellen, realitätsnahen Steuergeräte benötigen eine Vielzahl von weiteren Eingangskanälen, die nicht direkt für den Regelalgorithmus selbst notwendig sind, aber für geräteinterne Kommunikations- und Überwachungsmechanismen, um Einschränkungen der Steuergerätefunktionalitäten zu vermeiden. Eine Methodik zur Integration der realitätsnahen Steuergeräte sowie zum Umgang mit Eingangsgrößen, die nicht in der MKS-Simulation bereitgestellt werden können, ist bisher nicht publiziert.

1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit soll systematisch die Integration von Regelsystemen in Mehrkörpersimulationen mit Fokus auf die Betriebsfestigkeit betrachtet werden. Es gilt dabei die Frage zu beantworten, ob auch aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht eine prototypenfreie Entwicklung realisierbar ist.

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, wird diese Fragestellung durch die Beschränkung auf die Bewertung der Reproduktion von einzelnen Manövern sowie durch die vereinfachte Abbildung der Regelfunktionalitäten ohne Berücksichtigung der notwendigen Kommunikation mit anderen Steuergeräten mit dem aktuellen, wissenschaftlichen Stand nicht hinreichend genau beantwortet.

Zur fundierten Beurteilung der systematischen Integration der Regelsysteme sind drei zentrale Fragen zu klären, welche die wissenschaftliche Ausrichtung und Fragestellung dieser Arbeit definieren:

1. Welcher ist der geeignetste Kopplungsansatz für die Integration von Regelfunktionalitäten in MKS-Gesamtfahrzeugsimulationen?
2. Welche Abbildungsgüte ist bei der Vorhersage von Kräften erreichbar und wie steht

diese Güte in Relation zu der in Messungen auftretenden Streuung?

3. Wie können die am häufigsten vorkommenden, virtuellen, seriennahen Steuergeräte produktiv integriert werden, obwohl viele Kommunikationsgrößen in MKS-Modellen nicht abgebildet sind?

Zur Beantwortung dieser Fragen ist die Arbeit wie in Abbildung 1.1 dargestellt gegliedert. Zunächst werden in Kapitel 2 die zum Verständnis notwendigen, theoretischen Grundlagen erklärt. Anschließend wird in Kapitel 3 die verwendete Fahrzeugmodellierung vorgestellt. In Kapitel 4 werden zum Abschluss der Grundlagen alle grundsätzlich existierenden Kopplungsmöglichkeiten zur Integration von Regelsystemen vorgestellt und klassifiziert. Zur Beantwortung der Frage nach dem geeignetsten Kopplungsansatz erfolgt anschließend eine Diskussion und Bewertung der unterschiedlichen Ansätze.

Für die so identifizierte, optimale Kopplungsstrategie werden in Kapitel 5 der Einfluss verschiedener Kopplungs- und Simulationsparameter sowie deren Variation veranschaulicht. Mithilfe dieser Untersuchungen werden sinnvolle Kopplungs- und Simulationsparameter abgeleitet sowie deren Einfluss auf die Abbildungsgüte aufgezeigt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse widmet sich Kapitel 6 der Frage, welche Abbildungsgüte erreichbar ist. Nach der Validierung der Fahrbahn-Fahrzeug-Interaktion wird zunächst die Güte der Reproduktion von einzelnen Bremsmanövern untersucht. Anhand der Analyse von Messdaten und der dabei auftretenden Streuung werden daraufhin die zur Zertifizierung relevanten Fahrbetriebsmessungen bewertet.

Die Untersuchungen in Kapitel 6 basieren auf der Nutzung eines Steuergerätes geringer Modellierungstiefe (Level 0 - II), für das alle Eingangsgrößen vorliegen. In Kapitel 7 wird hingegen eine Methodik vorgestellt, die durch den Einsatz von neuronalen Netzen die Integration von Regelsystemen mit höherer Modellierungstiefe (Level III und IV) ermöglicht und somit auf die vertiefte Betrachtung der dritten Forschungsfrage abzielt. Nach Anwendung und Bewertung dieser Methodik für Dauerlaufversuche werden durch Adaption der grundlegenden Methodik weitere mögliche Einsatzgebiete vorgestellt. In Kapitel 8 werden die Erkenntnisse abschließend zusammengefasst und weitere potentielle Forschungsgebiete aufgezeigt.

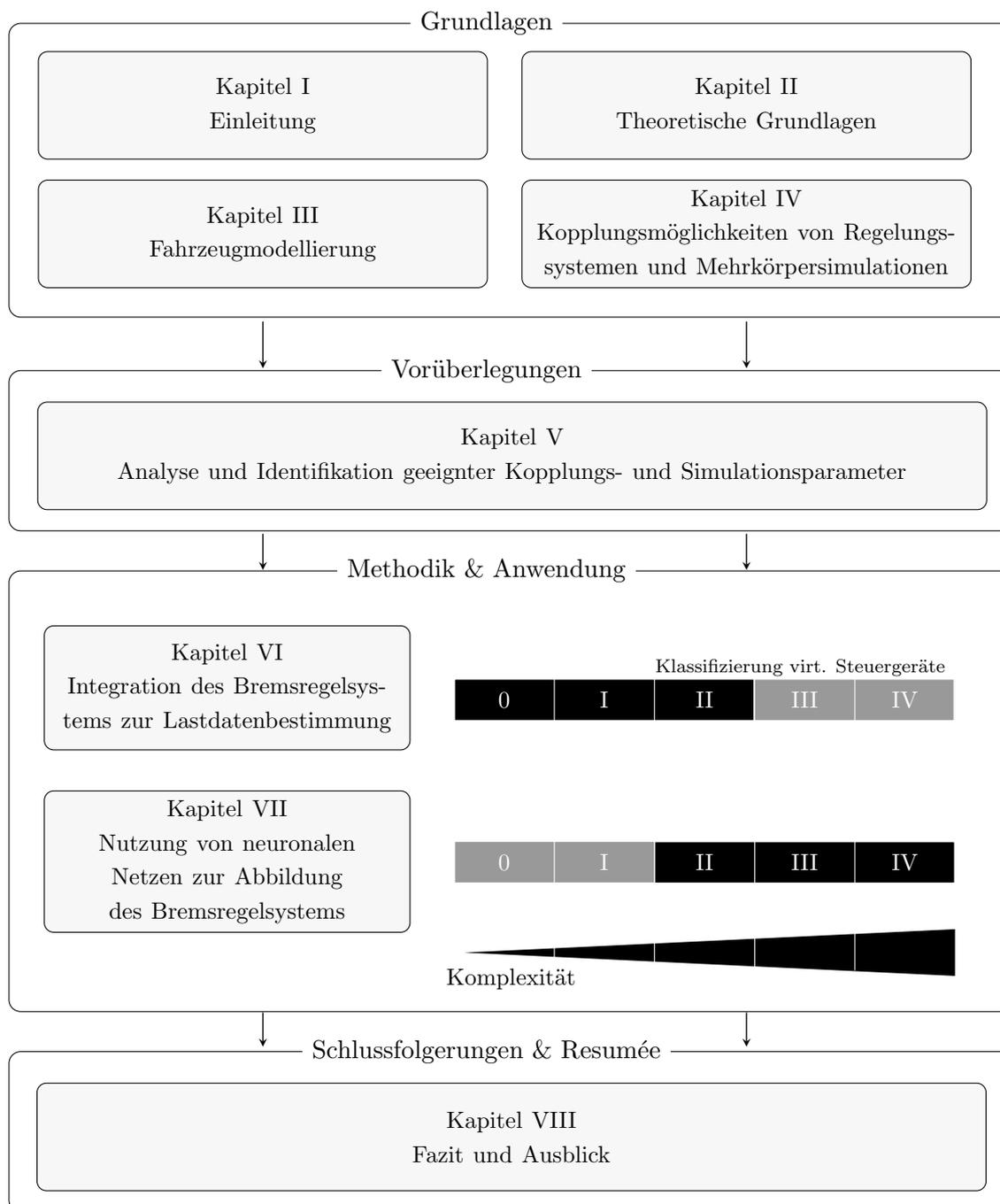


Abb. 1.1: Schematische Illustration der Gliederung der Dissertation

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Konzepte, die für das Verständnis dieser Arbeit sowie die Bewertung der Ergebnisse erforderlich sind, erläutert. Zunächst werden die Grundlagen der Betriebsfestigkeit und der Mehrkörpersimulationen behandelt. Danach werden die essentiellen Aspekte der Fahrdynamik und der Funktionsweise neuronaler Netze dargestellt.

2.1 Betriebsfestigkeit

Die betriebsfeste Auslegung von Fahrzeugbauteilen ist ein grundlegender Bestandteil des Auslegungs- und Freigabeprozesses. Die Herausforderung besteht darin, einerseits die Bauteile ausreichend für die während des Lebenszyklus auftretenden Kräfte zu dimensionieren und andererseits die Leichtbau- und Kostenpotentiale maximal auszuschöpfen [26]. Die betriebsfeste Auslegung von Bauteilen lässt sich grundsätzlich in drei Gebiete unterteilen [26]:

- Untersuchung der Belastung und Beanspruchung
- Ermittlung der Beanspruchbarkeit
- Bestimmung der Gesamtschädigung mittels Schadensakkumulationshypothese

In den folgenden Abschnitten wird im Detail auf die einzelnen Teilaspekte eingegangen sowie ein Überblick über die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Sicherheits- und Zuverlässigkeitskonzepte gegeben.

2.1.1 Belastung und Beanspruchung

Je nach Anwendungsgebiet können verschiedene Arten von Belastungen, wie äußere Kräfte, Momente und Temperatureinflüsse, auf ein Bauteil einwirken. Diese können sowohl konstant, als auch zeitlich variabel sein. Im Gleichgewicht zu den äußeren Belastungen

stehen die daraus resultierenden, inneren Beanspruchungen. [15]

Für Ermüdungsphänomene und somit auch für die Lebensdauer von Bauteilen sind die veränderlichen Beanspruchungen entscheidend. Um die meist regellosen, zeitlichen Belastungsverläufe zu charakterisieren, werden statistische Auswertungen mittels Klassierverfahren durchgeführt. Ziel der Klassierverfahren ist die Bestimmung einer Häufigkeitsverteilung der Beanspruchungsamplituden. Diese Häufigkeitsverteilung wird als Lastkollektiv bezeichnet. Aus dem Lastkollektiv können keine Rückschlüsse auf die zeitliche Abfolge der Beanspruchungen sowie deren Frequenz geschlossen werden. Für jeden Anwendungsfall ist daher zu prüfen, ob diese Datenreduktion durch das Klassierverfahren zulässig ist. Da ein zeitabhängiges Material- und Bauteilverhalten in dieser Arbeit nicht relevant ist, ist die Datenreduktion durch das Klassierverfahren uneingeschränkt nutzbar. [42, 16]

Im Rahmen dieser Arbeit wird das zweiparametrische Rainflowzählverfahren zur Bestimmung der Lastkollektive verwendet. Bei diesem Verfahren werden im Zeitsignal auftretende Hysteresen erfasst und gezählt. Die Fläche der Hysteresen kann physikalisch als aufgenommene Energie des Bauteils interpretiert werden, die die Verformung, den Anriss und das Risswachstum im Bauteil bewirkt. Dank dieser werkstoffmechanischen Analogie gilt dieses Verfahren als aktueller Stand der Technik und wird in vielen Richtlinien, beispielsweise in der FKM-Richtlinie [19] zur Spannungskollektivableitung, für den Festigkeitsnachweis vorgeschrieben. [15, 16]

Es existieren verschiedene Algorithmen zur Realisierung der Rainflowzählung. Die Grundidee zur Bestimmung der Hysteresen kann mithilfe eines fiktiven Regentropfens, welcher über das um 90 Grad im Uhrzeigersinn gedrehte Zeitsignal fließt, visualisiert werden (siehe Bild 2.1a). Zur Identifizierung der Hysteresen ist das Belastungssignal in äquidistante Klassen diskretisiert. Die Klassenbreite richtet sich nach der Messgenauigkeit und dem Anwendungsbeispiel. [42]

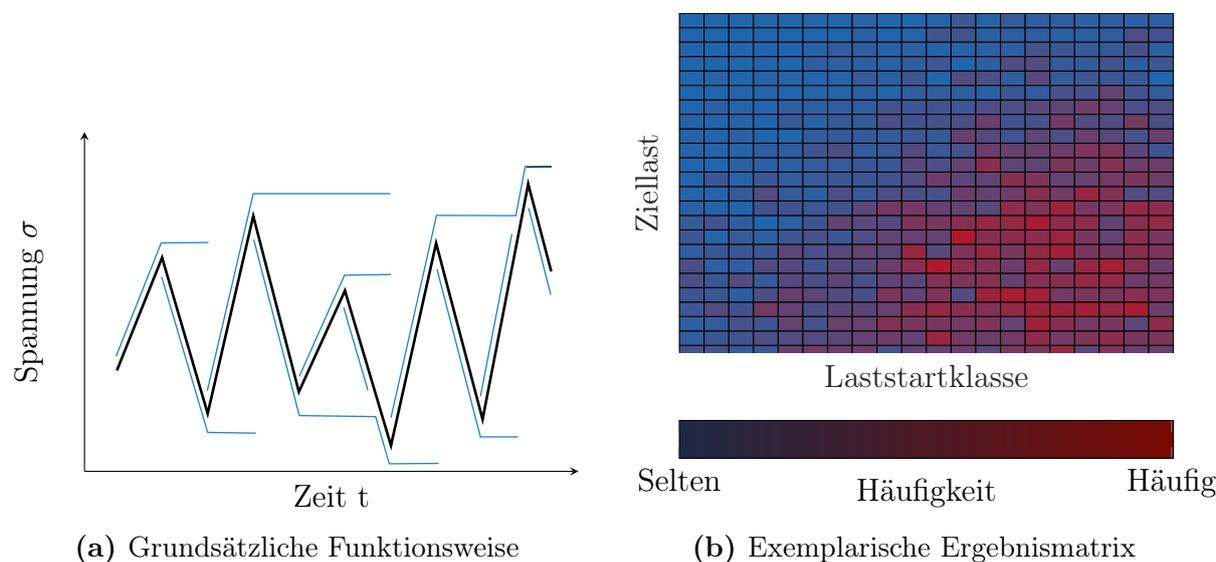


Abb. 2.1: Rainflowzählverfahren

Das Ergebnis der Rainflowzählung, die Häufigkeitsverteilung geschlossener Hysteresen in Abhängigkeit der Start- und Endklasse, ist exemplarisch in Abbildung 2.1b dargestellt. Es sei erwähnt, dass nicht geschlossene Hysteresen übrig bleiben können. Da auch diese einen nicht vernachlässigbaren Anteil an der Bauteilschädigung haben können, wird in dieser Arbeit eine doppelte Residuumsbehandlung durchgeführt [8]. Dabei werden nicht geschlossene Hystereseschleifen durch eine Wiederholung des übrigbleibenden Signals geschlossen und somit in der Zählung berücksichtigt.

2.1.2 Beanspruchbarkeit

Die Fähigkeit einer Werkstoff- bzw. Bauteilprobe, einer zyklischen Beanspruchung ohne Versagen standzuhalten, wird durch die zyklische Beanspruchbarkeit beschrieben. Diese Eigenschaft wird durch die Wöhlerkennlinie charakterisiert, die die ertragbare Lastamplitude in Abhängigkeit der maximal erreichbaren Schwingspielzahl repräsentiert. Zur Bestimmung dieser Kennlinie werden Proben einer sinusförmigen Belastung bei konstanter Amplitude und Mittellast bis zum Versagen ausgesetzt. Durch die Wiederholung dieses Schwingfestigkeitsversuchs mit verschiedenen Amplituden kann die Wöhlerkennlinie ermittelt werden. [8, 26]

In Abbildung 2.2 ist die Wöhlerkennlinie für metallische Werkstoffe dargestellt. Die Kennlinie lässt sich in die drei Bereiche Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit einteilen. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich versagt der Werkstoff frühzeitig durch hauptsächlich plastische Verformung. Dieser Bereich reicht bis zu einer Lastzyklenanzahl von $N = 10^3, \dots, 10^4$. Im Zeitfestigkeitsbereich liegt bei einer doppellogarithmischen Abbildung ein linearer Zusammenhang zwischen der Spannungsamplitude und der ertragbaren Schwingspielzahl vor. Die Zeitfestigkeitsgerade lässt sich daher durch

$$\sigma_a = \sigma_D \left(\frac{N_D}{N} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.1)$$

charakterisieren. Zur Beschreibung ist zum einen die Neigung der Geraden k und zum anderen der Abknickpunkt (N_D, σ_D) , der den Übergang in den Dauerfestigkeitsbereich definiert, notwendig. Im Dauerfestigkeitsbereich nehmen die ertragbaren Spannungsamplituden je nach Material keinen oder lediglich einen geringen Einfluss auf die Lebensdauer. [26, 15]

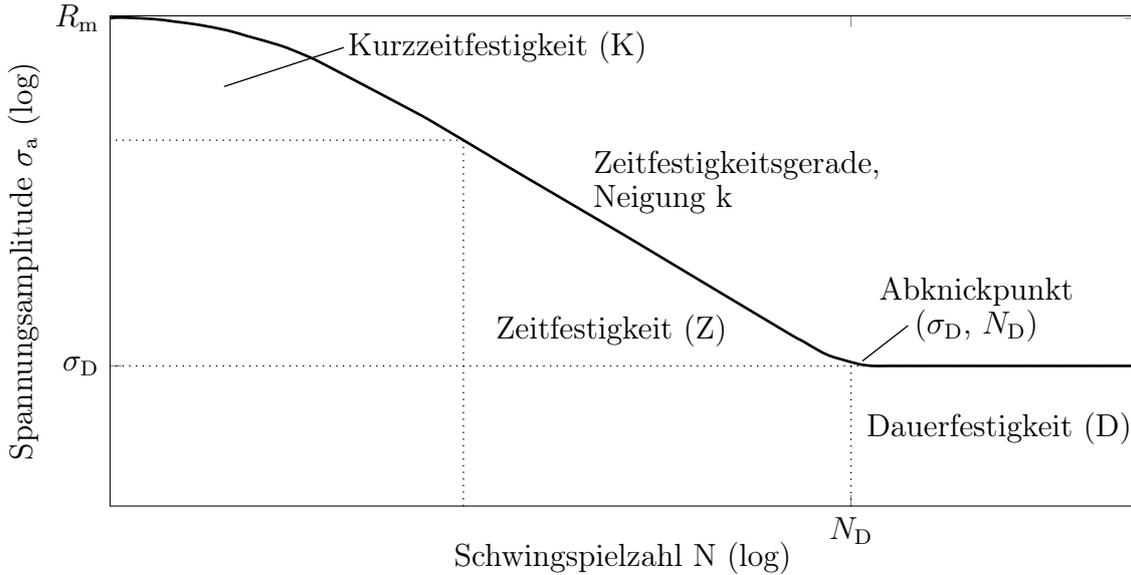


Abb. 2.2: Charakteristischer Verlauf einer Wöhlerkennlinie in Anlehnung an [26]

2.1.3 Lineare Schadensakkumulation

Dem Wöhlerdiagramm ist die maximal erreichbare Schwingspielzahl für eine konstante Spannungsamplitude entnehmbar. In der Realität treten jedoch i. A. stochastische Anregungen mit unterschiedlichen Spannungsamplituden auf. Diese unregelmäßigen Beanspruchungen sind in der Wöhlerkennlinie nicht berücksichtigt. [26]

Zur Abschätzung der möglichen Lebensdauer werden daher Schadensakkumulationshypothesen angewendet. Hierzu wird das Anregungssignal mithilfe der beschriebenen Zählverfahren in verschiedene Amplitudenklassen eingeteilt. Für jede Klasse wird anschließend eine Teilschädigung bestimmt. Die Gesamtschädigung ergibt sich durch die Kumulation der verschiedenen Teilschädigungen. [42]

In dieser Arbeit wird die als wissenschaftlicher Standard etablierte Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner [57, 54] verwendet, laut welcher die Teilschädigung D_i als Verhältnis der auftretenden Schwingzahlspiele n_i zu den maximal ertragbaren Schwingzahlspielen N_i der jeweiligen Schadensklasse definiert ist. Die Summierung der Teilschädigungen ergibt die Gesamtschädigung

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i}. \quad (2.2)$$

Durch Verwendung von Gleichung 2.1 lässt sich die Gesamtschädigung folglich in Abhängigkeit der Lastamplitude ausdrücken

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_D} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_D} \right)^k. \quad (2.3)$$

In der Theorie bedeutet ein Schaden von $D = 1$ das Versagen des Bauteils. In der Praxis kann es jedoch zu erheblichen Abweichungen von den prognostizierten Schadenswerten kommen. Dies liegt an der großen Streuung der Beanspruchbarkeit aufgrund von Faktoren wie den Werkstoffeigenschaften, dem Herstellungsprozess sowie an den mit Werkstoffkennwerten assoziierten Ausfallwahrscheinlichkeiten [42].

Für diese Arbeit hat dies jedoch keine Relevanz, da die Schadenskennwerte hier für relative Lebensdauerabschätzungen und Tendenzanalysen durchgeführt werden. Für die Berechnung der Schadenskennwerte wird daher gemäß [64, 8] eine fiktive Wöhlerkurve mit einer Neigung von $k = 5$ und einem Abknickpunkt ($N_D = 1 \cdot 10^5$, $\sigma_D = 1000$) festgelegt. Diese Wöhlerkurvenabschätzung ist für nichtgeschweißte Stahl- und Aluminiummaterialien bei Zug- und Druckbelastung, wie sie im Automobilbau Anwendung finden, gültig. Aufgrund der fiktiven Wöhlerkurve wird im Folgenden stets von einer Pseudoschädigung oder Belastungskennzahl (BKZ) gesprochen.

Die Pseudoschädigung wird zur Diskussion und Bewertung von Ergebnissen dieser Arbeit genutzt. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle explizit auf die Sensitivität und die Größenordnung von Abweichungen dieser Quantität eingegangen. Gemäß Gleichung 2.3 führt eine Änderung der Lastamplitude um den Faktor C zu einer Veränderung der jeweiligen Teilschädigung gemäß

$$\frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{\sigma_{a,2}}{\sigma_{a,1}} \right)^k = C^k. \quad (2.4)$$

Konkret bedeutet dies bei der genutzten Wöhlerkurvenneigung von $k = 5$, dass eine Erhöhung der Lastspitzen von 10 % eine Erhöhung der Schädigung von 61 % bewirkt [8]. Durch die hohe Sensitivität wird eine Abweichung der Schädigung von bis zu 50 % in der Literatur als sehr gute Übereinstimmung gewertet [89, 30].

2.1.4 Bemessung

Bei der Bemessung von Bauteilen ist immer die Gegenüberstellung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit notwendig. Für die Dauerfestigkeit wird dabei zwischen den klassischen Sicherheitskonzepten und den Zuverlässigkeitskonzepten unterschieden [42].

Wie in Abbildung 2.3a dargestellt, ist bei klassischen Sicherheitskonzepten für die Betriebsfestigkeit ein fest definierter Sicherheitsfaktor S einzuhalten, welcher das Verhältnis von Beanspruchbarkeit σ_{aF} zu Beanspruchung σ_{aB} beschreibt

$$S = \frac{\sigma_{aF}}{\sigma_{aB}}. \quad (2.5)$$

Die Sicherheitsfaktoren basieren meist auf Erfahrungswerten oder Richtlinien. In der Realität sind die genauen Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten jedoch nicht exakt bestimmbar, da sie einer Streuung unterliegen. Im Fahrzeugbau ist beispielsweise das Nutzungsverhalten des Fahrers maßgeblich für die Streuung der Beanspruchung verantwort-

lich. Fertigungs- und Montagetoleranzen beeinflussen wiederum die Beanspruchbarkeit. Sowohl die Beanspruchungen als auch die Beanspruchbarkeiten streuen folglich um einen Mittelwert. [8, 42]

Für gewöhnlich wird für beide Größen eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Diese Streuungen sind im Zuverlässigkeitskonzept berücksichtigt und exemplarisch in Abbildung 2.3b dargestellt. Die eingezeichnete, schraffierte Fläche kennzeichnet den Bereich des Bauteilversagens, in welchem die Beanspruchung σ_{aB} , höher als die Beanspruchbarkeit σ_{aF} ist. Die Ausfallwahrscheinlichkeit P_A kann gemäß

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u_0} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2.6)$$

berechnet werden. u_0 gibt dabei die sogenannte bezogene Sicherheitsspanne an und wird aus den Mittelwerten von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit σ_{aB50} und σ_{aF50} sowie den zugehörigen Streuungen $\overline{\sigma_{aB}}$ und $\overline{\sigma_{aF}}$ bestimmt

$$u_0 = \frac{\log(\sigma_{aF50}) - \log(\sigma_{aB50})}{\sqrt{\overline{\sigma_{aF}}^2 + \overline{\sigma_{aB}}^2}}. \quad (2.7)$$

Für jeden Anwendungsfall müssen die tolerierbaren Ausfallwahrscheinlichkeiten und Wahrscheinlichkeitsverteilungen individuell definiert werden. Im Fahrzeugbau hat sich die Absicherung der Funktionalität des sogenannten 1 %-Fahrers mit dem 1 ‰-Bauteil etabliert. Der 1 %-Fahrer repräsentiert ein Nutzungsverhalten des Fahrzeugs, für welches lediglich 1 % der Kunden eine höhere Beanspruchung erzeugen. Das 1 ‰-Bauteil stellt das Bauteil dar, für welches nur 1 ‰ der Bauteile eine geringere Beanspruchbarkeit aufweisen.

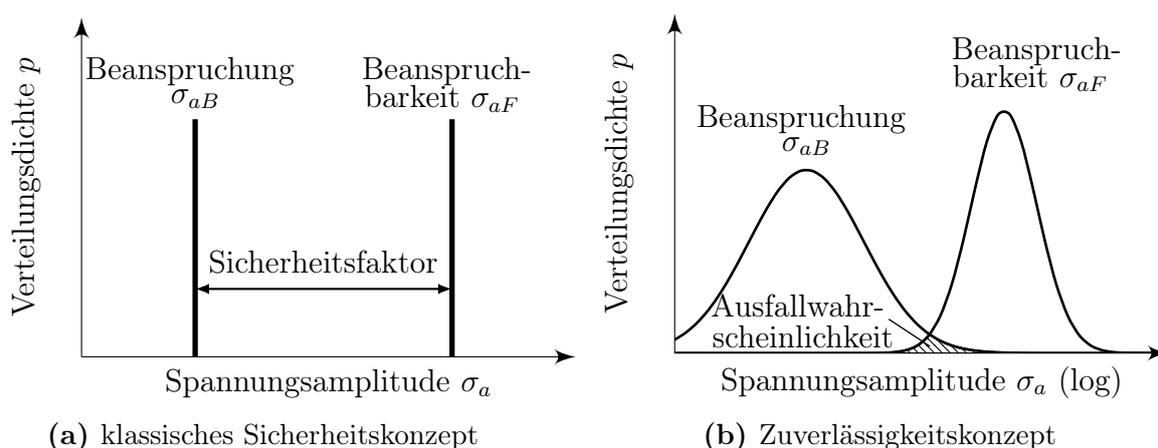


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der Dauerfestigkeitskonzepte in Anlehnung an [42]

Bei realen Fahrzeugerprobungen kann aufgrund der immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen aus Zeitgründen nicht das gesamte Nutzungsverhalten des 1 %-Fahrers nachgestellt werden. Zur Reproduktion einer äquivalenten Beanspruchung und somit auch

einer äquivalenten Schädigung werden daher verschiedene Maßnahmen ergriffen, um eine Reduzierung des Zeitbedarfs zu realisieren. Zunächst werden alle Stillstandsphasen des Nutzungsprofils des 1 %-Fahrers eliminiert. Des Weiteren wird das Nutzungsprofil ommissioniert. Dies bedeutet, dass Phasen mit Beanspruchungen im Dauerfestigkeitsbereich entfernt werden und basiert auf der Prämisse, dass bei Belastungen im Dauerfestigkeitsbereich keine Schädigung erzeugt wird (vgl. Abschnitt 2.1.2). Um die Prüfzeit weiter zu reduzieren, wird das Signal durch Laststeigerungen zusätzlich gerafft. Die Grundidee hierbei ist, dass bei Kenntnis der Wöhlerkurvenneigung die Lastamplituden erhöht werden können, um bei geringen Schwingungszahlen die gleiche Schädigung zu erzielen. Eine Möglichkeit, um diese äquivalente Schädigung durch die Erhöhung der Lastamplituden zu erreichen, ist beispielsweise die vermehrte Fahrt über Schlechtwegstrecken. Durch diese Maßnahmen lässt sich die Prüfzeit unter Berücksichtigung der Beanspruchungsforderungen des 1 %-Fahrers deutlich reduzieren. Die Wahl eines geeigneten Raffungsfaktors erfolgt üblicherweise auf der Grundlage empirischer Erfahrungswerte [42]. Ein ständiger Abgleich des gewählten Erprobungskonzeptes mit realen Nutzungs- und Kundendaten zur Überprüfung der Validität des Raffungsfaktors ist daher unumgänglich.

Obwohl die Streuung der Beanspruchbarkeit aufgrund der automatisierten Produktion und Qualitätskontrolle deutlich kleiner ist als die Streuung der Beanspruchung, muss sie im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Gemäß des hier vorgestellten Zuverlässigkeitskonzepts werden dazu meist mehrere Bauteile getestet, um statistisch sicherzustellen, dass die Beanspruchbarkeit des 1 %-Bauteils für die vorgegebene Ausfallwahrscheinlichkeit ausreichend ist. [42]

2.2 Mehrkörpersysteme

Für die Untersuchung eines mechanischen Systems durch numerische Simulationen ist dessen Beschreibung durch ein Ersatzmodell notwendig, das anschließend mittels numerischer Integration simuliert wird. Um Belastungen und Bewegungen in mechanischen Systemen zu bestimmen, wird häufig die MKS-Simulation als geeignete Methodik eingesetzt. In diesem Abschnitt sollen die grundsätzlichen Gleichungen sowie die Umsetzung in der hier verwendeten, kommerziellen Software ADAMS vorgestellt werden.

2.2.1 Grundgleichungen

Ein Mehrkörpersystem setzt sich aus mehreren Einzelkörpern zusammen, welche durch die jeweilige Masse, den Trägheitstensor und die Schwerpunktlage charakterisiert werden. Die Einzelkörper, die jeweils über drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade verfügen, sind durch Verbindungen miteinander gekoppelt. Dabei wird zwischen den sogenannten holonomen Verbindungen, die bspw. ideale, unnachgiebige Gelenke und Lager darstellen und somit die Lagegrößen der Einzelkörper beschränken und nichtholonomen

Verbindungen, welche die Geschwindigkeit, nicht aber die Lage einschränken, unterscheiden. [86, 8].

Zur systematischen Formulierung der Bewegungsgleichungen für die Mehrkörpersysteme existieren verschiedene Ansätze [65]. Eine Möglichkeit, die für das gekoppelte Mehrkörpersystem entstehenden Bewegungsgleichungen zu beschreiben, ist der Lagrange Formalismus, bei welchem die Bewegungsgleichungen in voneinander abhängigen Koordinaten aufgestellt werden. Diese sogenannten Lagrange'schen Gleichungen erster Art stellen die Bewegungsgleichungen als differential-algebraisches Gleichungssystem (DAE-System) dar und lauten

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_j} + \mathbf{C}_q^T \cdot \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{q}}(t), \mathbf{q}(t), t) \\ \text{mit} \quad & \mathbf{C}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), t) = 0, \quad \mathbf{C} \in \mathbb{R}^m, \\ \text{wobei} \quad & \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T & \mathbf{q}_2^T & \dots & \mathbf{q}_n^T \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n \times 6}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Gemäß der Gleichung stehen die nichtkonservativen Kräfte \mathbf{Q} , wie bspw. Aktuator- oder Dämpferkräfte, mit den Beschleunigungskräften $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_j} \right)$, den Potentialkräften $\frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_j}$ und dem Produkt aus partiellen Ableitungen der Zwangsbedingungen und Lagrangemultiplikatoren $\mathbf{C}_q^T \cdot \boldsymbol{\lambda}$ im Gleichgewicht. Die Kräfte sind in den generalisierten Koordinaten \mathbf{q} beschrieben, die die Position und die Orientierung der n Einzelkörper in Bezug auf ein Inertialkoordinatensystem ausdrücken. Folglich ist die Anzahl der Koordinaten $6n$, wobei m Koordinaten durch die aus den Verbindungen resultierenden Zwangsbedingungen \mathbf{C} gesperrt werden. [8, 65]

Die partiellen Ableitungen dieser Zwangsbedingungen, die sich gemäß

$$\mathbf{C}_q^T = \frac{\partial \mathbf{C}^T}{\partial \mathbf{q}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial C_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial C_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial C_m}{\partial q_n} \end{pmatrix}^T \quad (2.9)$$

bestimmen lassen, können als Richtung der wirkenden Zwänge der Verbindungen interpretiert werden. Die Einträge des Vektors $\boldsymbol{\lambda}$, häufig als Lagrange-Multiplikatoren bezeichnet, können des Weiteren als Kraftwerte der durch die Zwangsbedingungen gesperrten Freiheitsgrade angesehen werden, sodass das Produkt beider Größen die durch die Zwangsbedingungen induzierten Kräfte, wie bspw. Lager- und Gelenkkräfte, darstellen [48].

Mithilfe von Anfangsbedingungen müssen für jeden Zeitschritt die generalisierten Koordinaten sowie die Lagrange-Multiplikatoren mittels numerischer Integration bestimmt werden. Durch die notwendige Bestimmung der Lagrange-Multiplikatoren liegen folglich bei jedem Integrationsschritt die Lager- und Gelenkkräfte unmittelbar vor [48, 8].

Bei idealisierten Systemen mit lediglich holonomen Verbindungen können die expliziten Bindungsgleichungen durch eine effiziente Wahl der Koordinatenrichtungen in den Koordinaten impliziert werden, sodass sich die Anzahl der notwendigen Koordinaten auf das

Minimum von $6(n - m)$ sogenannten Minimalkoordinaten reduziert. Dadurch kann das DAE-System aus Gleichung 2.8 in ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem erster Ordnung überführt werden

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_j} = \mathbf{Q}, \quad (2.10)$$

wobei $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T & \mathbf{q}_2^T & \dots & \mathbf{q}_n^T \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n-m \times 6}$,

was als Lagrange'sche Gleichungen zweiter Art bezeichnet wird. Die Beschreibung der Bewegungsgleichungen über diesen Ansatz bietet den Vorteil, dass zum einen die Anzahl der Gleichungen geringer ist und zum anderen die Integrationsmethoden für gewöhnliche Differentialgleichungssysteme performanter sind. [48, 65]

2.2.2 Implementierung in ADAMS

Da die MKS-Gesamtfahrzeugmodelle im Automobilbereich für gewöhnlich Dämpfungselemente in den Fahrwerkslagern aufweisen, welche nichtholonome Verbindungen darstellen, kann zur Bestimmung der Bewegungsgleichungen nur die Lagrange'sche Gleichungen erster Art genutzt werden (vgl. Gleichung 2.8). Die Grundgleichung 2.8 lässt sich durch Umformung als

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}, t) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_q^T(\mathbf{q}, t) \cdot \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{A}^T \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathbf{0} \quad (2.11)$$

ausdrücken, wobei \mathbf{M} die Massematrix mit Informationen zu Massen und Trägheiten sowie \mathbf{A}^T die Transformationsmatrix zur Orientierung der äußeren Kräfte \mathbf{F} in Richtung der Koordinaten \mathbf{q} ist [56].

Das Gleichungssystem in Gleichung 2.11 ist ein DAE-System zweiter Ordnung. Zur Lösung mittels der in ADAMS implementierten, numerischen Lösungsverfahren ist eine Ordnungsreduktion zu einem System erster Ordnung notwendig. Dies ist durch die Substitution der Geschwindigkeit der generalisierten Koordinaten $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{x}$ realisierbar und ergibt mit Gleichung 2.11

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}, t) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_q^T(\mathbf{q}, t) \cdot \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{A}^T \mathbf{F} = \mathbf{0}$$

mit $\mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^m$, (2.12)

und $\mathbf{x} - \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$.

Die Darstellung der Bewegungsgleichung in dieser Form stellt die Deskriptorform oder Index-3-Formulierung dar. Hierbei sind die Zwangsbedingungen auf Lageebene definiert, sodass keine Auswertung eines Integrationsfehlers für die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen möglich ist. Für Simulationen mit plötzlichen Zustandsänderungen, wie bspw. bei Stoßphänomenen, ist diese Formulierung weniger geeignet, da bei den notwendigen, kleinen Schrittweiten hohe Werte in der Jacobi-Matrix entstehen können, was zu einer singulären Jacobi-Matrix und somit zu Instabilitäten führen kann. [48, 65]

Zur Reduzierung der Tendenz der Jacobi-Matrix, bei kleinen Schrittweiten singulär zu werden, können die Bewegungsgleichungen in die Index-2-Formulierung überführt werden. Hierbei werden die Zwangsbedingungen auf Geschwindigkeitsebene anstatt auf Lageebene definiert. Da das Erfüllen der Zwangsbedingungen auf Geschwindigkeitsebene nicht automatisch die Zwangsbedingungen auf Lageebene bedingt, werden zusätzlich die Zwangsbedingungen der Lage in das Gleichungssystem aufgenommen

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{M}(\mathbf{q}, t)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_q^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) \cdot \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{A}^T \mathbf{F} = \mathbf{0} \\
 \text{mit} \quad & \mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{C} \in \mathbb{R}^m, \\
 & \dot{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \mathbf{x}, t) = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{C}} \in \mathbb{R}^m, \\
 \text{und} \quad & \mathbf{x} - \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}.
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Der Vorteil dieser sogenannten stabilisierten Index-2-Formulierung (kurz: SI2) ist, dass sowohl für die Lage-, als auch für die Geschwindigkeitsebene die Integrationsfehler ausgewertet und kontrolliert werden können, wodurch eine präzisere Bestimmung ermöglicht wird. Dies führt auch zu einer akkurateren Bestimmung auf Beschleunigungsebene, was mit weniger durch Numerik verursachten Peaks einhergeht. Wie von Mack [48] gezeigt, eignet sich diese Formulierung der Bewegungsgleichungen daher besonders für Bremsungen mit ABS-Eingriff und findet auch in dieser Arbeit Anwendung. [48, 65]

Zur Integration der vorgestellten Bewegungsgleichungen 2.12 und 2.13 wird in ADAMS die Prädiktor-Korrektor-Methode angewendet. Durch die Nutzung von mehreren früheren Berechnungsschritten zur Lösung der Bewegungsgleichungen stellt diese Methode ein sogenanntes Mehrschrittintegrationsverfahren dar. Die numerische Integration eines Zeitschrittes setzt sich aus der expliziten Prädiktion und der impliziten Korrektur zusammen. Bei der expliziten Prädiktion werden für jede Komponente des Lösungsvektors Werte mittels polynomialer Extrapolation abgeschätzt. Diese Schätzungen werden anschließend während der impliziten Korrekturphase korrigiert. Sie dienen als Startwert für die iterative Lösung von rückwärtigen Differentiationsformeln (kurz: BDF vom engl. Backward Differentiation Formulas), welche die Beziehung zwischen der Ableitung des Lösungsvektors und dem Lösungsvektor selbst ausdrücken und mittels des Quasi-Newton-Verfahrens bestimmt werden. Zur Bewertung, ob die so bestimmte Lösung den gewünschten Genauigkeitsangaben entspricht, wird der mittlere quadratische Fehler der während der Korrektur bestimmten Lösung und der initialen Schätzung bestimmt. Liegt dieser Wert unterhalb einer definierten Fehlerschwelle, wird die Lösung akzeptiert und die Prädiktorordnung und -schrittweite für den nächsten Zeitschritt definiert. Andernfalls wird der Prozess mit angepassten Parametern wiederholt. Es sei darauf hingewiesen, dass die variable Schrittweitensteuerung in ADAMS vom Ausgabezeitschritt beeinflusst werden kann, was einen direkten Einfluss des Ausgabezeitschritts auf die Wahl der Schrittweite und daher auch auf die numerische Lösung bedingen kann. [48, 65]

2.3 Fahrdynamik

Innerhalb dieses Abschnitts werden die Grundlagen der Fahrdynamik, die für das Verständnis dieser Arbeit relevant sind, vorgestellt. Die Fahrdynamik beschreibt die Fahrzeugbewegung, die durch im Fahrbetrieb auftretende Kräfte, wie beispielsweise bei Kurvenfahrt oder Bremsvorgängen, hervorgerufen wird. Zunächst wird die in dieser Arbeit genutzte Definition für Koordinatensysteme vorgestellt. Anschließend wird auf die Grundlagen der Fahrbahn-Fahrzeug-Interaktionen eingegangen, die maßgeblich für das Verständnis von Bremsvorgängen sind. Abschließend werden die Funktionsweise eines Bremsregelsystems und die verschiedenen Arten der Virtualisierung von Steuergeräten illustriert.

2.3.1 Koordinatensystem

In dieser Arbeit werden die Koordinatensysteme gemäß der Grundnorm für Fahrdynamik von Straßenfahrzeugen ISO 8855 [14] verwendet. Das dort beschriebene fahrzeugfeste, kartesische Koordinatensystem besitzt den Ursprung im Schwerpunkt des Fahrzeugs und ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Die x -Achse verläuft entlang der Fahrzeuginnenachse. Die y -Achse ist senkrecht zur Längsachse sowie zur Fahrtrichtung angeordnet und zeigt nach links. Die z -Achse des rechtshändigen Koordinatensystems verläuft entlang der Fahrzeughochachse und zeigt nach oben.

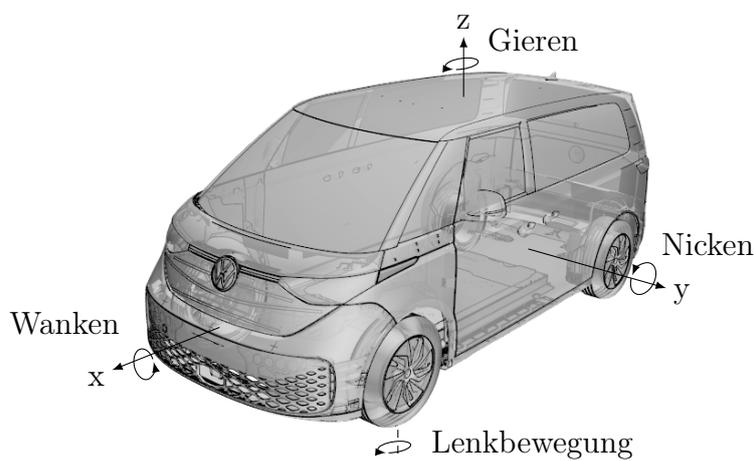


Abb. 2.4: Fahrzeugkoordinatensystem gemäß ISO 8855 [14] - Alle Rechte vorbehalten

Die Drehbewegung um die x -Achse wird als Wanken bezeichnet. Das Nicken, welches eine hohe Relevanz beim Anfahren und Abbremsen besitzt, kennzeichnet die Drehbewegung um die y -Achse. Die Drehbewegung um die z -Achse stellt die Gierbewegung dar. Die Lenkbewegung der einzelnen Räder wird ebenfalls durch diese Drehrichtung beschrieben. Zur Charakterisierung der Eigenschaften an den einzelnen Rädern, z.B. Drehwinkel oder Kräfte, werden die Positionen der Räder des Fahrzeugs durch spezifische Indizes gekenn-

zeichnet. Der Index v_L repräsentiert das vordere linke Rad, während v_R das vordere rechte Rad kennzeichnet. Analog wird das hintere linke Rad durch den Index h_L und das hintere rechte Rad durch den Index h_R definiert. Bei Zusammenfassung der Räder der Vorderachse wird der Index v verwendet und entsprechend der Index h bei der Beschreibung der Eigenschaften der Räder an der Hinterachse. [14, 44]

2.3.2 Grundlagen der Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion

Als Verbindungselement zwischen Fahrzeug und Straße sorgt der Reifen für die Kraftübertragung bei Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen eines Fahrzeugs. Die Kraftübertragung findet in der Reifenaufstandsfläche, dem sogenannten Reifenlatsch statt, der sich durch die elastische Verformung des Reifens aufgrund des Fahrzeuggewichts bildet. Die übertragene Kraft setzt sich dabei aus den drei Kraftkomponenten Reifenaufstandskraft F_z , -umfangskraft F_x und -seitenkraft F_y zusammen. [44, 63]

Die Reifenaufstandskraft beschreibt die Kraft zwischen Reifen und Fahrbahn, die senkrecht zur Fahrbahnoberfläche wirkt. Der Reifen verhält sich physikalisch betrachtet in vertikaler Richtung prinzipiell wie eine Luftfeder [63].

Die Umfangskraft wirkt in Längsrichtung und entsteht durch das Antreiben oder Bremsen des Rades. Bei der Kraftübertragung in Längsrichtung tritt zwangsläufig Schlupf auf. Der Schlupf S ist eine kinematische Größe, welche die Bewegung des Rades charakterisiert. In dieser Arbeit wird diese als

$$S_{A,B} = \frac{v - r_{dyn}\omega}{v^*} \quad (2.14)$$

definiert, wobei v die Fahrzeuggeschwindigkeit, ω die Raddrehzahl und r_{dyn} den dynamischen Radius kennzeichnet. Damit der Schlupfwert sowohl für den Antriebs- als auch für den Bremsfall zwischen 0 und 1 liegt, ist v^* für den Antriebsfall S_A als Umfangsgeschwindigkeit des Rades $r_{dyn}\omega$ definiert und für den Bremsfall S_B als Fahrzeuggeschwindigkeit v . Dies bedeutet, dass ein Schlupfwert von 1 im Antriebsfall durchdrehende und im Bremsfall blockierende Räder repräsentiert.

Die Ursache für das Entstehen des Schlupfes bei Längskräften lässt sich mithilfe des Bürstenmodells nach [3] erklären. Wie in Abbildung 2.5a dargestellt, werden die Profilblöcke des Reifens, die mit der Fahrbahn in Kontakt stehen, als Stäbchen einer Bürste idealisiert. Die Profilblöcke des Reifens, die den Latschbereich erreichen, werden durch die aus der Last des Rades resultierende Flächenpressung auf die Fahrbahn gedrückt und bauen durch Adhäsionskräfte eine kraftschlüssige Verbindung mit der Fahrbahn auf [70]. Durch die kraftschlüssige Verbindung und die einwirkende Längskraft entsteht eine Scherspannung τ . Nach Überschreiten der Haftgrenze μ_H beginnen die Profilblöcke des Reifens zu gleiten, sodass sich eine Gleitschubspannung in Abhängigkeit des Gleitreibungswerts μ_G einstellt (vgl. Abbildung 2.5b) [44].

Die resultierende Längskraft ergibt sich aus der Schubspannung und der Reifenaufstandsfläche A zu

$$F_x = \int_A \tau(x) dA. \quad (2.15)$$

Die Gleichung verdeutlicht, dass ohne Schubspannung und dem damit einhergehenden Schlupf keine Längskraft übertragen werden kann [3]. Der nichtlineare Zusammenhang von Schlupf und Längskraft ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Dabei lässt sich zwischen dem stabilen und dem instabilen Bereich unterscheiden. Im stabilen Bereich steigt die Längskraft bis zum Erreichen der maximal übertragbaren Kraft $F_{x,\max}$ an. Bei weiter steigendem Schlupf nimmt der Anteil an gleitenden Profilblöcken zu, bis sich bei vollständigem Schlupf die reine Gleitkraft $F_{x,\text{Gleit}}$ einstellt. Der genaue Verlauf sowie die maximal übertragbare Kraft variieren in Abhängigkeit der Beladungssituation sowie des Fahrbahnzustands. [44, 3, 70]

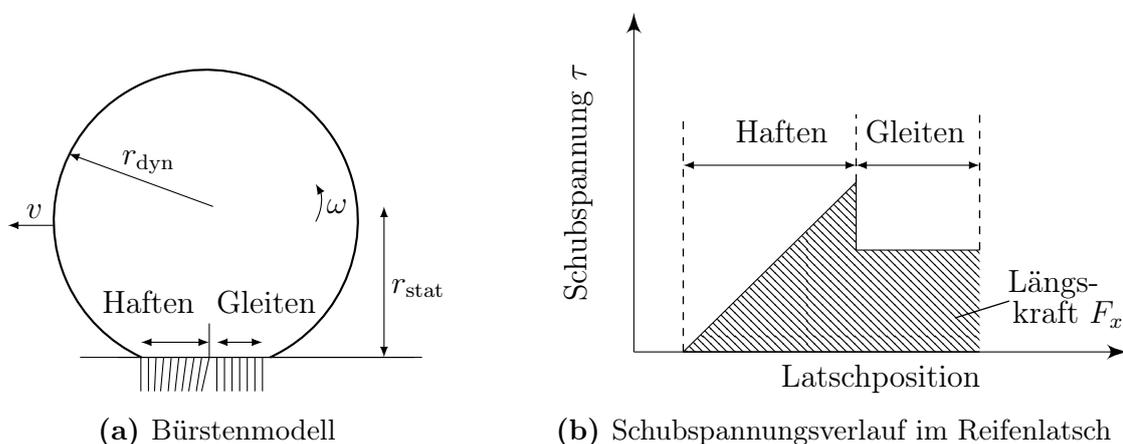


Abb. 2.5: Erklärung der Spannungssituation im Reifenlatsch in Anlehnung an [44]

Analog zur Längskraft ist zur Übertragung von Seitenkräften Schlupf quer zur Fahrtrichtung notwendig. Für die Seitenkraft wird als Maß für den seitlichen Schlupf der Schräglaufwinkel α gemäß

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_y}{v^*}\right) \quad (2.16)$$

definiert. Da die auftretenden Winkel für gewöhnlich klein sind, stellt dieser das Geschwindigkeitsverhältnis von Fahrgeschwindigkeit zu Geschwindigkeitskomponenten in y -Richtung v_y dar. [35, 44]

In vielen Fahrsituationen, beispielsweise bei einer Beschleunigung in der Kurve, treten sowohl Längs- als auch Seitenkräfte auf [44]. Um einen stabilen Fahrzustand zu garantieren, muss die resultierende Kraft F_{xy} gemäß dem Gesetz der Coulombschen Reibung die Bedingung

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq F_z \mu_H \quad (2.17)$$

einhalten. Beim Überschreiten der maximal übertragbaren Kraft befindet sich das Rad im

instabilen Bereich. In diesem Bereich können die Kräfte nicht mehr übertragen werden, was zu Einschränkungen oder zum Verlust der Fahrstabilität führen kann. Um dies zu vermeiden, sorgen Regelsysteme durch Anwendung von Antriebs- und Bremsmomenten für einen stabilen Kraftschluss und somit für die Sicherstellung von Fahrstabilität und Lenkfähigkeit. [8, 63]

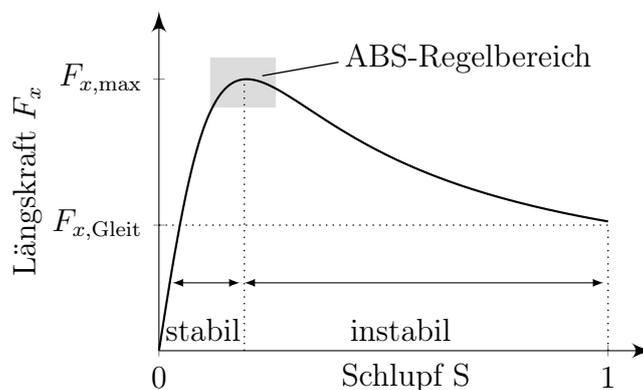


Abb. 2.6: Darstellung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Längskraft und Schlupf in Anlehnung an [63]

2.3.3 Bremsregelsysteme

Besonders bei starken Bremsungen besteht die Gefahr des Überschreitens der maximal übertragbaren Kraft und des Operierens im instabilen Bereich. Durch den hohen Bremsdruckaufbau neigen die Räder zum Blockieren. Dies geht mit einem hohen Schlupf und einer Reduzierung der maximal übertragbaren Kraft einher. Da dieser hochdynamische Vorgang nicht vom Fahrer verhindert werden kann, sind Antiblockiersysteme (ABS) ein integraler Bestandteil aller heutigen Serienfahrzeuge mit dem Ziel, die Lenkfähigkeit des Fahrzeugs während des Bremsvorgangs zu erhalten und ein Blockieren der Räder zu verhindern. [3]

Um dies zu bewerkstelligen, erkennt das ABS frühzeitig die Blockierneigung einzelner Räder und wirkt dieser durch Regulierung des Bremsdruckes im Radbremszylinder entgegen. Die prinzipielle Wirkweise ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Grundsätzlich lässt sich eine Bremsung mit ABS in die drei unterschiedlichen Betriebszustände Druckaufbau, Druckabbau und Druckhalten einteilen. Diese werden in Abhängigkeit von der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} , der daraus abgeleiteten Grenzschlupfgeschwindigkeit v_{schlupf} , der Radumfangsgeschwindigkeit v_{Rad} und der Radumfangsbeschleunigung a_{Rad} gewählt. Diese vier Größen erlauben es, den Rotationszustand jedes einzelnen Rades vollständig zu charakterisieren. [3, 8, 63]

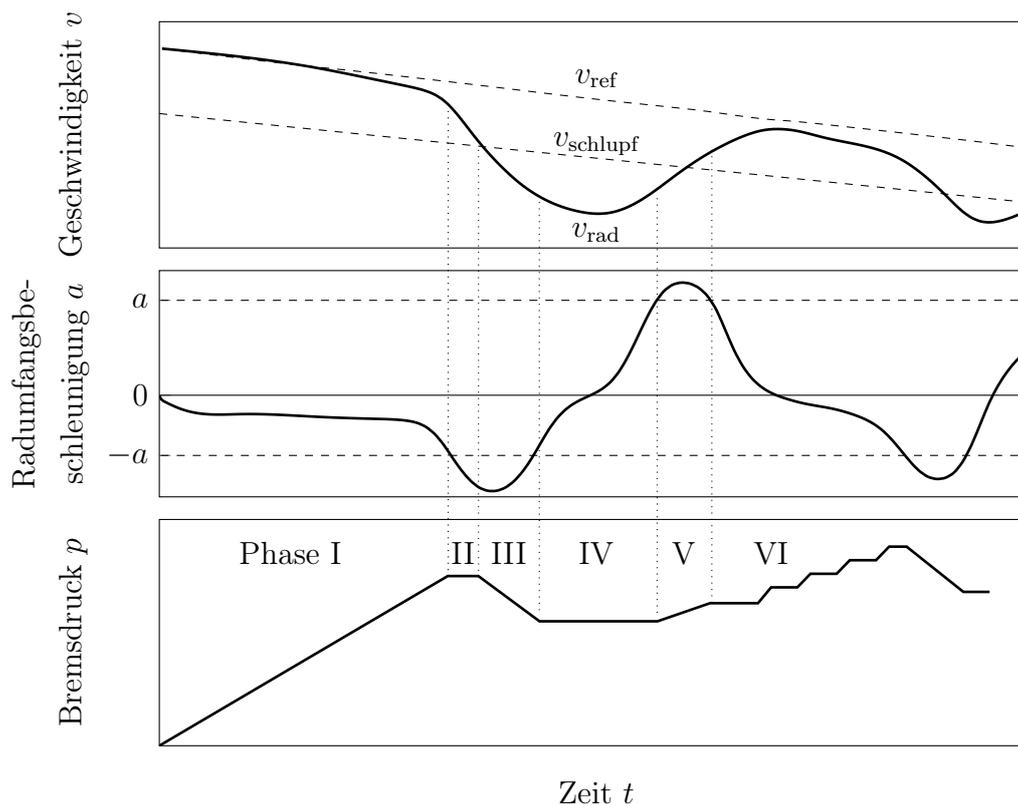


Abb. 2.7: Schematischer Ablauf einer Bremsung mit ABS-Eingriff in Anlehnung an [3]

Zu Beginn einer Bremsung wird durch die Bremspedalbetätigung der Druck im Hauptbremszylinder erhöht. Der Druck im Radbremszylinder, der für die Erzeugung des Bremsmomentes am Rad zuständig ist, steigt in der Bremsphase I analog zum Druck im Hauptbremszylinder an. Bei Unterschreitung einer vorgegebenen Radumfangsverzögerung $-a$ droht der Übergang in den instabilen Bereich. Folglich wird der Druck nicht weiter erhöht, sondern konstant gehalten (Phase II). Wenn sich auch bei konstantem Druck der Schlupfwert weiter erhöht und die aktuelle Radumfangsgeschwindigkeit die Grenzschlupfgeschwindigkeit unterschreitet, wird der Druck im Radbremszylinder reduziert (Phase III). Dies geht mit einer Erhöhung der Radumfangsbeschleunigung einher und sorgt für eine Stabilisation der Radgeschwindigkeit. Bei Erreichen des Schwellenwertes $-a$ wird die Reduzierung des Drucks beendet und das Druckniveau fixiert (Phase IV). Durch das Konstanthalten des Drucks auf dem niedrigen Druckniveau beginnt die Radbeschleunigung anzusteigen. Sobald die Schwelle der Radumfangsbeschleunigung $+a$ überschritten ist, wird der Bremsdruck bis zum Unterschreiten der Schwelle erhöht (Phase V). Um das vollständige Potential der Bremskraft zu nutzen und somit den Bremsweg zu minimieren, wird anschließend in Phase VI der Druck stufenweise bis zum erneuten Erreichen des instabilen Bereichs erhöht. [3, 8, 63]

Bei Erreichen des instabilen Bereichs beginnt der Bremsregelzyklus von neuem. Durch Anwendung dieses Verfahrens wird ein optimierter Bremsvorgang ermöglicht, welcher sich dem unbekanntem Haftmaximum möglichst annähert.

In realen Fahrzeugen wird die hier gezeigte Regelungsphilosophie von einer Vielzahl weiterer Regelungsmethoden überlagert, die einen höheren Fahrkomfort und eine höhere Fahr-sicherheit bei Sondermanövern gewährleisten sollen. Für vertiefende Ausführungen sei auf [3, 63] verwiesen.

2.3.4 Virtuelle Steuergeräte

Die Anzahl und Komplexität von Steuergeräten in Fahrzeugen ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Insbesondere autonome Fahrfunktionen erfordern vermehrt virtuelle Tests der Steuergeräte, da die hierfür erforderliche Menge an Steuergerätestests im Rahmen eines Fahrzeugprojektes nicht mithilfe von Testfahrten und Hardware-in-the-Loop-Systemen gewährleistet werden kann. Um dieser Herausforderung zu begegnen, werden vermehrt virtuelle Steuergeräte eingesetzt, welche eine umfangreiche Überprüfung und Absicherung einer Vielzahl von Funktionalitäten in einer rein virtuellen Umgebung ermöglichen. Je nach Anforderung können unterschiedliche Detaillierungsgrade bei der Virtualisierung eines Steuergerätes notwendig sein. [85, 18]

In [36] wurde eine Kategorisierung der Detaillierungsgrade der virtuellen Steuergeräte definiert, die sich als Standard etabliert hat und folglich in dieser Arbeit genutzt wird. Die Einteilung in fünf definierte Klassen erfolgt dabei in Abhängigkeit der Anzahl der abgebildeten Schichten des tatsächlichen Steuergerätes. Grundsätzlich besteht jedes Steuergerät, das den AUTOSAR-Standard [22] (kurz für Automotive Open System Architecture) erfüllt, wie in Abbildung 2.8 dargestellt, aus den Schichten Applikations-, Basissoftware- und Hardwareschicht sowie einer Laufzeitumgebung (engl. `runtime environment` oder RTE). Die Applikationsschicht stellt den hardwareunabhängigen Softwareteil dar, in welchem die Regelungsalgorithmen und die Anwendungsfunktionalität in verschiedenen Softwarekomponenten realisiert sind [36]. Das Betriebssystem, die Speicherverwaltung und andere hardwareabhängige Softwarekomponenten sind in der Basissoftwareschicht zusammengefasst. Die Kommunikation zwischen der Basissoftwareschicht und der Applikationsschicht sowie die Kommunikation zwischen Softwarekomponenten der Applikationsschicht werden mithilfe der Laufzeitumgebung realisiert. Die einzelnen Kategorisierungen virtueller Steuergeräte sind mit aufsteigendem Detaillierungsgrad wie folgt definiert:

1. Virtuelles Steuergerät – Level 0

In einem virtuellen Level 0-Steuergerät wird weder Originalcode der Applikations-, noch der Basissoftwareschicht verwendet. Hierbei werden nur Verhaltensmodelle zur Überprüfung der verwendeten Regelalgorithmen genutzt. Die Eingangssignale sind dabei nicht an die Takt- und Formatanforderungen des echten Steuergerätes gebunden, wodurch eine Integration vereinfacht wird, aber auch ein abweichendes Regelverhalten entstehen kann.

2. Virtuelles Steuergerät – Level I

Ein virtuelles Level I-Steuergerät enthält den Originalcode für die Applikations-

schicht und bildet somit die tatsächlichen Regelalgorithmen ab. Da keine Abbildung der tatsächlichen Kommunikationsschnittstellen stattfindet, kann die Kommunikation der Eingangs- und Ausgangsgrößen ohne die Verwendung der realen Kommunikationsprotokolle wie CAN oder Ethernet erfolgen.

3. Virtuelles Steuergerät – Level II

Ein virtuelles Level II-Steuergerät enthält neben dem Originalcode für die Applikationsschicht auch Anteile aus der Basissoftware. Dies ermöglicht eine realistische Abbildung der Kommunikation von Eingangs- und Ausgangsgrößen auf Bus- und Netzwerkebene. Ein virtuelles Level II-Steuergerät kann somit beispielsweise zur Untersuchung der Funktionsweise der realen Regelalgorithmen und deren Kommunikation zur Fehlerdiagnose genutzt werden.

4. Virtuelles Steuergerät – Level III

Ein virtuelles Level III-Steuergerät enthält den kompletten Code der Applikations- und der Basissoftwareschicht. Die hardwareabhängigen Bestandteile der Basissoftware sind an die Zielsimulationsumgebung angepasst. Dieser Detaillierungsgrad kann zum Test aller hardwareunabhängigen Bestandteile eines Steuergerätes genutzt werden.

5. Virtuelles Steuergerät – Level IV

Ein virtuelles Level IV-Steuergerät enthält alle Softwarekomponenten der Applikations- und der Basissoftwareschicht, kompiliert für das reale Steuergerät. Dieses virtuelle Steuergerät besitzt den höchstmöglichen Detaillierungsgrad und kann auf dem tatsächlichen Steuergerät oder auf emulierten Steuergeräten angewendet werden.

Zur Übersicht sind in Tabelle 2.1 die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Level zusammengefasst. Für die Berücksichtigung der Steuergeräte bei der Lastdatenermittlung, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wird, ist lediglich die korrekte Funktionsweise der Regelsystemalgorithmen relevant. Folglich sind virtuelle Steuergeräte bis zu Level II ausreichend. Der steigende Detaillierungsgrad virtueller Steuergeräte höheren Levels bietet keinen Mehrwert, sondern stellt lediglich einen höheren Aufwand zur Bereitstellung aller notwendigen Eingangsgrößen für eine fehlerfreie Ausführung dar.

Tabelle 2.1: Übersicht der Kategorisierung virtueller Steuergeräte

	Anwendungsschicht	Basissoftwareschicht
Level 0	Nachbildung	Nicht vorhanden
Level I	Originalcode	Nicht vorhanden
Level II	Originalcode	Angepasster Code
Level III	Originalcode	Originalcode
Level IV	Binärer Originalcode	Binärer Originalcode

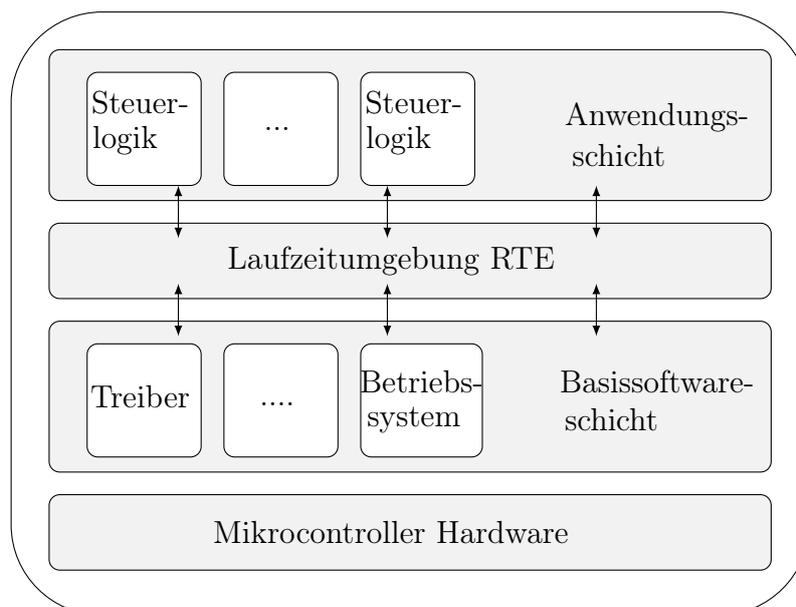


Abb. 2.8: Architektur eines Steuergerätes gemäß AUTOSAR-Standard in Anlehnung an [22, 36]

2.4 Künstliche neuronale Netze

Der steigende Bedarf an Methodiken zur Auswertung und Verarbeitung der immer größer werdenden Datenmengen hat die Entwicklung künstlicher neuronaler Netze in den letzten Jahren deutlich vorangetrieben. Dank ihrer Fähigkeit, komplexe Zusammenhänge und Aufgabenstellungen zu bearbeiten, werden neuronale Netze aktuell im Kontext verschiedenster Anwendungsmöglichkeiten diskutiert. [77]

Auch in dieser Arbeit sollen die Einsatzmöglichkeiten neuronaler Netze für die Integration von aktiven Regelsystemen beleuchtet werden. Dazu werden im folgenden Abschnitt die zum Verständnis notwendigen Grundlagen und die verwendeten Netzwerkarchitekturen vorgestellt. Für umfassendere Ausführungen sei auf [77, 39, 21, 1] verwiesen, die die Grundlage der folgenden Erläuterungen darstellen.

2.4.1 Aufbau

Künstliche neuronale Netze sind eine mathematische Nachbildung eines menschlichen Nervensystems. Sie bestehen grundsätzlich aus zwei Bausteinen: den Neuronen und den Verbindungen zwischen den Neuronen [39]. Der Aufbau eines künstlichen Neurons gemäß McCulloch [53] ist schematisch in Abbildung 2.9 dargestellt. Ein Neuron erhält die Ausgaben seiner Vorgängerneuronen (Index 1 bis n) unter Berücksichtigung von Gewichtungen w als Eingabe. Zusätzlich können weitere konstante Eingabewerte, die sogenannten Bias-Werte b , den Ausgabewert des Neurons beeinflussen. Eine nichtlineare Aktivierungsfunktion nutzt schließlich die gewichteten Eingabewerte unter Berücksichtigung der Bias-

Werte, um den Ausgabewert des Neurons zu bestimmen. Die Ausgabe eines Neurons ist folglich durch folgende Gleichung gegeben

$$y = \varphi \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i + b_i \right). \quad (2.18)$$

Für die Aktivierungsfunktion sind die Sigmoid- oder die Tangens hyperbolicus-Funktion üblich. Beide Aktivierungsfunktionen sorgen für eine Normalisierung des Ausgabewerts. Die Sigmoid-Funktion besitzt einen Wertebereich von 0 bis 1, während die Tangens hyperbolicus-Funktion im Wertebereich von -1 bis 1 definiert ist. [77, 1]

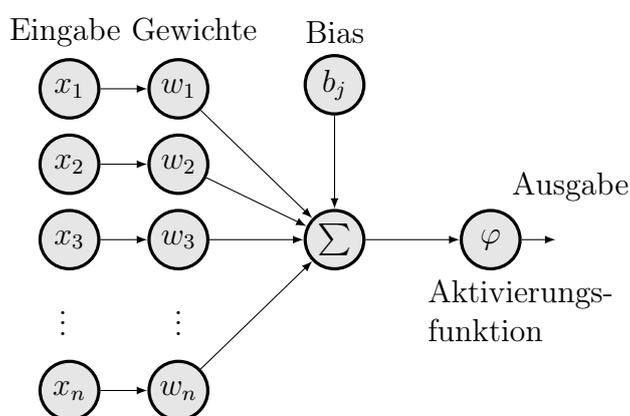


Abb. 2.9: Schematische Darstellung der Struktur eines künstlichen Neurons nach McCulloch [53]

Die einzelnen Neuronen sind in Schichten angeordnet. Die Eingangswerte für das neuronale Netz werden in der Eingabeschicht (engl. input layer) verarbeitet. Das Ergebnis des neuronalen Netzes wird über die Neuronen der Ausgabeschicht (engl. output layer) mit der Außenwelt kommuniziert. Zwischen der Ein- und Ausgabeschicht können unterschiedlich viele versteckte Schichten existieren (engl. hidden layer), welche keinerlei Verbindungen mit der Außenwelt aufweisen. [39]

Die Neuronen der einzelnen Schichten sind miteinander verbunden. Neuronale Netze lassen sich je nach Verbindung der Schichten und der Neuronen in zwei Klassen einteilen. Zum einen existieren die vorwärts gerichteten Netze (engl. Feedforward Neural Networks), bei denen der Informationsfluss ausschließlich von der Eingangsschicht hin zur Ausgabeschicht verläuft. Es liegen also weder Schleifen, noch Rückkopplungen bei den Verbindungen der neuronalen Netze vor. Zum anderen gibt es rückgekoppelte neuronale Netze (engl. Recurrent Neural Networks), die Schleifen oder Rückkopplungen zu vorherigen Schichten ermöglichen. Diese Rückkopplungen erlauben es, Informationen aus einem vorangegangenen Abschnitt zu verarbeiten und eignen sich folglich insbesondere für die Verarbeitung von Zeitreihen. [10, 77]

2.4.2 Feedforward Neural Networks

Die einfachste Form vorwärts gerichteter, neuronaler Netze sind die sogenannten mehrschichtigen Perzeptren (kurz: MLP vom engl. Multilayer Perceptrons). In Abbildung 2.10 ist ein Beispiel für ein vorwärts gerichtetes, neuronales Netz mit zwei versteckten Schichten mit jeweils m Neuronen dargestellt.

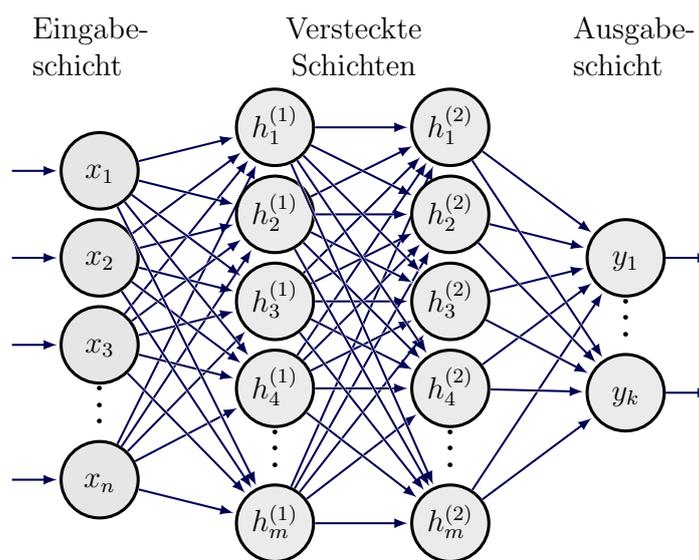


Abb. 2.10: Exemplarischer Aufbau eines Feedforward Neural Network in Anlehnung an [77]

Charakteristisch für MLPs ist, dass sie nur Verbindungen zwischen direkt benachbarten Schichten aufweisen. Jede Schicht ist dabei vollständig mit den benachbarten Schichten verbunden. Dies bedeutet, dass jedes Neuron in einer vorwärts gerichteten Netzarchitektur Informationen von allen Neuronen der vorherigen Schicht erhält und diese an alle Neuronen der nachfolgenden Schicht weitergibt. Die einzelnen Schichten werden daher voll vernetzte Schichten (kurz: FC-Schicht vom engl. Fully Conected Layer) genannt. [77, 21] Durch die Überlagerung der nicht-linearen Aktivierungsfunktion jedes Neurons können beliebige nicht-lineare Funktionen approximiert werden. MLPs sind daher besonders für das eigenständige Finden von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Größen und die Approximation von Funktionen geeignet. Im Gegensatz zu klassischen Regressionstechniken bieten sie den Vorteil, dass keine Kenntnis über den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen erforderlich ist. [77, 10]

2.4.3 Recurrent Neural Network

Aufgrund der fehlenden Schleifen und Rückkopplungen bei den Neuronenverbindungen nutzen MLPs ausschließlich Informationen der aktuellen Eingabe, um Ausgangswerte vorherzusagen. Daher sind MLPs nicht in der Lage, langfristige Trends und Zusammenhänge

zu berücksichtigen.

Für das Erkennen solcher Zusammenhänge sind insbesondere die sogenannten Long Short-Term Memory Netze (LSTM) geeignet. Diese stellen eine Unterkategorie der rückgekoppelten neuronalen Netze dar und werden insbesondere für die Vorhersage von Zeitreihen und anderen zeitabhängigen Phänomenen genutzt. [75]

Die LSTM-Neuronenstruktur ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Diese ist deutlich komplexer als das bereits beschriebene klassische McCulloch-Modell (vgl. Abbildung 2.9). Ein LSTM-Neuron besitzt für den Zeitpunkt t im Vergleich zum klassischen McCulloch-Neuron neben dem Ausgabewert \mathbf{h}_t zusätzlich den Zellzustand \mathbf{c}_t . Dieser Zellzustand ermöglicht das Speichern und Nutzen von Informationen vorheriger Zeitschritte. Der Zellzustand kann mithilfe von drei Gates aktualisiert, gelöscht oder gespeichert werden. Für jedes Gate existieren konstante Bias-Werte \mathbf{b} , Wichtungen der Eingangswerte \mathbf{W} und sogenannte rekursive Wichtungen \mathbf{R} , die die Informationen aus früheren Zeitschritten gewichten. [75, 81]

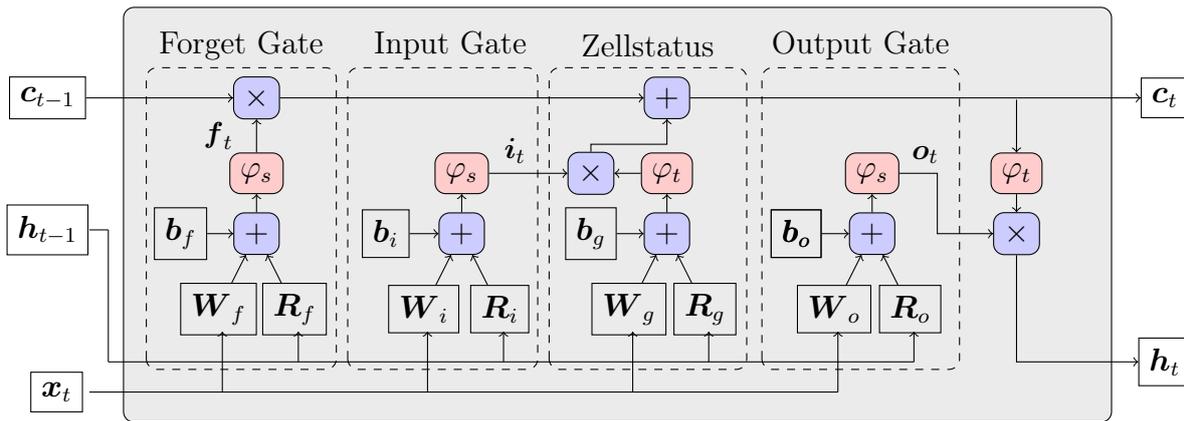


Abb. 2.11: Darstellung der Struktur einer LSTM-Zelle

Mithilfe des Forget-Gates \mathbf{f} wird bestimmt, welche Werte des vorherigen Zellzustands gelöscht und welche beibehalten werden sollen. Das Forget-Gate wird mithilfe der Eingangswerte des Neurons \mathbf{x}_t und der Ausgangswerte des Neurons des vorherigen Zeitschrittes \mathbf{h}_{t-1} gemäß

$$\mathbf{f}_t = \varphi_s(\mathbf{W}_f \mathbf{x}_t + \mathbf{R}_f \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_f) \quad (2.19)$$

bestimmt. φ_s kennzeichnet dabei die Nutzung des Sigmoids als Aktivierungsfunktion. Im nächsten Schritt wird durch das Input-Gate \mathbf{i}_t , das mit

$$\mathbf{i}_t = \varphi_s(\mathbf{W}_i \mathbf{x}_t + \mathbf{R}_i \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_i) \quad (2.20)$$

bestimmt wird, entschieden, welche neuen Informationen des aktuellen Zeitschrittes für den neuen Zellstatus relevant sind und gespeichert werden. Auf Basis der Informationen

des Forget-Gates und des Input-Gates kann anschließend der neue Zellstatus gemäß

$$\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \cdot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \cdot \varphi_t(\mathbf{W}_g \mathbf{x}_t + \mathbf{R}_g \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_g) \quad (2.21)$$

bestimmt werden, wobei φ_t für die Tangens hyperbolicus-Funktion steht. Das Output-Gate \mathbf{o}_t bestimmt, wie groß der Einfluss des gespeicherten, aktuellen Zellstatus für den Ausgabewert ist. Dieser bestimmt sich durch

$$\mathbf{o}_t = \varphi_s(\mathbf{W}_o \mathbf{x}_t + \mathbf{R}_o \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_o). \quad (2.22)$$

Mit dem Output-Gate und dem gespeicherten Zellstatus kann so der Ausgabewert durch

$$\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t \cdot \varphi_t(\mathbf{c}_t) \quad (2.23)$$

bestimmt werden.

2.4.4 Trainingsprozess

Zur Bestimmung geeigneter Wichtungen und Bias-Werte ist ein Trainieren des neuronalen Netzwerkes notwendig. Dabei wird zwischen überwachtem und unüberwachtem Lernen unterschieden. Für Regressionsaufgaben wird ausschließlich überwachtes Lernen angewendet. Hierbei liegen für die Trainingsdaten sowohl die Ein-, als auch die gewünschten Ausgabewerte vor, sodass während des Trainingsprozesses durch Anpassung der Wichtungen und Bias-Werte der logische Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabewerten identifiziert werden muss. [77, 10]

Der Trainingsprozess der neuronalen Netzparameter ist ein Optimierungsproblem. Ziel der Optimierung ist die Minimierung einer Verlustfunktion durch Variation der Wichtungen und Bias-Werte. Für die Verlustfunktion wird für gewöhnlich die Abweichung des mittleren Fehlerquadrates zwischen dem tatsächlichen Ausgabewert und dem vom Netzwerk vorhergesagten Ausgabewert genutzt. [77]

Zur Minimierung der Verlustfunktion und somit zum Training des neuronalen Netzes wird beim überwachten Lernen i. A. der Backpropagation-Algorithmus angewendet. Die Grundidee dieses Algorithmus ist, dass der Gesamtfehler der Verlustfunktion gegen den tatsächlichen Informationsfluss im neuronalen Netz zurückpropagiert wird, um die Gewichte des Netzes anzupassen. [90]

Zu Beginn dieses Algorithmus werden die Wichtungen der Verbindungen und die Bias-Werte zufällig initialisiert. Anschließend werden die folgenden drei Schritte des Algorithmus bis zum Erreichen der gewünschten Vorhersagegüte wiederholt:

1. Bestimmung des Gesamtfehlers

Für die Trainingsdaten wird im ersten Schritt die Abweichung zwischen dem tat-

sächlichen Ausgabewert und dem durch das neuronale Netz vorhergesagten Wert bestimmt. Zur Bestimmung dieses Fehlers Ψ wird eine vorgegebene Verlustfunktion genutzt. Bei der Anwendung des Backpropagation-Algorithmus wird zwischen dem Online-Lernen sowie dem Batch-Lernen unterschieden. Beim Online-Lernen wird nach Auswertung eines Trainingsdatensatzes der Lernprozess mit Schritt 2 (Bestimmung des lokalen Fehlergradienten) und Schritt 3 (Aktualisierung der Netzwerkgewichte) fortgesetzt. Durch das häufige Aktualisieren der Netzwerkgewichte birgt das Online-Lernen die Gefahr, das globale Minimum zu überspringen. Beim Batch-Lernen hingegen werden die nächsten Schritte erst nach Durchlaufen aller Trainingsdaten durchgeführt. Dieses Vorgehen hat die Tendenz zu langen Rechenzeiten, da der Gradient die gesamten Trainingsdaten berücksichtigen muss. Um die Schwächen der beiden vorgestellten Varianten zu eliminieren, kombiniert das sogenannte Minibatch-Lernen das Online-Lernen und das Batch-Lernen. Hierbei wird die Anpassung der Gewichte nach einer definierten Anzahl von Trainingsdaten durchgeführt. Diese Anzahl nennt sich Minibatch-Größe. [90, 77, 21]

2. Bestimmung des lokalen Fehlergradienten

Auf Basis des Gesamtfehlers werden die lokalen Fehlergradienten δ für jedes Neuron bestimmt. Die Bestimmung des Gradienten verläuft gegen die eigentliche Informationsflussrichtung des neuronalen Netzes. Der Fehlergradient für die Ausgabeschicht wird für das k -te Neuron aus dem Gesamtfehler und der Ableitung der Aktivierungsfunktion nach dem Ausgabewert gemäß

$$\delta_k(n) = \varphi'(y_k(n))\Psi(n) \quad (2.24)$$

bestimmt, wobei n den aktuellen Iterationsschritt kennzeichnet. Nach Bestimmung der Fehlergradienten für alle Neuronen der Ausgabeschicht können die versteckten Schichten bestimmt werden. Der Fehlergradient bestimmt sich für ein j -tes Neuron einer versteckten Schicht aus der gewichteten Summe der Fehlergradienten der m verbundenen Zellen der nachfolgenden Schicht und der Ableitung der Aktivierungsfunktion nach dem Ausgabewert

$$\delta_j(n) = \varphi'(y_k(n)) \sum_{i=1}^m \delta_i(n) w_i(n). \quad (2.25)$$

Gleichung 2.25 verdeutlicht das Rückwärtspropagieren des Fehlers: Für jeden Fehlergradienten werden die Fehlergradienten der nachfolgenden Schicht benötigt, sodass die Ausbreitung des Fehlers gegen die Informationsflussrichtung beginnend von der Ausgabeschicht hin zur Eingabeschicht propagiert wird. [90, 77]

3. Aktualisierung der Netzwerkgewichte

Mithilfe der lokalen Fehlergradienten lassen sich die Netzwerkgewichte für den nächsten Iterationsschritt aktualisieren:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \eta \delta_i(n) \quad (2.26)$$

Dabei kennzeichnet η die Lernrate, die das Maß für die Aktualisierungsgeschwindigkeit der Netzwerkgewichte darstellt. Grundsätzlich gilt für die Lernrate $0 < \eta \leq 1$. Sie muss für jedes Training individuell angepasst werden. Typische Werte liegen bei $\eta = 0.3$. [90, 77, 21]

Sowohl die Netzwerkarchitektur, als auch die Trainingsparameter, beispielsweise die Batch-Size und die Lernrate, bleiben während des Trainings konstant und müssen im Vorhinein definiert werden. Diese Parameter werden als Hyperparameter bezeichnet. Da die Wahl der Hyperparameter entscheidend für die Vorhersagequalität des neuronalen Netzes ist, diese aber nicht auf analytische Weise bestimmt werden können, werden die geeigneten Hyperparameter im Rahmen einer Optimierung bestimmt.

Kapitel 3

Fahrzeugmodellierung

Je nach Anwendungsfall existieren verschiedene Modellierungsansätze zur Fahrzeugsimulation. Für die Analyse der Querdynamik eines Fahrzeugs ist häufig ein einfaches, lineares Einspurmodell ausreichend, bei dem die Räder einer Achse zur Beschreibung der durch die Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion auftretenden Kräfte zu einem Rad zusammengefasst werden [44]. Für die Analyse von betriebsfestigkeitstechnischen Fragestellungen sowie die Identifizierung von Lastdaten hat sich die Nutzung von MKS-Modellen etabliert [3]. Diese Modellierung ermöglicht unter Berücksichtigung von nichtlinearen Anregungen die Bestimmung von Schnittkräften an den einzelnen Bauteilen. Da zur Abbildung der Regelsystemalgorithmen eine Vielzahl von Fahrzustandsgrößen notwendig ist, die nur in Gesamtfahrzeugsimulationen vorhanden sind, befasst sich dieses Kapitel mit der Vorstellung und Validierung des in dieser Arbeit verwendeten MKS-Gesamtfahrzeugmodells sowie der expliziten Beschreibung der Regelsystemmodellierung.

3.1 Gesamtfahrzeugaufbau

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik wird anhand eines rein batterieelektrischen Fahrzeugs der Marke Volkswagen illustriert. In Abbildung 3.1 ist der Fahrwerksaufbau dargestellt. Das Fahrzeug verfügt über eine McPherson-Vorderachse und eine Fünflenkerhinterachse. Zwischen den Achsen ist im Unterboden die Hochvoltbatterie verbaut. Wie für batterieelektrische Fahrzeuge typisch, handelt es sich um einen Hinterradantrieb, bei dem eine permanenterregte Synchronmaschine an der Hinterachse verbaut ist.

Das Gesamtfahrzeugmodell besteht aus verschiedenen Baugruppen, die durch ihre Masse sowie ihre Trägheitseigenschaften charakterisiert und beschrieben werden. Basierend auf der Achstopologie werden das Fahrwerk und die einzelnen Fahrzeugkomponenten durch starre Körper modelliert. Ein Starrkörpermodell mit Ersatzsteifigkeiten für Torsionsbeanspruchungen wird so beispielsweise für die Modellierung der Karosserie genutzt. Ebenso werden für die Antriebswellen Starrkörper inklusive Torsionsersatzsteifigkeit verwendet.

Das zweistufig übersetzte Eingangsgetriebe wird mittels Kennlinien dargestellt. Auch die Abbildung der Motorcharakteristiken erfolgt auf Basis von Kennlinien. Zur Interaktion und Verbindung der einzelnen Komponenten werden Bindungs- und Kopplungselemente eingesetzt. Zur Modellierung der Motorlagerung werden so beispielsweise Gummilagerelemente verwendet.

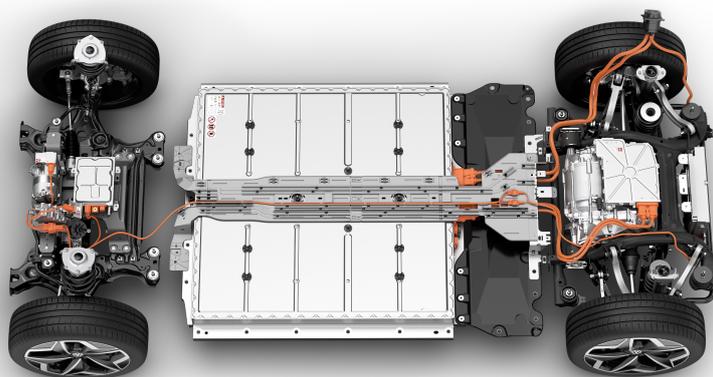


Abb. 3.1: Achstopologie des verwendeten Fahrzeuges - Alle Rechte vorbehalten

Die Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion wird durch ein Reifenmodell abgebildet, das als Cosimulation eingebunden wird. Wie in [45] vorgeschlagen, wird für die in dieser Arbeit durchgeführten Betriebsfestigkeitssimulationen das physikalisch-motivierte Flexible Structure Tire-Model (FTire) [24] verwendet. Das FTire-Model erlaubt die Abbildung der elastischen Verformung des Reifengürtels. Dazu wird der Reifengürtel als flexible Schwingerkette einzelner Massepunkte modelliert, welche durch 140 bis 180 nichtlineare Feder-Dämpfer-Elemente miteinander verbunden sind [17]. Neben einer detaillierten Abbildung des Reifens ist weiterhin die Modellierung der Straße für eine realistische Darstellung der Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion notwendig. In der Arbeit werden hierzu digitalisierte Straßen im Curved Regular Grid-Format (CRG) [62] verwendet. Dieses Straßenformat ermöglicht bei einer Auflösung von einem Zentimeter in der Straßenebene und einer Auflösung von zwei Millimetern für die zugehörige Höheninformation eine detaillierte und effiziente Auswertung der Kontaktpunkte im Reifenlatsch [62].

Zur Simulation von Gesamtfahrzeugmanövern ist des Weiteren ein Fahrermodell notwendig, welches die definierten Geschwindigkeits- und Trajektorievorgaben realisiert. Dies wird durch einen Geschwindigkeits- und einen Kursregler umgesetzt, welche die Pedalstellungen und Lenkwinkel bestimmen. Um numerische Robustheit sowie eine technisch

einfache Lösung zu gewährleisten, werden beide Regler als Proportionalregler mit Tiefpasseigenschaft gemäß der linearen Differentialgleichung

$$\dot{y}(t) = \frac{1}{\zeta} (P\delta_s - y) \quad (3.1)$$

modelliert, wobei \dot{y} die zeitliche Ableitung der Pedal- bzw. Lenkradstellung, δ_s die Regelabweichung zwischen Soll- und Ist-Wert für die zu regelnde Größe, ζ eine Zeitkonstante und P einen Proportionalitätsfaktor darstellen. Die Tiefpasseigenschaften des Reglers werden bei Betrachtung der analytischen Lösung der Differentialgleichung für die Stellgröße $y(t)$ deutlich

$$y(t) = \frac{P}{\zeta} \int_0^t \delta_s e^{-\frac{t-s}{\zeta}} ds. \quad (3.2)$$

Für hochfrequente Änderungen und somit vergleichsweise große Werte für die Zeitkonstante strebt die Stellgröße gegen null. Für langsame Änderungen der Regelabweichung strebt die Änderung der Stellgröße gegen null, was gemäß Gleichung 3.1 einem gewöhnlichen Proportionalregler mit

$$y(t) = P\delta_s \quad (3.3)$$

entspricht. Diese Eigenschaften des Reglers ermöglichen es, hochfrequente Änderungen, beispielsweise Kursabweichungen, die durch unebene Fahrbahntopologien verursacht werden, zu vernachlässigen. Dies führt zu einem realistischeren und stabileren Proportionalregler.

3.2 Validierung

Zur effizienten und umfassenden Validierung der zentralen Modellkomponenten des MKS-Gesamtfahrzeugmodells werden, wie in [2] empfohlen, sowohl virtuelle Prüfstands-, als auch Fahrmanövermessungen genutzt. Für die Lastdatenbestimmung von Fahrwerkskomponenten sind die Validierung und Plausibilisierung der Achs- und Elastokinematik von besonderer Bedeutung. Diese Eigenschaften werden mit einem virtuellen Kinematics and Compliance-Prüfstand (K&C) ermittelt und mit konstruktiven Vorgaben zur Validierung abgeglichen. Bei einem K&C-Prüfstand werden über Radersatzsysteme, bei einem starr fixierten Fahrzeugaufbau, Kraft- und Wegvorgaben an der Radmitte in das Fahrwerk eingeleitet, sodass die kinematischen und elastokinematischen Eigenschaften der Radaufhängung beurteilt werden können.

In Abbildung 3.2 sind die Ergebnisse für das gleichzeitige Durchfedern von Vorder- und Hinterachse zu sehen. Hierbei wird die notwendige Kraft zur Durchfederung der Achse über der Radauslenkung dargestellt. Es wird der dafür typische Kraftverlauf sichtbar. Dieser zeichnet sich bei kleinen Auslenkungen durch ein lineares Verhalten, bedingt durch die Aufbaufeder, sowie ein progressives Verhalten bei großen Aus- bzw. Einfederungen durch

die dann aktiven Druck- und Zugpuffer aus. Zusätzlich zu den virtuellen Prüfergebnissen sind die vorgegebenen konstruktiven Werte für bestimmte Beladungs- und Belastungssituation eingezeichnet, die bestätigen, dass die Achs- und Elastokinematik des Modells gut mit den realen Vorgaben übereinstimmt.

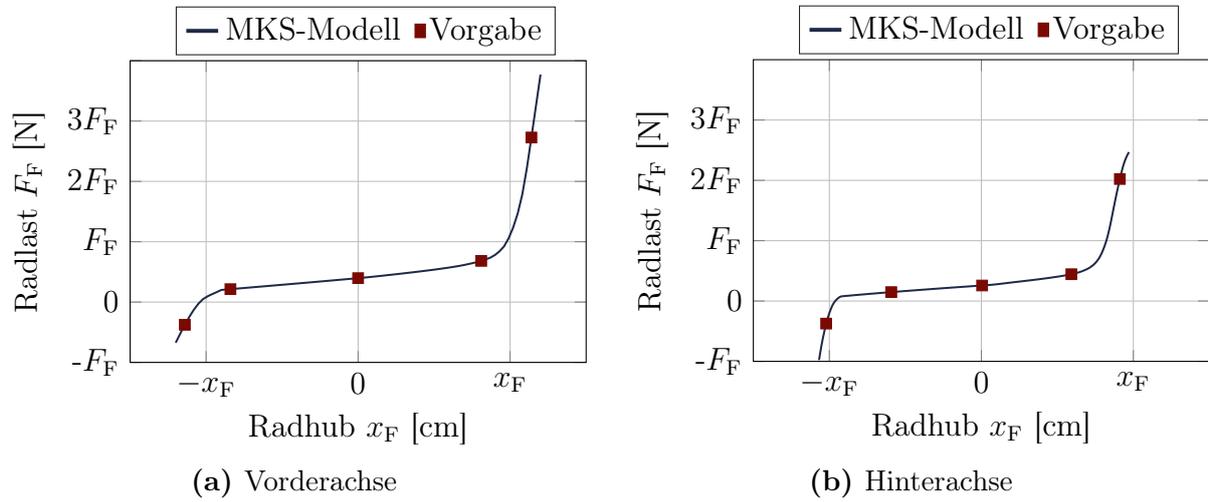


Abb. 3.2: Ergebnisse des gleichseitigen Durchfederns auf dem virtuellen K&C-Prüfstand

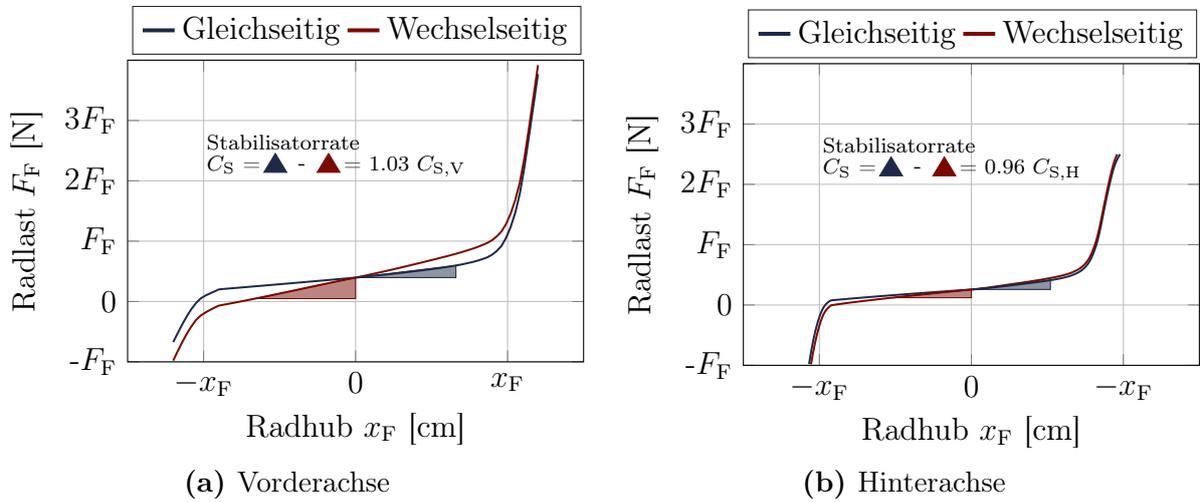


Abb. 3.3: Ergebnisse des gegenseitigen Durchfederns auf dem virtuellen K&C-Prüfstand

Zur Bewertung der Funktionsweise und Parametrierung des Stabilisators wird die wechselseitige Steifigkeit durch gegenseitiges Einfedern validiert. Dabei soll die Federrate des Stabilisators C_S , welche sich gemäß

$$C_S = \frac{F_{F, o}}{x_{F, o}} - \frac{F_{F, p}}{x_{F, p}} \quad (3.4)$$

aus der Differenz zwischen den Gradient von Radlast über Radhub $\frac{F_F}{x_F}$ von gegenseitigem (Index o) und gleichzeitigem Durchfedern (Index p) ergibt, mit experimentellen Daten übereinstimmen. In Abbildung 3.3 sind die zur Bestimmung der Stabilisatorrate notwendigen Kraftverläufe für gleich- und gegenseitiges Durchfedern für die Vorder- und Hinterachse dargestellt. Die Abweichungen von den Zielstabilisatorraten $C_{S,V}$ an der Vorderachse und $C_{S,H}$ an der Hinterachse liegen bei 3 % bzw. 4 %, sodass auch die akkurate Abbildung von wechselseitigen Achsbewegungen durch das Modell gegeben ist.

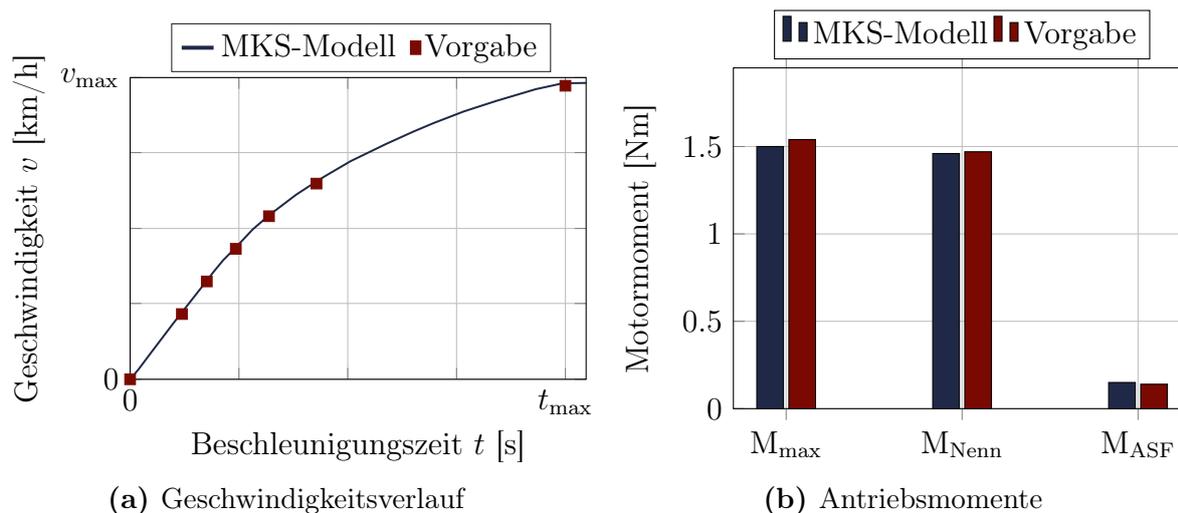


Abb. 3.4: Gegenüberstellung von relevanten Kennzahlen für Antriebsstrangparametrierung

Zur Validierung der Antriebsstrangparametrierung, des Beschleunigungsverhaltens und der Bedatung der Fahrwiderstände sind in Abbildung 3.4 die Ergebnisse einer Vollbeschleunigung vom Stillstand bis zur Maximalgeschwindigkeit dargestellt. In Abbildung 3.4a ist der resultierende Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit zu sehen. Durch die geringe Abweichung von den vorgegebenen Zielwerten ist ein realistisches Beschleunigungsverhalten des MKS-Modells bestätigt. Neben dem Gesamtbeschleunigungsverhalten sind in Abbildung 3.4b relevante, charakteristische Motormomente gegenübergestellt, die besonders für die Gelenkwellen- und Aggregatlagerbelastungen relevant sind. Hierbei ist erkennbar, dass sowohl das Antriebsstrangschutzmoment M_{ASF} , als auch das sich einstellende Motormoment M_{Nenn} und das Überschwingverhalten, quantifiziert durch M_{max} , den Vorgaben entsprechen, sodass auch die Motorparametrierung eine realistische Abbildung der Motordynamik erlaubt.

Ergänzend zur vorgestellten, grundsätzlichen Validierung des Fahrzeugmodells und dessen kinematischer Funktionsfähigkeit wird die Eignung des Gesamtfahrzeug- und Reifenmodells hinsichtlich der Auswertung von Bremsmanövern explizit in Kapitel 6.1 behandelt.

3.3 Regelsystemmodellierung

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen werden mithilfe eines Bremsregelsystems durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein vom Regelsystemlieferanten bereitgestelltes, virtuelles Seriensteuergerät. Dadurch ist sichergestellt, dass die tatsächliche Regelalgorithmik exakt wiedergegeben wird und dass Abweichungen durch Modellierungsunterschiede bei der Algorithmik ausgeschlossen werden können. Wie für vom Zulieferer bereitgestellte Steuergeräte üblich, liegt das virtuelle Steuergerät in kompilierter Form vor, sodass einerseits das Fachwissen sowie die technologischen Innovationen des Zulieferers gewahrt bleiben und andererseits die tatsächlich im Fahrzeug Anwendung findende Software für Untersuchungen genutzt werden kann [8].

Das virtuelle Regelsystemmodell liegt als Functional Mock-up Unit (FMU) gemäß dem Functional Mock-up Interface-Standard (FMI) vor. Der tool- und plattformübergreifende FMI-Standard etabliert sich durch den steigenden Bedarf an effizienter und effektiver, interdisziplinärer Zusammenarbeit als ein zunehmend verwendetes Format in der Automobilindustrie [6]. Das zugehörige FMU-Regelmodell besteht grundsätzlich aus zwei Komponenten: zum einen aus der Schnittstellenbeschreibung, vorliegend in einem .xml-Dateiformat, und zum anderen aus dem Regelsystemmodell, vorliegend als kompilierter C-Code, in welchem das Lösungsverfahren integriert ist.

Tabelle 3.1: Übersicht über Ein- und Ausgangsgrößen des Bremsregelsystems

Eingangsgrößen (9)	Ausgangsgrößen (4)
Raddrehgeschwindigkeit [m/s]	Radzylinderbremsdruck [bar]
Vorderrad links	Vorderrad links
Vorderrad rechts	Vorderrad rechts
Hinterrad links	Hinterrad links
Hinterrad rechts	Hinterrad rechts
Beschleunigung [m/s ²]	
Longitudinal	
Lateral	
Gierrate [rad/s]	
Bremspedalkraft [N]	
Lenkradwinkel [°]	

Hinsichtlich der Kategorisierung auf Basis des Detaillierungsgrades handelt es sich um ein Level I-Steuergerät. Dies bedeutet, dass die Regelalgorithmik des Bremsregelsystems exakt nachgebildet ist, wobei jedoch auf weitere Größen, die nicht direkt zum Ausführen des Algorithmus notwendig sind, verzichtet wird. In Tabelle 3.1 ist ein Überblick über die vorhandenen Ein- und Ausgangsgrößen gegeben. Durch die im Steuergerät interne Integration der Beschleunigungswerte und der Informationen der Radgeschwindigkeiten kann in jeder Situation der Schlupf für die einzelnen Räder berechnet und eine Regelentscheidung

in Abhängigkeit von der aktuellen Fahrsituation getroffen werden. Die vom FMU-Modell bereitgestellten Ausgangsgrößen sind die sich einstellenden Bremsdrücke im Radzylinder jedes einzelnen Rads. Neben klassischen Bremsregeleingriffen sind auch Regelunterstützungen bei Kurvenmanövern durch Analyse des Lenkradwinkels und der Gierrate möglich. Neben dem Level I-Seriensteuergerät liegt des Weiteren das identische Steuergerät in einer detaillierten Modellierung als Level III-Steuergerät vor. Bei dieser detaillierten Modellierung liegen neben den in Tabelle 3.1 dargestellten Größen weitere 270 Eingangsgrößen vor, die für ein funktionierendes Netzwerkmanagement sowie für Informationen von anderen Steuergeräten zur korrekten Funktion benötigt werden. Bei Detektion von fehlenden oder unplausiblen Eingangsgrößen erfolgt durch die geräteinternen Überwachungsmechanismen eine Einschränkung der Steuergerätefunktionalität. Die zusätzlichen Eingangsgrößen haben keinen Einfluss auf den tatsächlich im Steuergerät applizierten Regelalgorithmus. Zu den ergänzenden Eingangsgrößen zählen unter anderem die aktuelle Bordnetzspannung sowie der Status des Bremsflüssigkeitssensors.

Die Nutzung der virtuellen Seriensteuergeräte erlaubt zwar, die Abweichungen durch Modellierungsunterschiede bei der Algorithmik zu eliminieren und somit für Untersuchungen hinsichtlich der Abbildungsgüte die optimale Wahl darzustellen, bei der Analyse grundlegender numerischer Fragestellungen sowie dem Plausibilisieren von auftretenden Effekten sind diese Seriensteuergeräte aufgrund ihrer durch die Kompilierung bedingten Intransparenz jedoch nur eingeschränkt geeignet. Aufgrund dessen wird in dieser Arbeit neben den virtuellen Seriensteuergeräten ein weiteres, vereinfachtes Regelsystemmodell verwendet. Das in der CACSD-Umgebung Simulink implementierte Regelsystem basiert auf einer in der Literatur veröffentlichten, schlupfbasierten ABS-Modellierung [50, 25]. Die vollständige Nachvollziehbarkeit und Transparenz der so realisierten Regelsystemmodellierung erlauben es, die Auswirkungen unterschiedlicher Simulations- und Kopplungsparameter auf das Systemverhalten umfassend zu analysieren sowie die dabei auftretenden Phänomene zu identifizieren und zu erläutern.

Kapitel 4

Kopplungsmöglichkeiten von Regelsystemen und Mehrkörpersimulationen

Die Kopplung des Simulationsmodells des Gesamtfahrzeugs mit dem des Regelsystems ist eine essentielle Aufgabe, um das mechatronische Gesamtsystem korrekt abzubilden. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Integration von aktiven Regelfunktionalitäten in eine MKS-Gesamtfahrzeugsimulation vorgestellt. Zunächst werden zur Charakterisierung der einzelnen Methodiken die generellen Einteilungsmöglichkeiten von Kopplungsverfahren vorgestellt. Anschließend wird auf die einzelnen Verknüpfungsmöglichkeiten im Detail eingegangen. Grundsätzlich lässt sich die Kopplung der beiden Simulationsumgebungen mithilfe von drei verschiedenen Möglichkeiten realisieren:

- Die erste Möglichkeit ist die parallele Simulation der beiden Modelle in ihrer natürlichen Simulationsumgebung und der Austausch von Informationen zu diskreten Zeitpunkten. Diese sogenannte Cosimulation wird in Abschnitt 4.2 beleuchtet.
- Eine weitere Möglichkeit ist das Einbinden des MKS-Modells in die Regelsystem-simulationsumgebung. Diese sogenannte Modelltransfer-Methode wird in Abschnitt 4.3 dargestellt.
- In Abschnitt 4.4 wird die dritte Kopplungsmöglichkeit, die Nutzung einer sogenannten External System Library, vorgestellt. Das Konzept besteht darin, die Regelsystemlogik als kompilierten C-Code in die MKS-Simulationsumgebung zu integrieren.

Neben den theoretischen Erläuterungen der einzelnen Verfahren wird im letzten Abschnitt des Kapitels eine Beurteilung hinsichtlich des Nutzens der einzelnen Methodiken für die Bremsregelsystemintegration in eine Gesamtfahrzeugsimulation durchgeführt.

4.1 Klassifizierung von Kopplungsalgorithmen

Die Klassifizierung von Kopplungsstrategien zwischen Regelsystem- und Gesamtfahrzeugmodellen ist ausführlich in [82] beschrieben. Die hier durchgeführte Klassifizierung und Einordnung der einzelnen Methodiken orientiert sich an den dort identifizierten Kriterien:

1. Flussrichtung der Datenkommunikation

Die Kopplungsalgorithmen können hinsichtlich ihrer Flussrichtung der Datenkommunikation unterschieden werden. Es wird zwischen uni- und bidirektionaler Datenkommunikation differenziert. Im Rahmen der unidirektionalen Datenkommunikation werden die Informationen aus einer der beiden Simulationsumgebungen im Vorfeld an die zweite Simulationsumgebung übertragen, sodass die Simulation ohne weitere Kommunikation zwischen den Simulationsumgebungen durchgeführt werden kann. Bei der bidirektionalen Datenkommunikation hingegen werden während der laufenden Simulation zwischen beiden Simulationsumgebungen Daten ausgetauscht. Dies ermöglicht, dass die Simulationsergebnisse sowohl in der Simulationsumgebung des Steuergerätes, als auch in der Simulationsumgebung des Gesamtfahrzeugmodells vorliegen.

2. Integrationsschema

Eine weitere Klassifizierungsmöglichkeit für die Kopplungsstrategien ist die Einteilung nach ihrem numerischen Integrationsschema. Grundsätzlich existieren mit der sogenannten starken Kopplung (engl. tight coupling) und schwachen Kopplung (engl. weak coupling) zwei verschiedene Integrationsschemata. Bei der schwachen Kopplung werden die Gleichungen des Gesamtfahrzeugmodells und des Regelsystemmodells mit einem jeweils individuellen numerischen Integrator gelöst. Bei der starken Kopplung hingegen werden die Gleichungen beider Modelle von einem gemeinsamen numerischen Integrator gelöst. Diese Kopplungsstrategie wird häufig auch als monolithische Simulation bezeichnet.

3. Realisierung des Datenaustauschs

Neben der Flussrichtung der Datenkommunikation kann auch die technische Umsetzung des Datenaustauschs zur Charakterisierung der Kopplungsstrategien genutzt werden. Bei großen zu kommunizierenden Datenmengen wird häufig per Dateiaustausch kommuniziert. Hierbei werden die Informationen in Dateien gespeichert und importiert. Bei kleineren Datenmengen können Informationen mittels Interprozesskommunikation, die das Betriebssystem bereitstellt, ausgetauscht werden. Als dritte Möglichkeit kann der Informationsaustausch durch Funktionsaufrufe realisiert werden, wie es beispielsweise bei der Einbindung von C-Code in eine MKS-Simulationsumgebung der Fall ist.

4. Plattformabhängigkeit

Aufgrund des Mitwirkens vieler verschiedener Zulieferer bei der Entwicklung von Fahrzeugprojekten ist die Plattformabhängigkeit der Methodik von besonderer Relevanz. Einige Methodiken verlangen, dass sowohl das Regelsystem, als auch das Fahrzeugmodell auf dem gleichen Betriebssystem lauffähig sind. Dies erfordert eine genaue Abstimmung aller am Entwicklungsprozess beteiligten Parteien. Neben diesen vom Betriebssystem abhängigen Methodiken existieren die Multi-Betriebssystem-Methodiken, die die Interaktion von Regelsystem und Gesamtfahrzeugmodell auf verschiedenen Betriebssystemen ermöglichen und somit eine größere Flexibilität bei der Kopplung und somit generell beim Entwicklungsprozess bieten.

Auf Basis dieser Charakterisierungsmöglichkeiten werden im Folgenden die in ADAMS möglichen Kopplungsansätze beschrieben und eingeordnet.

4.2 Cosimulation

Die Cosimulation beschreibt die Kopplung von mindestens zwei Simulationsplattformen, welche voneinander unabhängige Zeitintegrationsverfahren nutzen. Eine Cosimulation stellt daher eine schwache Kopplung dar. Zu diskreten Zeitpunkten tauschen die beiden Simulationsplattformen definierte Ein- und Ausgangsgrößen aus. Der Ablauf des Informationsaustauschs ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Es wird der serielle Ablauf der Cosimulation nach Gauß-Seidel veranschaulicht, welcher in der hier verwendeten Simulationsumgebung ADAMS Anwendung findet. Die numerische Integration der einzelnen Teilmodelle wird hierbei nacheinander ausgeführt. Zunächst erfolgt die Zeitintegration seitens des Regelsystems. Da für diese erste Zeitintegration die Anfangsbedingungen der MKS-Gesamtfahrzeugsimulation genutzt werden, sind die realen, kausalen Zusammenhänge (das Regelverhalten reagiert auf den Zustand des Fahrzeuges) sichergestellt [48]. Die Simulationsdauer entspricht hierbei dem Kommunikationsintervall T , auch Makroschrittweite genannt. Bei Erreichen der Makroschrittweite werden die definierten Ausgangsgrößen an die Simulationsumgebung des Gesamtfahrzeugmodells kommuniziert. Auf Basis der Eingänge kann die Simulation bis zum Erreichen des Kommunikationsintervalls durchgeführt werden. Im Anschluss an die Kommunikation der notwendigen Eingangsgrößen zurück an die Simulationsplattform des Regelsystems kann dieses bis zum nächsten Makrozeitschritt simulieren. Das serielle Vorgehen wird bis zum Erreichen des Simulationsendes durchgeführt. Die folglich bidirektionale Kommunikation ist durch Interprozesskommunikation realisiert.

Eine Herausforderung, welche es bei der Realisierung einer Cosimulation zu beachten gilt, ist die Synchronisation zwischen den Schrittweiten der einzelnen Simulationen, auch Mikroschrittweiten genannt, und der Makroschrittweite. Um die Konsistenz der zwischen den Simulationsplattformen ausgetauschten Daten sicherzustellen, muss das Kommunika-

tionsintervall ein ganzzahliges Vielfaches der Ausgabeschrittweite von ADAMS und des Zeitschrittes der Regelsystemsimulation darstellen [69].

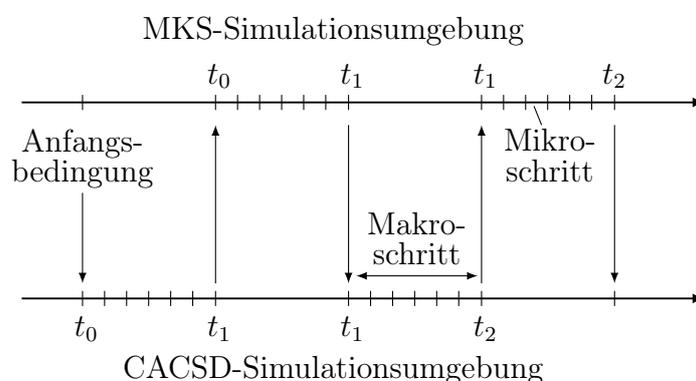


Abb. 4.1: Schematische Darstellung des Ablaufs der Cosimulation in Anlehnung an [48]

4.3 C-Code-Integration

Neben der Cosimulation besteht eine weitere Möglichkeit Steuergeräte in eine MKS-Gesamtfahrzeugsimulation einzubinden in der Integration von C-Reglercode in die Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung. Dabei wird der kompilierte Reglercode gemeinsam mit den Bewegungsgleichungen des Gesamtfahrzeugmodells durch den Solver der MKS-Simulationsumgebung gelöst. Es handelt sich folglich um eine starke Kopplung, die im Vergleich zu einer schwachen Kopplung als numerisch robuster gilt [82].

Der Reglercode wird für gewöhnlich mittels automatischer Codegenerierung aus dem in der CACSD-Umgebung vorliegenden Regelsystemmodell erzeugt. In dieser Arbeit wird hierzu RealTime Workshops von MATLAB verwendet. Durch die Kompilierung des so erzeugten Codes ist diese Methodik an die Zielplattform der Kompilierung gebunden.

Nach der Erstellung des kompilierten Reglercodes ist es möglich, eine Simulation ausschließlich unter Verwendung der Kenntnisse der MKS-Simulationsumgebung durchzuführen, ohne dass weitere Kenntnisse der Regelsystemsimulationsumgebung erforderlich sind. Die Methodik zeichnet sich folglich durch eine unidirektionale Flussrichtung der Datenkommunikation aus. Die Informationen sowie die Daten werden durch den Export des kompilierten Reglercodes im Vorhinein kommuniziert. Während der Simulation in der MKS-Simulationsumgebung kann durch Funktionsaufrufe des C-Reglercodes auf die Regelfunktionalitäten zugegriffen werden.

Eine bedeutende Einschränkung der Methode besteht darin, dass durch die Kompilierung der Regelalgorithmen die Funktionsweise der Regelfunktionalitäten nur bedingt nachvollzogen werden kann. Diese fehlende Transparenz kann zu Herausforderungen bei der Plausibilisierung sowie der Analyse von unerwartetem Systemverhalten führen. Diese Limitation ist in zunehmendem Maße entscheidend, da sowohl die Komplexität als auch

die Anzahl der Regelsysteme im Fahrzeug, die miteinander interagieren, kontinuierlich zunimmt [48].

4.4 Modelltransfer

Neben der beschriebenen unidirektionalen Datenkommunikation vom Regelsystem zur MKS-Simulationsumgebung existiert auch die Möglichkeit einer unidirektionalen Kommunikation in entgegengesetzter Richtung, wodurch Daten von der MKS- zur Regelsystems simulationsumgebung übertragen werden können. Dieses Vorgehen wird als Function Evaluation-Methode oder Modelltransfer bezeichnet.

Bei dieser Methodik werden die Bewegungsgleichungen des Gesamtfahrzeugmodells in die Simulationsumgebung des Regelsystems überführt und dort gemeinsam mit den Gleichungen des Regelsystems gelöst. Wie auch bei der C-Code-Integration handelt es sich hierbei folglich um eine starke Kopplung. Bei der Überführung des Gleichungssystems werden zur Integration kompilierte Dateien eingesetzt, sodass auch diese Methodik an die Zielplattform der Kompilierung gebunden ist und somit eine Plattformabhängigkeit aufweist.

Die für gewöhnlich in MKS-Gesamtfahrzeugsimulationen auftretenden DAE-Gleichungssysteme, bestehend aus Bewegungsgleichungen sowie algebraischen Gleichungen mit Zwangsbedingungen und aufgeprägten, äußeren Kräften, können nicht von den im CACSD-Tool genutzten Solvern gelöst werden. Mithilfe von Koordinatenzerlegung (engl.: coordinate partitioning) wird daher das DAE-Gleichungssystem in ein gewöhnliches, nichtlineares Gleichungssystem überführt. Das entstehende Gleichungssystem ist für gewöhnlich numerisch schwieriger zu lösen, als das DAE-Gleichungssystem der MKS-Gesamtfahrzeugsimulation. [82, 48, 80]

Alternativ kann eine Linearisierung des Gleichungssystems der MKS-Gesamtfahrzeugsimulation um einen vorgegebenen Betriebspunkt durchgeführt werden, um ein in die CACSD-Umgebung integrierbares Gleichungssystem zu erhalten. Dieses Vorgehen ist für die Untersuchung von Gesamtfahrzeugsimulationen mit aktiven Regelsystemen jedoch nicht zielführend, da besonders die nichtlinearen Eigenschaften des Gesamtfahrzeugverhaltens durch die Regelfunktionalitäten beeinflusst und kontrolliert werden sollen.

4.5 Bewertung der Kopplungskonzepte zur Integration von Regelsystemen

Nach der Vorstellung der drei Methodiken zur Realisierung der Regelsystemintegration in eine MKS-Gesamtfahrzeugsimulation sind in Tabelle 4.1 die Eigenschaften der einzelnen Varianten zusammengefasst. In diesem Abschnitt werden die jeweiligen Vor- und Nachteile sowie die Praktikabilität der einzelnen Methodiken für die Integration des in Abschnitt 3.3 vorgestellten Bremsregelsystems analysiert und bewertet. Zur Identifizierung einer

geeigneten Kopplungstechnik sind sowohl die Simulationsziele, als auch die Rahmenbedingungen der vorliegenden Modelle zu berücksichtigen.

Da im Rahmen dieser Arbeit mithilfe der MKS-Gesamtfahrzeugsimulationen betriebsfestigkeitstechnische Untersuchungen und Freigaben von Fahrwerksbauteilen durchgeführt werden sollen, liegt ein besonderes Augenmerk auf der realistischen Bestimmung der im Betrieb auftretenden Lasten und Beanspruchungen der Fahrwerksbauteile.

Tabelle 4.1: Übersicht der Kategorisierung von Kopplungskonzepten auf Basis der Einteilung in [82]

	Cosimulation	Code-Integration	Modelltransfer
Flussrichtung der Datenkommunikation	Bidirektional	Unidirektional	Unidirektional
Integrationschema (Kopplungsart)	Schwach	Stark	Stark
Realisierung des Datenaustauschs	Interprozesskommunikation	Codeintern	Codeintern
Plattformabhängigkeit	nein	ja	ja

Die Methodik des Modelltransfers ist für diese Aufgabe nur bedingt geeignet. Durch die notwendige Umformung der in der MKS-Simulation auftretenden DAE-Gleichungen hin zu den in der CACSD-Umgebung lösbaren ODE-Gleichungen, treten die Schnittlasten und Lagerkräfte nicht mehr explizit in den Bewegungsgleichungen auf [48]. Wie in [41, 48] gezeigt, ist durch die Anwendung des Newton-Euler-Verfahrens die nachträgliche Bestimmung dieser Größen mithilfe der Gelenkbeschleunigungen und der Masseninformationen der einzelnen Bauteile möglich. Die Umsetzung dieser Möglichkeit erfordert jedoch einen signifikanten Zusatzaufwand. Ein weiteres Problem bei der Anwendung der Methodik des Modelltransfers stellt die hohe Komplexität des hier verwendeten Gesamtfahrzeugmodells dar. Aufgrund der vorhandenen kinematischen Schleifen und der teilweise genutzten flexiblen Körper ist die Transformation der Gleichungssysteme nicht realisierbar. Die Methodik des Modelltransfers ist für die Integration von aktiven Fahrwerkregelsystemen folglich nicht praktikabel und wird daher nicht weiter verfolgt.

Bei der C-Code-Integration in die MKS-Simulationsumgebung kann eine Transformation der DAE-Gleichungen des Gesamtfahrzeugmodells durch die Nutzung des MKS-Solvers umgangen werden. Dies ermöglicht grundsätzlich die direkte Ermittlung und Auswertung der auftretenden Belastungen des Fahrwerks. Durch die realisierte starke Kopplung und somit die Nutzung von ausschließlich einem numerischen Integrator gilt die C-Code-Integration darüber hinaus als numerisch robuste Methodik, um die Regelsystemintegration zu realisieren [82]. Auch aus praktischen Gesichtspunkten weist die Metho-

dik der C-Code-Integration Vorteile auf. Die Nutzung der Methodik bedarf nach einmaliger Kompilierung des Regelsystemalgorithmus keinerlei Kenntnisse in der CACSD-Simulationsumgebung. Die Lastdatenbestimmung kann somit ausschließlich in der gewohnten MKS-Entwicklungsumgebung durchgeführt werden, wodurch eine nahtlose Integration in den bestehenden Entwicklungsprozess begünstigt wird. Hinsichtlich des Simulationsziels, die im Betrieb auftretenden Lasten und Beanspruchungen der Fahrwerksbauteile zu bestimmen, ist die Methodik grundsätzlich geeignet. Jedoch gilt es, die Kompatibilität der vorliegenden Simulationsmodelle ebenfalls zu berücksichtigen, wobei mehrere Herausforderungen auftreten.

Zunächst sind die seriennahen, virtuellen Steuergeräte häufig selbstintegrierend. Dies bedeutet, dass eine starke Kopplung und die Nutzung des MKS-Integrators nicht notwendig bzw. möglich sind. A priori kommt für selbstintegrierende, virtuelle Steuergeräte nur eine schwache Koppelung in Betracht. Dies ist auch bei dem in dieser Arbeit verwendeten Level I-Seriensteuergerät der Fall.

Für virtuelle Level 0-Steuergeräte, wie das hier betrachtete, eigenentwickelte Bremsregelsystem, ist die Integration dennoch möglich und zu berücksichtigen, da diese nicht in selbstintegrierender Form vorliegen. Hierbei muss jedoch die automatische Codegenerierung überprüft und plausibilisiert werden. In verschiedenen Untersuchungen offenbart sich durch die Identifikation von unplausiblen Systemverhalten des generierten C-Codes eine weitere Problematik der Methodik. So stellte beispielsweise Mack [48] eine fehlerhafte Codegenerierung bei verschiedenen Fahrwerksregelsystemen fest und auch in dieser Arbeit konnte keine ordnungsgemäß funktionierende C-Code-Generierung realisiert werden. Da beispielsweise in [87] hingegen eine funktionierende C-Code-Integration eines Reifenmodells für die Fahrdynamiksimulation durchgeführt wurde, wird an dieser Stelle nicht generell von dieser Methodik abgeraten. Es wird lediglich auf potentielle Probleme im Zusammenhang mit der automatischen Codegenerierung hingewiesen.

Aufgrund des selbstintegrierenden Verhaltens des Level I-Seriensteuergerätes sowie des Versagens der automatischen Codegenerierung beim eigenentwickelten Bremsregelsystem wird in dieser Arbeit die Integration aller Regelsysteme mittels Cosimulation realisiert. Die Simulation des Gesamtfahrzeug- und Reglermodells innerhalb der jeweils spezifischen Simulationsumgebung ergibt einige Vorteile, die in [84] prägnant in drei Punkten zusammengefasst sind:

1. Vorteil für die Modellierung

Gerade bei multiphysikalischen Kopplungen kann die Modellierung der Teilsysteme bei Cosimulationen in spezifischen Simulationsumgebungen durchgeführt werden, wodurch eine einfache und präzisere Nachbildung der physikalischen Phänomene begünstigt wird.

2. Vorteil für den Entwicklungsprozess

Die Cosimulation ermöglicht das parallele und voneinander unabhängige Aufbauen der Teilsysteme. So ist das Arbeiten mit unterschiedlichen Betriebssystemen möglich, sodass die Cosimulation eine plattformübergreifende Kopplung erlaubt. Dies verkürzt Entwicklungszeiten und trägt somit zu einem effizienten Produktentstehungsprozess bei.

3. Vorteil für die numerischen Integrationsmöglichkeiten

Durch die schwache Kopplung der Cosimulation kann für jedes Teilsystem der optimale Solver inklusive spezifischer Schrittweite genutzt werden. Dies ist besonders bei Teilsystemen mit unterschiedlichen, relevanten Frequenzbereichen hilfreich.

Entscheidend für die Integration von Fahrzeugsteuergeräten ist, dass die Cosimulation für alle Modellierungstiefen der Steuergeräte eine Bestimmung der Fahrwerkslastdaten erlaubt und somit uneingeschränkt für die hier untersuchten Bremsregelsysteme verwendbar ist. Im nächsten Kapitel werden daher sinnvolle Kopplungs- und Simulationsparameter für diese Methodik identifiziert.

Kapitel 5

Analyse und Identifikation geeigneter Kopplungs- und Simulationsparameter

Durch die schwache Kopplung kann die Cosimulation in bestimmten Szenarien zu instabilem Systemverhalten führen [82]. Die Bestimmung geeigneter Kopplungs- und Simulationsparameter ist daher essenziell, um die Stabilität des Systems zu gewährleisten. Besonders die Wahl des Kommunikationsintervalls, aber auch die Mikroschrittweite beeinflussen die Simulationsqualität. In diesem Kapitel wird im ersten Schritt die Auswahl der Kommunikationsintervalle in anderen Publikationen betrachtet. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird anschließend der Einfluss des Kopplungsintervalls für Bremsregelsysteme untersucht. Das vollständig transparente CACSD-Bremsregelsystem dient als Grundlage, um die Kopplungsmechanismen nachzuvollziehen und zu erläutern. Auch die Variation der Mikroschrittweite wird mithilfe dieses Bremsregelsystems analysiert. Abschließend erfolgen die Zusammenfassung der Ergebnisse sowie die darauf basierende Ableitung der Kopplungs- und Simulationsparameter, die in dieser Arbeit verwendet werden.

5.1 Kopplungs- und Simulationsparameter in Cosimulationen

Aufgrund des potentiellen Einflusses der Wahl des Kommunikationsintervalls auf die Simulationsergebnisse wird diese in verschiedenen Veröffentlichungen thematisiert und diskutiert.

In der Praxis wird das Kommunikationsintervall häufig iterativ oder auf Basis von Erfahrungswerten bestimmt. So wird beispielsweise in [37] bei der Kopplung eines Fahrzeugmodells mit einem Fahrerassistenzsystem auf einen Erfahrungswert zurückgegriffen. Die Variation des Erfahrungswertes hatte für diesen Anwendungsfall keine signifikante Auswirkung, sodass keine weiterführenden Untersuchungen zum Kommunikationsinter-

vall durchgeführt wurden. In [48] wurde das Kommunikationsintervall für die Kopplung eines Gesamtfahrzeugmodells mit einem Bremsregelsystem heuristisch bestimmt. Es wurde zwischen der Performance, für welche ein größeres Kommunikationsintervall vorteilhaft ist, und dem zeitlichen Verzug, welcher mit größeren Kommunikationsintervallen zunimmt, abgewogen. Bei der Einbindung einer Fahrzeuglenkung in ein Fahrzeugmodell mittels einer Cosimulation wurde in [12] das kleinstmögliche Kommunikationsintervall gewählt, das sich aus der maximalen Simulationsschrittweite der Teilsysteme ergibt. Die hier identifizierte Praxis, wonach das Kommunikationsintervall häufig durch Erfahrungswerte oder heuristisch bestimmt wird, wurde auch in [5] festgestellt. Dort werden daher Erfahrungswerte zur Wahl des Kommunikationsintervalls in Abhängigkeit von der Bandbreite der auftretenden Simulationsfrequenzen vorgestellt.

Völker [84] schlägt vor, die Wahl des Kopplungsintervalls in Abhängigkeit der Eigenfrequenzen des Systems sowie der Frequenz der äußeren Anregung zu wählen. Das Kommunikationsintervall soll dabei um Faktor zehn kleiner als die maximal relevante Frequenz sein. Dieser Faktor basiert auf Empfehlungen für Simulationsschrittweiten von Simulationen mit einem Solver.

Trotz der Definition von Richtwerten zur Wahl des Kommunikationsintervalls wird sowohl in [5], als auch in [84] empfohlen, für jeden Anwendungsfall das Kopplungsintervall individuell zu bestimmen und zu plausibilisieren. Auch der Vorschlag in [49], das Kommunikationsintervall auf Basis der Abtastrate des echten Steuergerätes zu wählen, ist hier nicht zielführend, da in dieser Arbeit nicht diskrete Steuergerätgrößen zwischen den Simulationsumgebungen ausgetauscht, sondern auch kontinuierliche Parameter der Brems hydraulik übergeben werden.

Folglich wird das Kommunikationsintervall in dieser Arbeit ebenfalls individuell diskutiert und bestimmt. Dazu wird im nächsten Abschnitt der Einfluss des Kommunikationsintervalls für das CACSD-Bremsregelsystem beleuchtet.

5.2 Einfluss des Kommunikationsintervalls

Zur Identifikation eines geeigneten Kommunikationsintervalls sowie zu dessen Untersuchung werden im Folgenden drei Vollbremsungen mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 70, 80 und 100 km/h für vier verschiedene Kommunikationsintervalle gegenübergestellt. Die gewählten Intervalle orientieren sich an den im vorherigen Abschnitt zusammengefassten Empfehlungen und liegen gleichmäßig verteilt zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ s und $1 \cdot 10^{-4}$ s. In Tabelle 5.1 sind die zentralen Ergebnisse der Bremsungen zusammengefasst. Es wird deutlich, dass der Bremsweg sowie die Bremszeit für alle untersuchten Kommunikationsintervalle sehr gut übereinstimmen. Die maximale Abweichung des Bremsweges von 1 % tritt bei der Bremsung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 100 km/h auf. Dabei ergibt sich ein Unterschied in der Bremsdauer von 0.06 s. Verglichen mit der Reaktionszeit

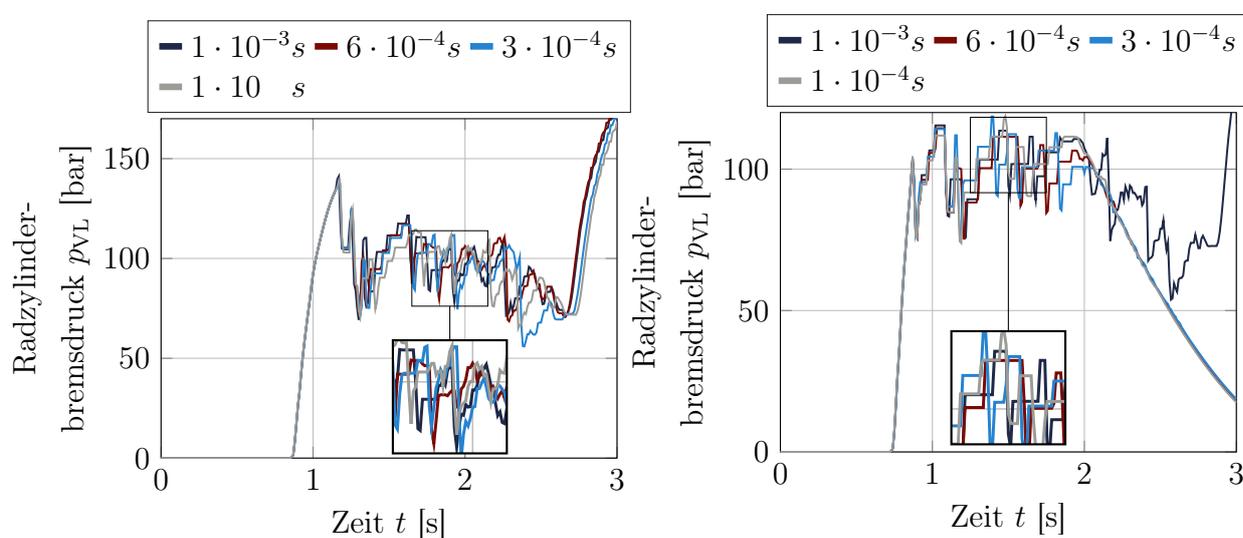
eines Fahrers von circa einer Sekunde [33] und der Gesamtdauer der Bremsung sind diese Unterschiede vernachlässigbar klein. Auch für die maximale Verzögerung sind keine relevanten Abweichungen feststellbar.

Bei der Betrachtung der skalaren, fahrdynamischen Kennwerte scheinen keine relevanten Unterschiede durch die Variation des Kommunikationsintervalls zu existieren. Zur Darstellung des Regelverhaltens bei den Bremsungen sind in Abbildung 5.1 der Bremsdruckverlauf für das linke Vorderrad und in Abbildung 5.2 die zugehörige Radgeschwindigkeit dargestellt. Hierbei wird der Einfluss des Kommunikationsintervalls deutlich. Bei Beginn der Bremsungen finden die Regelsystemeingriffe noch synchron statt. Mit zunehmender Simulationszeit unterscheiden sich die Regeleingriffszeitpunkte der Simulation verschiedener Kommunikationsschrittweiten immer deutlicher. Besonders markant sind die Unterschiede zum Ende der Bremsung bei der Startgeschwindigkeit von 100 km/h (vgl. Abbildung 5.1c). Ab 2.4 s ist bei den Simulationen mit einer Makroschrittweite von $6 \cdot 10^{-4}$ s und $1 \cdot 10^{-3}$ s ein weiterer Druckanstieg ersichtlich, wohin gegen bei den Simulationen mit Makroschrittweiten von $3 \cdot 10^{-4}$ s und $1 \cdot 10^{-4}$ s der Druck reduziert wird.

Tabelle 5.1: Übersicht der fahrdynamischen Kennwerte für Vollbremsungen mit unterschiedlichen Kommunikationsintervallen

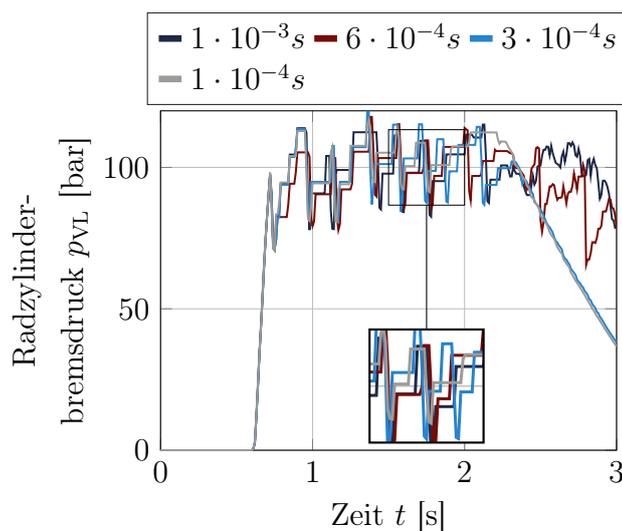
70 km/h				
	$1 \cdot 10^{-3}$ s	$6 \cdot 10^{-4}$ s	$3 \cdot 10^{-4}$ s	$1 \cdot 10^{-4}$ s
Bremsweg	32.0 m	31.9 m	32.1 m	32.4 m
Bremsdauer	1.79 s	1.80 s	1.84 s	1.86 s
Max. Verzögerung	8.65 m/s ²	8.64 m/s ²	8.53m/s ²	8.91 m/s ²
Rechenzeit	3.41 min	3.22 min	3.18 min	3.12 min
80 km/h				
	$1 \cdot 10^{-3}$ s	$6 \cdot 10^{-4}$ s	$3 \cdot 10^{-4}$ s	$1 \cdot 10^{-4}$ s
Bremsweg	38.7 m	39.1 m	39.2 m	39.0 m
Bremsdauer	2.16 s	2.24 s	2.12 s	2.21 s
Max. Verzögerung	9.51 m/s ²	9.41 m/s ²	9.45 m/s ²	9.52 m/s ²
Rechenzeit	3.71 min	3.64 min	3.43 min	3.21 min
100 km/h				
	$1 \cdot 10^{-3}$ s	$6 \cdot 10^{-4}$ s	$3 \cdot 10^{-4}$ s	$1 \cdot 10^{-4}$ s
Bremsweg	49.6 m	49.5 m	49.5 m	49.1 m
Bremsdauer	2.85 s	2.84 s	2.88 s	2.91 s
Max. Verzögerung	10.18 m/s ²	10.31 m/s ²	10.24 m/s ²	10.52 m/s ²
Rechenzeit	4.01 min	3.88 min	3.62 min	3.41 min

Dieses unterschiedliche Verhalten in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen ist auch in experimentellen Messungen feststellbar [43]. Der Grund hierfür ist, dass durch die geringe Fahrzeugreferenzgeschwindigkeit kleine Unterschiede oder Oszillationen in den Radgeschwindigkeiten bereits eine große Variation des Schlupfwertes bewirken können (vgl. Gleichung 2.14). Die Schlupfwertunterschiede bzw. -sprünge können zu unterschiedlichem Regelverhalten des Bremsregelsystems führen, was die deutlichen Unterschiede im unteren Geschwindigkeitsbereich sowohl in den Messungen, als auch in den Simulationen erklärt. Folglich ist das Verhalten aller untersuchten Kommunikationsintervalle in diesem Zeitbereich plausibel und auf kleine Unterschiede in den Radgeschwindigkeiten zurückzuführen.



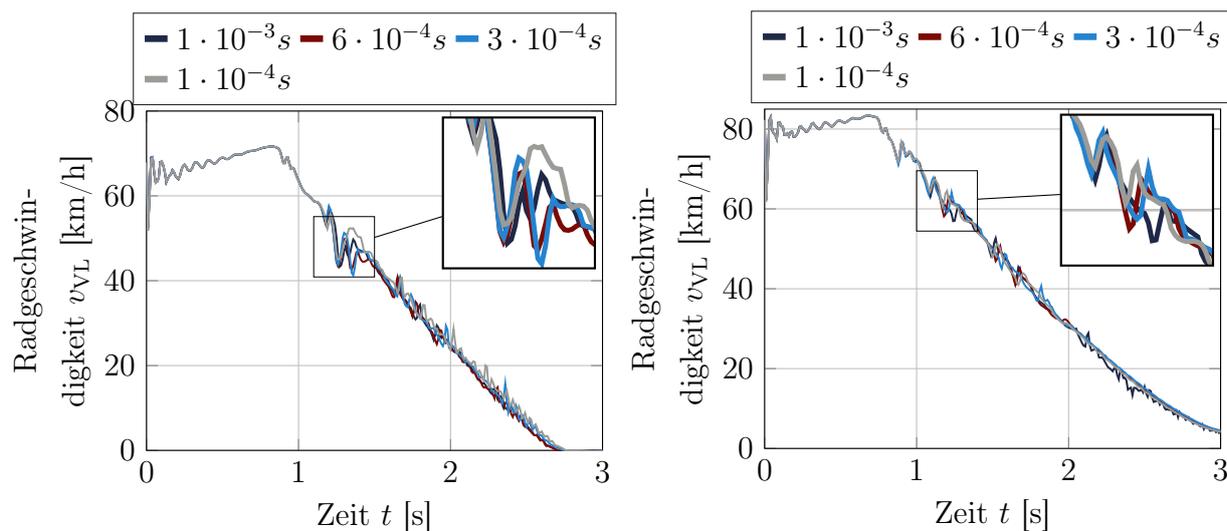
(a) Ausgangsgeschwindigkeit 70 km/h

(b) Ausgangsgeschwindigkeit 80 km/h



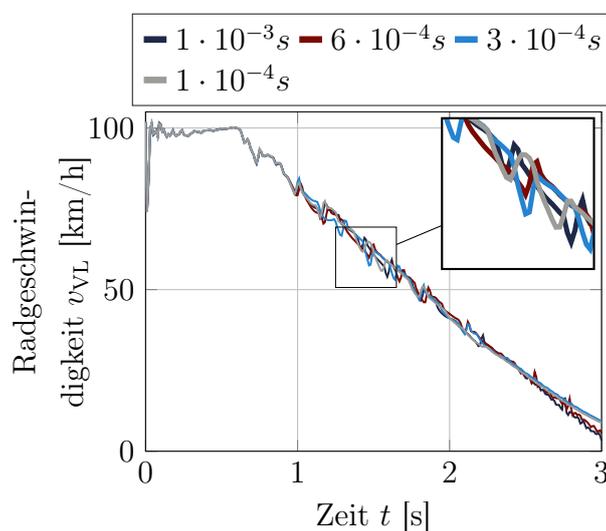
(c) Ausgangsgeschwindigkeit 100 km/h

Abb. 5.1: Einfluss des Kommunikationsintervalls auf das Regelverhalten bei Vollbremsungen für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten



(a) Ausgangsgeschwindigkeit 70 km/h

(b) Ausgangsgeschwindigkeit 80 km/h



(c) Ausgangsgeschwindigkeit 100 km/h

Abb. 5.2: Einfluss des Kommunikationsintervalls auf die Radgeschwindigkeit bei Vollbremsungen für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten

Auch bei größeren Geschwindigkeiten sind sowohl hinsichtlich der Eingriffsintensität, als auch bezüglich des Eingriffszeitpunktes deutliche Unterschiede im Regelverhalten erkennbar (vgl. Abbildung 5.1 und 5.2). Der erste Regelsystemeingriff mit deutlicher Druckreduzierung ist unabhängig vom gewählten Kommunikationsintervall identisch. Mit zunehmender Simulationszeit nehmen die Unterschiede im Regelverhalten zu. Dieser Effekt lässt sich durch die Diskretisierungsunterschiede der zu übergebenden Größen während der Cosimulation begründen und ist in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt.

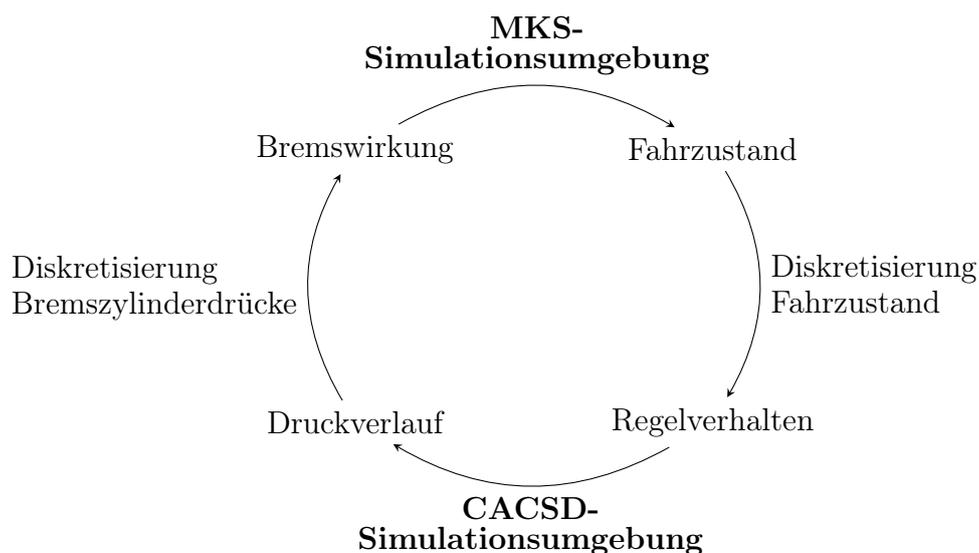


Abb. 5.3: Schematische Darstellung der Ursache der sich verstärkenden Abweichung der Simulationsergebnisse bei Variation des Kopplungsintervalls

Bei der Veränderung des Kommunikationsintervalls entstehen bei der Datenübergabe von der CACSD-Simulationsumgebung zur MKS-Simulationsumgebung durch die Verschiebung des Kommunikationszeitpunkts kleine Abweichungen der zu übertragenden Radbremsdrücke. Diese geringen Diskretisierungsunterschiede führen zu einer leichten Veränderung der Bremswirkung des MKS-Fahrzeugmodells innerhalb des aktuellen Makrozeitschritts. Infolgedessen wird der Fahrzustand, insbesondere die Raddrehzahlen und Schlupfwerte, welche am Ende des Zeitschrittes zurück an die CACSD-Simulationsumgebung übergeben werden, verändert. Dies beeinflusst das Regelverhalten des Steuergerätes und somit den Bremsdruckverlauf, der wiederum an die Gesamtfahrzeugsimulation kommuniziert wird. Dieser sich selbstverstärkende Prozess setzt sich über die gesamte Simulationsdauer fort und erklärt die zunehmenden Unterschiede der Simulationen mit unterschiedlichem Kommunikationsintervall. Analog zur hier beschriebenen Fortpflanzung der Diskretisierungsunterschiede bei den von der CACSD- zur MKS-Simulationsumgebung kommunizierten Radbremsdrücken, tritt der Effekt auch bei der Diskretisierung der von der MKS- zur CACSD-Simulationsumgebung kommunizierten Raddrehzahlen bzw. Schlupfwerte auf.

Die Auswirkung der Variation des Kommunikationsintervalls ist bei der Einbindung von zeitabhängig eingreifenden Regelsystemen besonders signifikant. Die durch die Variation des Kommunikationsintervalls entstehenden Diskretisierungsunterschiede des Fahrzustands nahe der Aktivierungsschwelle des Regelsystems können dazu führen, dass unterschiedliche Regelentscheidungen getroffen werden. Dies beeinflusst den weiteren Verlauf der Simulationen erheblich und verstärkt somit die Unterschiede im Regelverhalten zwischen Simulationen mit unterschiedlichen Kommunikationsintervallen.

Trotz der so erklärbaren Unterschiede zeigen die Bremssimulationen für alle untersuchten

Kommunikationsintervalle ein plausibles und sinnvolles Regelverhalten. Dies wird in Abbildung 5.4 deutlich, in der die Frequenzspektren der Bremsmomente des vorderen linken Rades für die unterschiedlichen Kommunikationsintervalle dargestellt sind. Sowohl in den Frequenzspektren der Einzelbremsung, als auch in den Gesamtspektren, die alle Bremsungen eines Kommunikationsintervalls zusammenfassen, ist ein deutlicher Peak bei ca. 37 Hz sichtbar. Dies entspricht der Regelfrequenz des ABS-Steuergerätes und belegt das plausible Regelverhalten aller Kommunikationsintervalle.

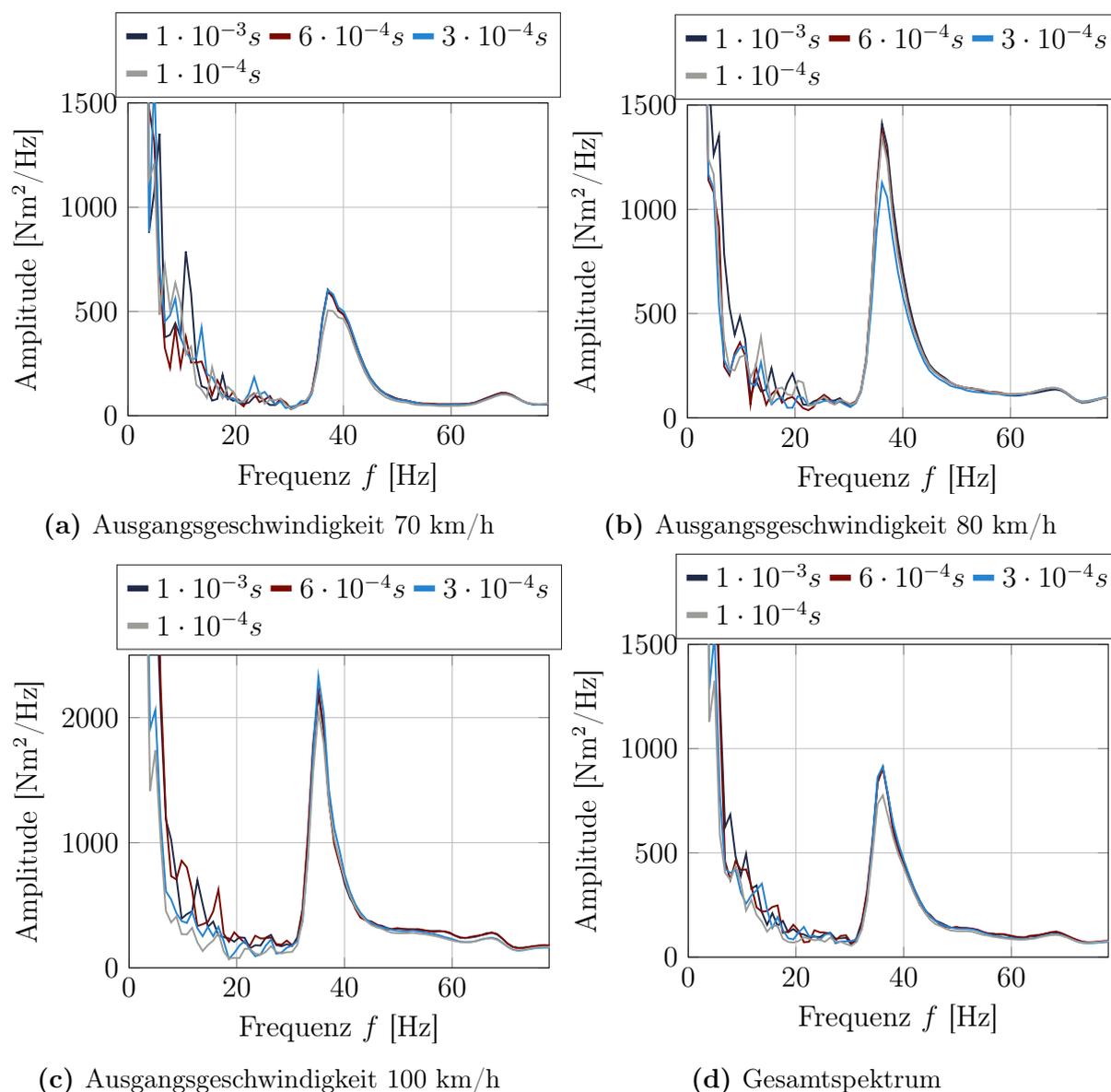


Abb. 5.4: Darstellung der spektralen Leistungsdichte des Bremsmomentes für Vollbremsungen mit verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten

Der Einfluss der untersuchten Kommunikationsintervalle auf die Pseudoschädigung wird in Abbildung 5.5 deutlich, die die normierten Schädigungen des Bremsmomentes der einzelnen Simulationen gegenüberstellt. Deutlich erkennbar ist, dass, unabhängig vom Kommu-

nikationsintervall, mit steigender Anfangsgeschwindigkeit, eine Erhöhung der Belastung und somit der Schädigung eintritt.

Auch der Einfluss des Kommunikationsintervalls wird deutlich. Der bereits beschriebene Einfluss des Kopplungsintervalls auf das Regelverhalten führt zu einer Variation der Schädigung. Die maximal auftretende Abweichung für die untersuchten Bremsungen beträgt hierbei 18 %. Auffällig ist, dass keine Korrelation zwischen der Schädigung und dem Kommunikationsintervall hergestellt werden kann. So führt bei dem 80 km/h-Bremsmanöver die Makroschrittweite von $1 \cdot 10^{-4}$ s zu der größten Schädigung, wohingegen bei der 100 km/h-Vollbremsung die Simulation mit einem Kommunikationsintervall von $6 \cdot 10^{-4}$ s die größte Schädigung hervorruft.

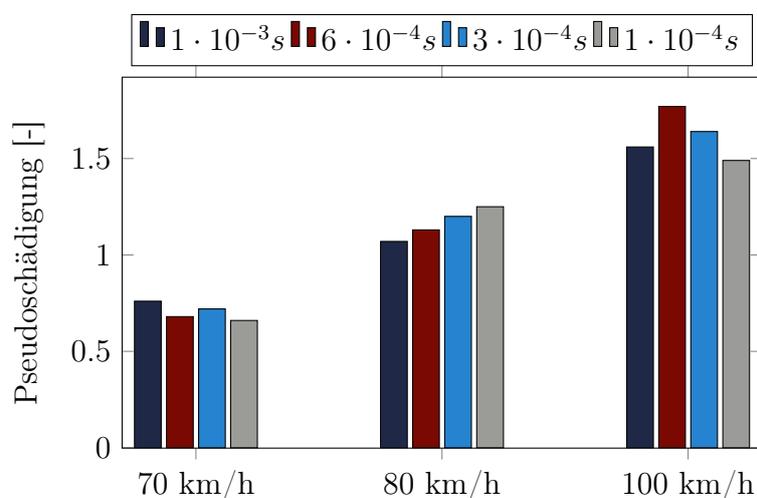


Abb. 5.5: Einfluss des Kommunikationsintervalls auf die normierte Schädigung des Bremsmomentes für Vollbremsungen für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten

5.3 Einfluss der Simulationsschrittweiten

Zusätzlich zur Festlegung des Kommunikationsintervalls ist die Bestimmung der Simulationsschrittweiten für beide Simulationsumgebungen notwendig. Grundsätzlich muss, wie in Abschnitt 4.2 erläutert, zur Sicherstellung der Konsistenz zwischen den ausgetauschten Daten die jeweilige Schrittweite so gewählt werden, dass das Kommunikationsintervall ein ganzzahliges Vielfaches der Schrittweite darstellt.

Da für die meisten kommerziellen, virtuellen Steuergeräte bei der Erstellung eine auf dem realen Steuergerät basierende Schrittweite identifiziert und empfohlen wird, spielt die Identifikation in der Literatur eine untergeordnete Rolle. Auch das in dieser Arbeit verwendete virtuelle Level I-Steuergerät besitzt eine empfohlene Schrittweite. Diese beträgt $1 \cdot 10^{-4}$ s.

Die Identifikation der Schrittweite ist folglich besonders für nicht kommerzielle, virtuelle Level 0-Steuergeräte relevant, bei denen Verhaltensmodelle zur Überprüfung des Regelalgorithmus verwendet werden. Um den Einfluss der Schrittweite auf das Regelverhalten des

Bremsregelsystems zu beleuchten, sind in Abbildung 5.6 die resultierenden Radbremszylinderdruckverläufe bei der Vorgabe der Fahrzustandsgrößen einer Vollbremsung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 100 km/h für verschiedene Simulationsschrittweiten in der CACSD-Simulationsumgebung gegenübergestellt.

Für alle Schrittweiten stimmen die Eingriffszeitpunkte über die gesamte Simulationsdauer gut überein. Lediglich kleine Unterschiede in der Eingriffsintensität sind erkennbar. Diese sind jedoch zu gering, um einen signifikanten Einfluss auf die Schädigung zu bewirken. Es wird deutlich, dass gerade im Vergleich zum signifikanten Einfluss des Kommunikationsintervalls die Auswirkung der Variation der Regelsystem-Simulationsschrittweiten gering ist.

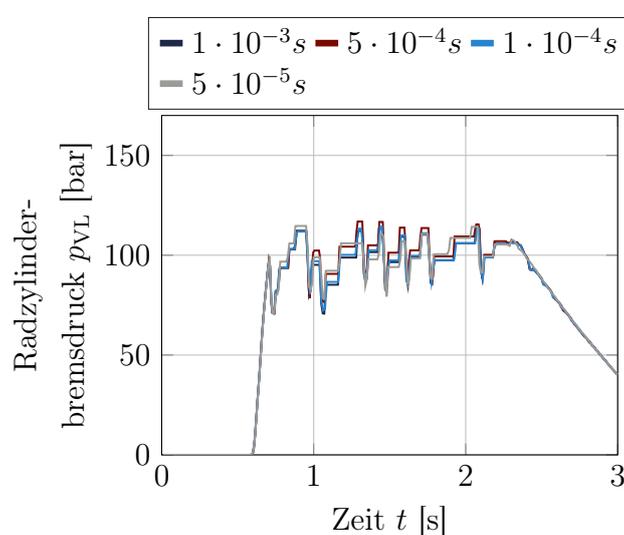


Abb. 5.6: Einfluss der Simulationsschrittweite der CACSD-Simulationsumgebung auf das Regelverhalten des Bremsregelsystems

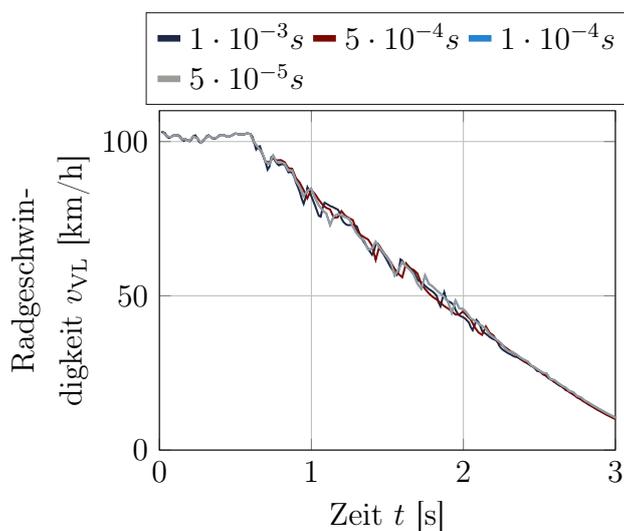


Abb. 5.7: Einfluss der Ausgabeschrittweite der MKS-Simulationsumgebung auf die Radgeschwindigkeit

Neben der Simulationsschrittweite für das Regelsystem wird ebenfalls der Einfluss der Ausgabeschrittweite der MKS-Simulationsumgebung untersucht. Da in ADAMS die variable Schrittweitensteuerung vom Ausgabezeitschritt abhängt, beeinflusst auch dieser Parameter die Simulationsergebnisse [48]. Die MKS-Gesamtfahrzeugsimulation wird bei einem vorgegebenen Druckverlauf in den Bremszylindern für verschiedene Ausgabeschrittweiten verglichen. Die Ergebnisse der Radgeschwindigkeit sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Blockierneigung des Rades ist für alle analysierten Schrittweiten ähnlich. Der Einfluss der Ausgabeschrittweiten ist deutlich geringer als die Variation, die durch die Änderung des Kommunikationsintervalls hervorgerufen worden ist (vgl. Abschnitt 5.2).

Basierend auf den vorgenommenen Untersuchungen führen alle hier betrachteten Mikroschrittweiten sowohl gesamtfahrzeug- als auch regelsystemseitig zu plausiblen und vor allem ähnlichen Ergebnissen. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass die Wahl der Mikroschrittweite keine große Relevanz für die Simulationsqualität besitzt. Bei der Wahl der Mikroschrittweite kann der Fokus daher auf andere Kriterien wie beispielsweise Performanceaspekte gelegt werden.

5.4 Erkenntnisse für die Wahl von Simulations- und Kopplungsparametern

Bei der Variation des Kommunikationsintervalls konnten bei den simulierten Bremsmanövern Unterschiede hinsichtlich Eingriffszeitpunkt und -intensität festgestellt werden. Diese deutlichen, mit der Zeit zunehmenden Regelunterschiede führen zu einer veränderten Belastung und somit zu einer Variation der Schädigung der ins Fahrwerk eingeleiteten Bremsmomente. Je nach Geschwindigkeit der Bremsung führt ein anderes Kommunikationsintervall zu der größten Schädigung, sodass keine klare Korrelation zwischen der Schädigungshöhe und einem spezifischen Kommunikationsintervall hergestellt werden kann.

Bei Auswertungen der auftretenden Bremsmomente im Frequenzbereich konnte trotz der zunehmenden Unterschiede im Zeitbereich für alle Kommunikationsintervalle ein ähnliches Verhalten, inklusive deutlichem Peak bei der charakteristischen ABS-Regelfrequenz, beobachtet werden, was ein realistisches Regelverhalten nahelegt.

Trotz der hohen Sensitivität des Kommunikationsintervalls lässt sich also festhalten, dass alle hier untersuchten Kommunikationsintervalle ein plausibles Regelverhalten ermöglichen und somit keine klare Empfehlung für ein bestimmtes Intervall auf Basis des hier analysierten Regelverhaltens möglich ist. Auch aus Performancesicht sind keine deutlichen Unterschiede für die verschiedenen Kommunikationsintervalle feststellbar, welche eine fundierte Festlegung für ein Kommunikationsintervall erlauben würden. Da die Kommunikationsintervalle auf Basis der in Abschnitt 5.1 zusammengefassten Empfehlungen gewählt wurden, kann die Nützlichkeit dieser Faustregeln für die Wahl des Kommunikationsintervalls bestätigt werden. Für eine konsistente Vergleichbarkeit mit den in [48] erzielten Ergebnissen wird in dieser Arbeit ein Kommunikationsintervall von $1 \cdot 10^{-4}$ s,

angelehnt an die dortige Parameterauswahl, verwendet.

Neben der Plausibilisierung der Kommunikationsintervalle konnte mithilfe des transparenten Level 0-Steuergerätes die Ursache für den Einfluss des Kommunikationsintervalls auf das Regelverhalten identifiziert und analysiert werden. Die hohe Sensitivität ist auf Diskretisierungsunterschiede der auszutauschenden Größen zurückzuführen, welche aus der Veränderung des Kommunikationszeitpunktes resultieren. Da sich diese Diskretisierungsunterschiede selbstverstärken und somit zu zunehmenden Unterschieden führen, ist eine Vergleichbarkeit im Zeitbereich nicht zielführend. Eine zentrale, wissenschaftliche Erkenntnis dieser Untersuchung ist folglich, dass beim Vergleich und Plausibilisieren von Regelverhalten in Cosimulationen eine Auswertung im Frequenzbereich notwendig ist. Diese Erkenntnis wird auch im weiteren Verlauf der Arbeit durch systematische Vergleiche im Frequenzbereich berücksichtigt und als methodischer Ansatz für nachfolgende wissenschaftliche Arbeiten empfohlen.

Die Variation der Mikroschrittweite der Regelsystemsimulation hat kaum Einfluss auf die Ergebnisse der simulierten Bremsmanöver gezeigt. Es besteht daher keine Notwendigkeit von der vom Zulieferer empfohlenen Schrittweite von $1 \cdot 10^{-4}$ s abzuweichen. Durch die Adaption der variablen Schrittweite in ADAMS, um die Bewegungsgleichungen genau für den Ausgabezeitpunkt zu lösen, beeinflusst auch die Ausgabeschrittweite die Simulationsergebnisse. Auch hier liegen die Einflüsse jedoch in einer vernachlässigbaren Größenordnung vor, sodass aus rein performancetechnischen Gründen eine Ausgabeschrittweite von $1 \cdot 10^{-3}$ s gewählt worden ist. Dies reduziert verglichen mit einer Ausgabeschrittweite von $1 \cdot 10^{-4}$ s durch die deutlich kleinere Ergebnisdatei die Rechenzeit um ca. 30 %, besitzt jedoch eine noch ausreichend hohe Ausgabefrequenz um die ermüdungsrelevanten Schwingungen korrekt aufzuzeichnen.

Eine Übersicht der weiteren numerischen Parameter dieser Arbeit ist in Tabelle 5.2 zusammengetragen. Sie orientieren sich an den Festlegungen von verschiedenen Veröffentlichungen [48, 8, 2], in denen ebenfalls Cosimulationen von Regelsystemen untersucht werden.

Tabelle 5.2: Übersicht der verwendeten Simulations- und Kopplungsparameter

Parameter	Einstellung
Simulinksolver	Classical Runge-Kutta (ODE4)
Simulinkschrittweite	$1 \cdot 10^{-4}$ s
ADAMS/Solver	ConstantBDF
ADAMS-Formulierung	SI2
ADAMS-Schrittweiten	
Min. Schrittweite	$1 \cdot 10^{-10}$ s
Anfangsschrittweite	$5 \cdot 10^{-6}$ s
Max. Schrittweite	$1 \cdot 10^{-4}$ s
Corrector	modified
Erlaubter Integrationsfehler	$1 \cdot 10^{-3}$
Kommunikationsintervall	$1 \cdot 10^{-4}$ s

Kapitel 6

Integration des Bremsregelsystems zur Lastdatenbestimmung

In diesem Kapitel wird die Fragestellung behandelt, welche Simulations- und Abbildungsgüte bei der Integration des tatsächlich verbauten Bremsregelsystems in das Gesamtfahrzeugmodell hinsichtlich der betriebsfestigkeitsrelevanten Lasten erzielt werden kann. Hierzu erfolgt zunächst eine Bewertung der grundsätzlichen Eignung des Fahrzeug- und Reifenmodells mithilfe der Open-Loop-Methodik. Anschließend wird die Möglichkeit zur simulativen Reproduktion einzelner Bremsungen bei ebenen und unebenen Straßenverhältnissen durch systematische Gegenüberstellung von Simulations- und Messdaten untersucht und bewertet. Zur Beurteilung der Abbildungsqualität sowie zur Einordnung der Simulationsergebnisse des zertifizierungsrelevanten Dauerlaufkurses wird dann die Streuung in realen Messdaten analysiert sowie die Möglichkeiten zur simulativen Reproduktion dieser Messstreuung beleuchtet. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgt eine eingehende Bewertung der Dauerlaufsimulation.

6.1 Untersuchung der Abbildungsqualität der Fahrbahn-Fahrzeug-Interaktionen

Für eine realistische Repräsentation von Bremsmanövern im Simulationsprozess ist die korrekte Darstellung der Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn fundamental. Nachdem in Kapitel 3.2 die kinematische Funktionsfähigkeit im Rahmen der Validierung des Fahrzeugmodells demonstriert worden ist, befasst sich dieser Abschnitt mit der Frage nach der Eignung des Gesamtfahrzeug- und Reifenmodells für die geplanten Untersuchungen. Für diese Bewertung wird die in den Arbeiten von Mack [48] und Brandes [8] empfohlene Open-Loop-Methodik herangezogen. Die zugrunde liegende Idee dieses Ansatzes ist es, Bremsmomente aus realen Messungen in der Simulation dem Gesamtfahrzeug vorzugeben

und anschließend die resultierende Beschleunigung, den Bremsweg und die Bremsdauer zu bewerten.

Zur Validierung der Simulationsparameter wird der Reibwert für den Reifen-Fahrbahn-Kontakt, i. A. Reibungskoeffizient der Straße genannt, mittels einer initialen Messung justiert, um eine Übereinstimmung zwischen der simulierten und der empirisch erfassten Bremswirkung zu gewährleisten. Mit diesem kalibrierten Straßenreibwert und einer weiteren Messung können dann die charakteristischen Parameter für die Bremsmanöver sowie die für die Untersuchung relevanten Größen abgeglichen und bewertet werden.

Der vorgestellte Ansatz bietet den entscheidenden Vorteil, dass die Einflüsse des Regelungssystems für die Evaluierung eliminiert werden können. Dadurch wird ermöglicht, die Eignung des implementierten Fahrzeugmodells und des FTire-Reifenmodells isoliert zu bewerten, ohne die Notwendigkeit, die Komplexität der Regelungssysteme berücksichtigen zu müssen. Diese Methodik präsentiert somit in dieser Arbeit einen strukturierten Prozess zur Beurteilung und Validierung von Fahrzeug- und Reifenmodellen hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Generierung realitätsnaher Fahrwerkslastdaten.

Zur Bestimmung des Straßenreibwerts wird ein Vollbremsmanöver auf trockener Straße bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h herangezogen. Für die Evaluierung der Modellcharakteristika und die Analyse der Fahrwerksbelastungen wird eine Bremsung bei gleicher Ausgangsgeschwindigkeit verwendet. Diese Ausgangsgeschwindigkeit entspricht der während des Dauerlaufkurses auftretenden, auslegungsrelevanten Bremsgeschwindigkeit und wurde daher für die Open-Loop-Bewertung ausgewählt.

In Abbildung 6.1 wird der Einfluss des Reibungskoeffizienten auf den simulierten Bremsvorgang veranschaulicht. Dazu sind die bremscharakteristischen Kenngrößen wie die Bremsdauer, der Bremsweg und die mittlere Verzögerung dargestellt. Aus der Abbildung geht deutlich hervor, dass die Haftung zwischen Reifen und Fahrbahn einen unmittelbaren Einfluss auf die Effizienz des Bremsvorgangs hat. Mit steigendem Reibungskoeffizienten, also einer zunehmenden Haftung zwischen Reifen und Fahrbahn, kann eine größere Kraft übertragen werden. Dies resultiert in einer verstärkten Bremswirkung, was sich in kürzeren Bremswegen und kürzeren Bremsdauern, sowie einer höheren mittleren Verzögerung äußert (vergleiche Abschnitt 2.3.2).

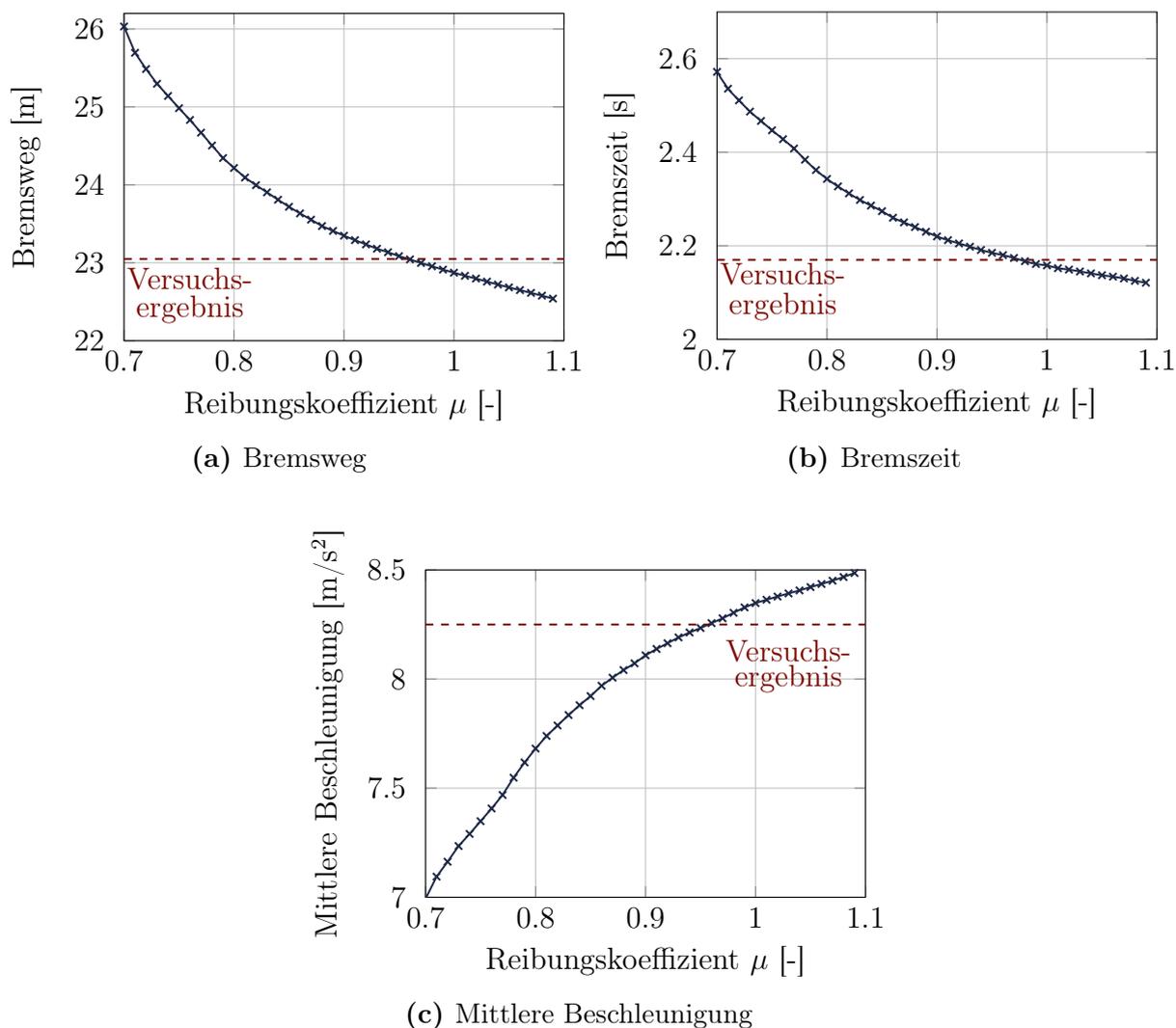


Abb. 6.1: Simulationsergebnisse zum Einfluss des Reibungskoeffizienten auf grundsätzliche Bremsseigenschaften

Zusätzlich sind in der Abbildung die Charakteristika der zugrundeliegenden, realen Bremsmessung aufgeführt. Für einen Reibungskoeffizienten von etwa $\mu = 0.96$ ist eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den real gemessenen Bremscharakteristika sichtbar. Dies entspricht einem typischen Reibungskoeffizienten für trockene Straßenbedingungen [72] und ist für die ebenfalls bei trockenen Bedingungen durchgeführten Versuche plausibel. Folglich wird für die weiteren Untersuchungen ein Reibungskoeffizient von $\mu = 0.96$ verwendet.

Nachdem der Straßenreibwert mittels der initialen Messung identifiziert und kalibriert worden ist, kann die Bewertung des Fahrzeug- und Reifenmodells hinsichtlich der Ermittlung von Fahrwerkslastdaten mithilfe einer weiteren Messung durchgeführt werden. Die Simulationsergebnisse dieses Bremsvorgangs werden in Abbildung 6.2 der realen Messung gegenübergestellt. In Abbildung 6.2a ist die Fahrzeuggeschwindigkeit während des Bremsvorgangs dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Bremswirkung für die gesamte Bremsung. Der in der Simulation erkennbare Überschwingeffekt bei Fahrzeugstill-

stand bei etwa 2.95 s lässt sich durch die Verwendung der Schwerpunktgeschwindigkeit zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit erklären. Die bei der Bremsung auftretende, dynamische Achslastverschiebung und die damit einhergehende Nickbewegung werden bei Stillstand abgebaut und sorgen für das hier beobachtete Überschwingphänomen.

Die gute Reproduktion des Bremsvorgangs lässt sich auch bei den Längskräften am linken Vorder- und Hinterrad, in Abbildung 6.2b und 6.2c dargestellt, erkennen. Sowohl die während des Bremsvorgangs auftretenden Kräfte, als auch die nach Fahrzeugstillstand auftretenden Kraftschwingungen, welche für die Betriebsfestigkeitsuntersuchungen von Fahrwerksbauteilen wie beispielsweise dem Radlager besonders relevant sind, lassen sich simulativ gut abbilden.

In Abbildung 6.2d und 6.2e sind exemplarisch, für die Abbildung der ins Fahrwerk eingeleiteten Kräfte, die Ergebnisse für den vorderen, unteren Querlenker an der Vorder- und Hinterachse gegenübergestellt. Sowohl an der Vorder-, als auch an der Hinterachse lassen sich die Kraftverläufe mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit abbilden.

Zur Quantifizierung dieser qualitativ ermittelten Erkenntnisse ist in Abbildung 6.2f die Pseudoschädigung für die hier betrachteten Kräfte gegenübergestellt. Sowohl für die Brems-, als auch für die Fahrwerksbauteilkräfte sind die Abweichungen der äquivalenten Schädigungen verglichen mit der Messung geringer als 50 %, was als gute Übereinstimmung gilt.

Abschließend lässt sich feststellen, dass durch die Anwendung der Open-Loop-Methode die Validität des Modells sowohl in Bezug auf die Nachbildung des Bremsvorgangs, als auch hinsichtlich der Ermittlung der Fahrwerkslasten bestätigt werden konnte. Somit kann das Modell für die weiterfolgenden Untersuchungen des Einflusses des Bremsregelsystems genutzt werden.

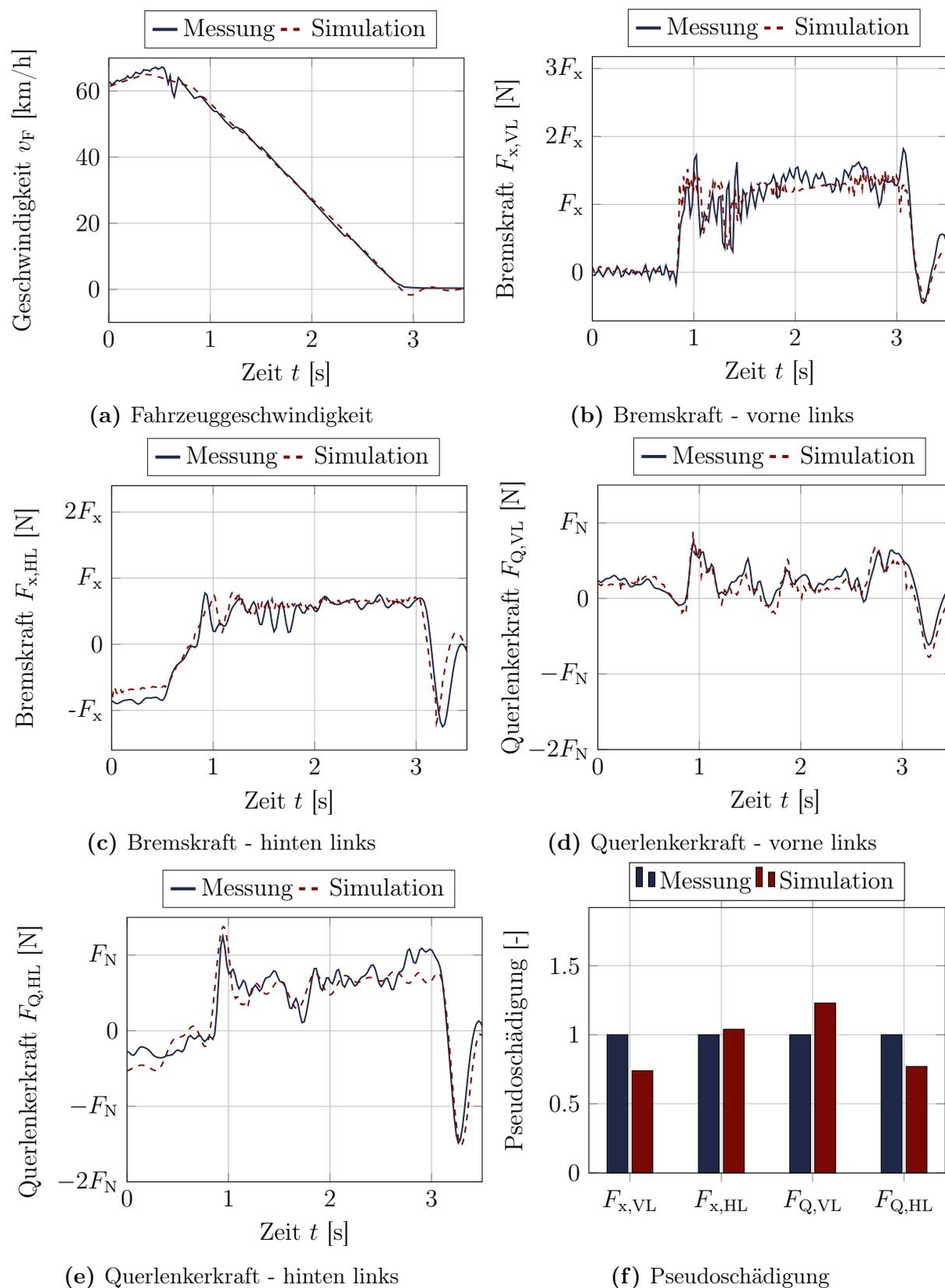


Abb. 6.2: Gegenüberstellung von Fahrzeuggrößen aus Messung und Simulation für eine 60km/h-Vollbremsung

6.2 Reproduktion einzelner Bremsmanöver

Nach der Untersuchung des Gesamtfahrzeugmodells auf seine grundsätzliche Eignung wird in diesem Abschnitt die Abbildungsqualität des virtuellen Regelungssystems betrachtet. Dazu werden durch die Vorgabe des Hauptbremszylinderdrucks aus Messdaten einzelne Bremsmanöver auf ebener sowie unebener Straße simulativ reproduziert und durch den Abgleich der Fahrwerkskräfte die erreichbare Güte der Lastdatenbestimmung unter Einbindung des Bremsregelsystems diskutiert.

6.2.1 Bremsung auf ebener Straße

Zur Bewertung der Abbildungsqualität ist neben den auftretenden Bauteilkräften auch die grundsätzliche Bremswirkung relevant. In Abbildung 6.3 ist das Bremsverhalten einer Bremsung bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h mit den zugehörigen Messdaten gegenübergestellt. In Abbildung 6.3a ist die Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt. Es wird deutlich, dass in der Simulation eine unrealistisch starke Bremswirkung vorherrscht. Der Grund hierfür ist in Abbildung 6.3b zu sehen, in der die Radgeschwindigkeit des vorderen linken Rades dargestellt ist. In der Simulation ist eine deutlich kleinere Blockierneigung des Rades gegeben. Dies führt zu einer besseren Ausnutzung des Haftbeiwertes und somit zu einer größeren Bremskraft, was die deutlich effizientere Bremsung erklärt.

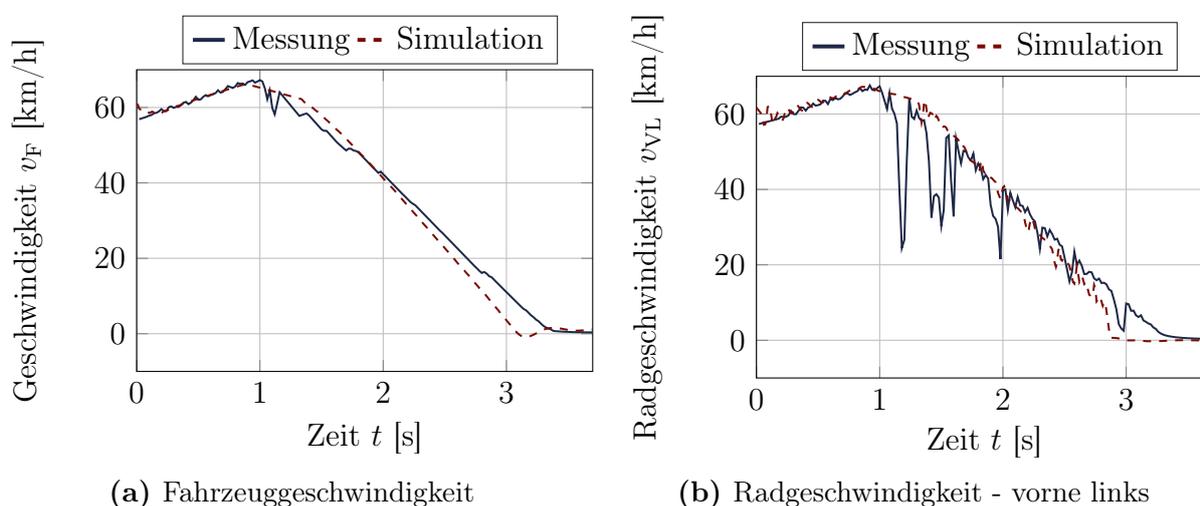


Abb. 6.3: Ursprüngliche Simulationsergebnisse für Vollbremsung bei einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h

Da der Reibwert der Fahrbahnoberfläche bereits im vorherigen Abschnitt validiert wurde, kann die überproportionale Bremswirkung nicht auf diesen, sondern nur auf das Einwirken des Bremsregelsystems zurückgeführt werden: Dieses reagiert in der Simulation zu effizient, sodass kein Blockieren der Räder auftritt. Der Grund hierfür ist das ver-

zögerungsfreie Aufbringen des vom Bremsdruck hervorgerufenen Bremsmoments. In der Realität existiert durch Trägheiten des hydraulischen Systems eine Verzögerung zwischen Aufbringen des Bremsdrucks und Einstellen des Bremsmoments. Die Verzögerungszeit liegt zwischen 50 ms und 250 ms und variiert je nach Bremssystem [35, 60]. In der Publikation von Koch et al. [40] werden beispielsweise 50 ms angenommen.

Der Einfluss dieser Verzögerung ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Wie in Abbildung 6.4a zu sehen, nimmt die Bremswirkung und somit die Effizienz des Bremsregelsystems mit zunehmender Verzögerung ab, was zu einer langsameren Abbremsung des Fahrzeugs führt. Diese abnehmende Effizienz ist auch in Abbildung 6.4b deutlich erkennbar, in der die Radgeschwindigkeit dargestellt ist. Mit zunehmender Verzögerungszeit reagiert das System träger auf die Blockierung des Rades, was zu einer deutlicheren Blockierwirkung und somit zu einer verminderten Bremsleistung führt. Ab einer Verzögerungszeit von 200 ms tritt sogar ein vollständiges Blockieren der Räder auf, sodass eine Untersuchung höherer Verzögerungszeiten nicht zielführend ist.

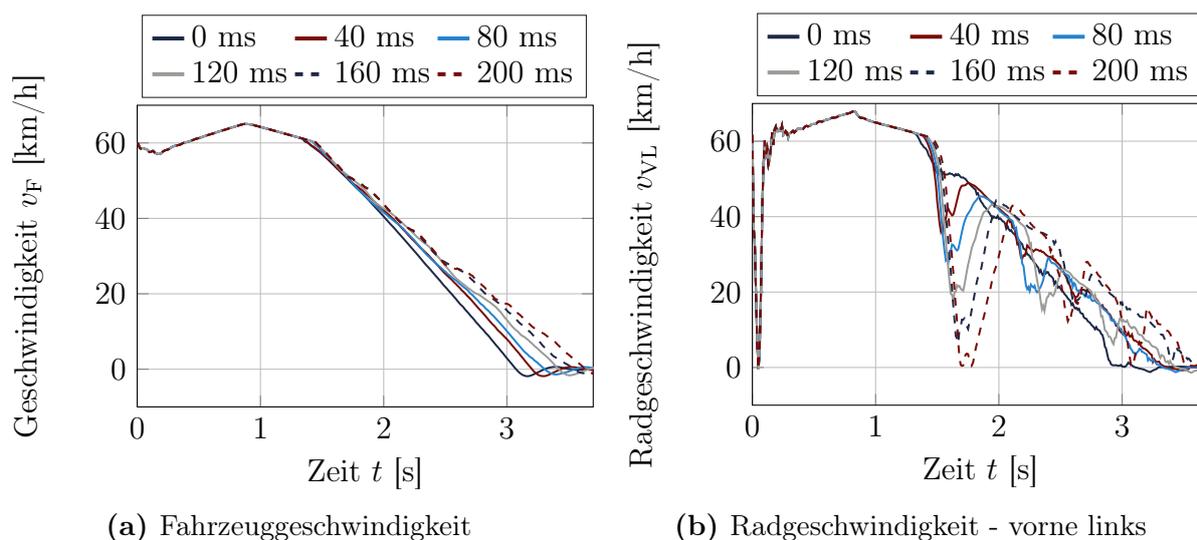


Abb. 6.4: Einfluss der Verzögerungszeiten auf den Bremsverlauf

Für die Bestimmung einer angemessenen Verzögerung des vorliegenden Bremssystems wird eine weitere Validierungsmessung herangezogen. Hierbei dient der Abgleich des maximal auftretenden Schlupfes, repräsentativ für die Blockierneigung des Rades, beim ersten Regelungseingriff als Validierungskriterium. In Abbildung 6.5 sind die Ergebnisse dieses Validierungsvorgangs dargestellt. Es ist zu beobachten, dass sowohl an der Vorder-, als auch an der Hinterachse die beste Abbildungsqualität bei einer Verzögerungszeit von ca. 100 ms erreicht wird. Dieser ermittelte Wert bildet die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen und Analysen.

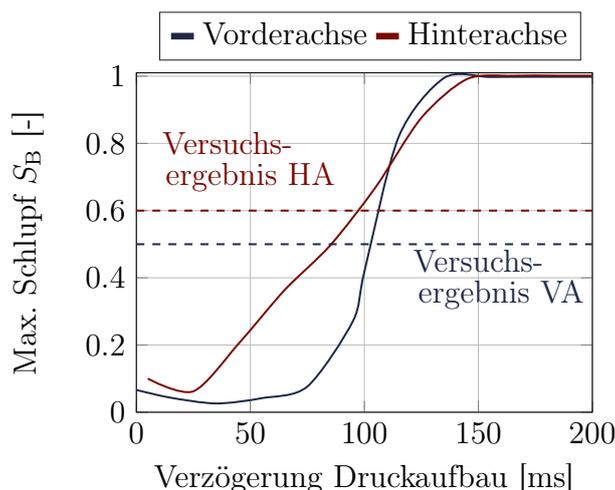


Abb. 6.5: Einfluss der Verzögerung des Druckaufbaus auf den maximalen Schlupfwert beim ersten Regeleingriff

Durch die Einführung der Verzögerungszeit bei der Übertragung der Bremsdrücke kann eine deutliche Verbesserung bei der Abbildung des Bremsvorgangs erzielt werden. Die Auswirkungen der Einführung der Verzögerungszeit sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Neben den einzelnen Simulationsergebnissen ist auch die geglättete Einhüllende dargestellt, welche den Schädigungsraum bzw. den auftretenden Kraftbereich kennzeichnet. Abbildung 6.6a zeigt den Gesamtgeschwindigkeitsverlauf von Simulation und Messung, welche eine gute Übereinstimmung hinsichtlich des Gesamtgeschwindigkeitsverlaufs und somit auch hinsichtlich des Bremsweges und der Bremszeit aufweisen. Der zeitliche Verlauf der Radgeschwindigkeit ist in Abbildung 6.6b exemplarisch für das linke Vorderrad dargestellt. Dort werden Abweichungen in den genauen Eingriffsmomenten und -intensitäten durch das Regelsystem deutlich. Wie in Abschnitt 5.3 bereits erörtert, ist es zweckmäßig, die Übereinstimmung der Signale im Frequenzbereich zu betrachten, um die Plausibilität des Regelverhaltens in der Simulation zu bewerten. Dies ist in Abbildung 6.6c dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es eine hohe Übereinstimmung zwischen der Messung und der Simulation über den gesamten, relevanten Frequenzbereich gibt. Besonders relevant für die Bewertung des Regelverhaltens ist die Reproduktion der Regelfrequenz, welche durch den ausgeprägten Peak deutlich erkennbar ist und in diesem Fall bei ca. 12 Hz liegt. Folglich bestätigt sich dadurch das plausible und realistische Verhalten der simulierten Bremsmessung. Diese Plausibilität wird weiter durch den Vergleich der im Fahrwerk auftretenden Kräfte in Abbildung 6.6d und 6.6e bestätigt. Sowohl an der Vorder-, als auch an der Hinterachse zeigen die Querlenkerkräfte mit den Messdaten übereinstimmende Resultate. Zur Quantifizierung der visuellen Übereinstimmung ist in Abbildung 6.6f die äquivalente Pseudoschädigung für die Querlenkerkräfte und die Bremskraft dargestellt. Die Abweichung der Schädigung liegt für alle betrachteten Kräfte unterhalb von 50 %, was eine hohe Übereinstimmung zwischen den simulierten und den gemessenen Ergebnissen belegt [89].

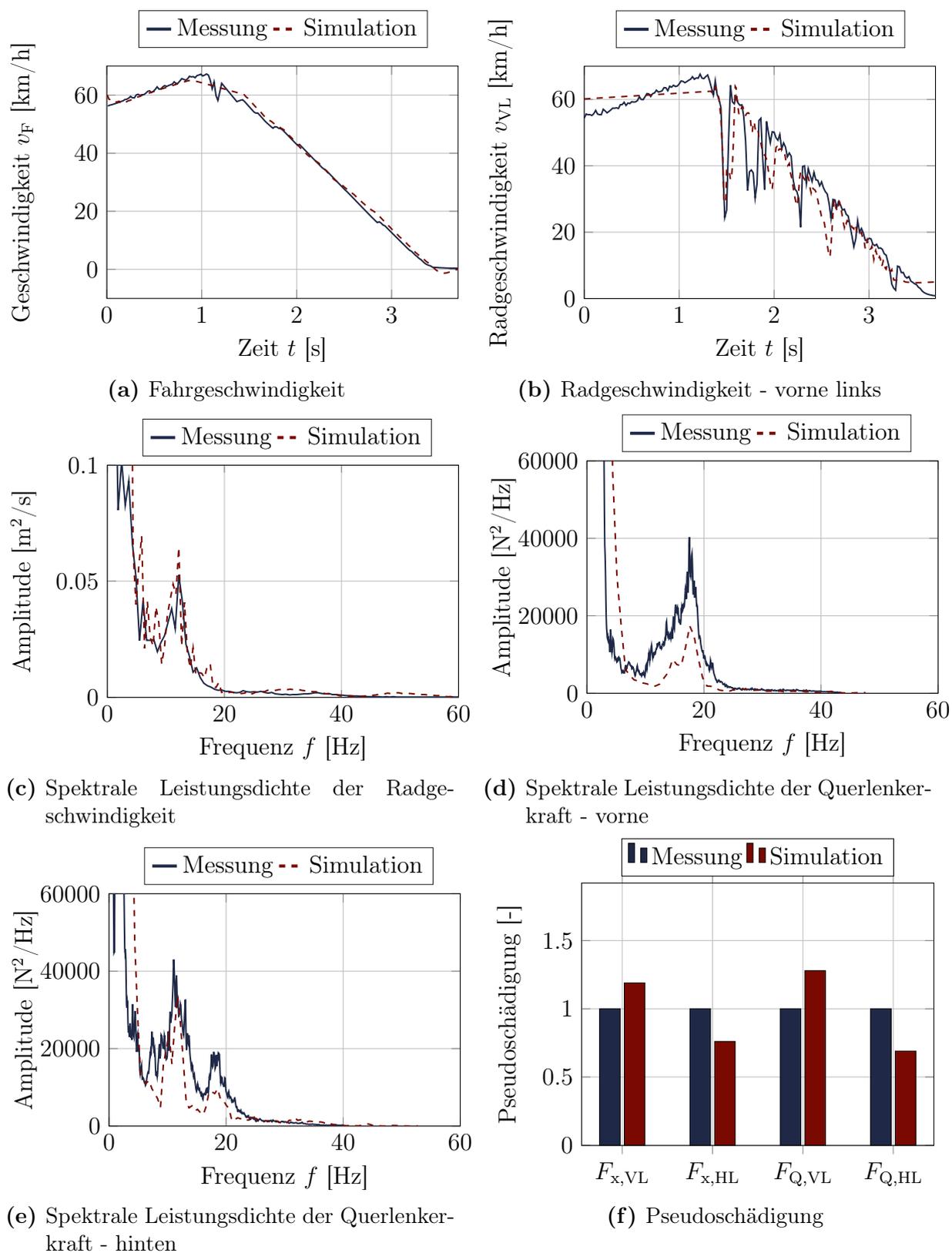


Abb. 6.6: Abgleich ausgewählter Fahrgrößen für eine 60 km/h-Vollbremsung mit validierter Verzögerungszeit auf ebener Straße

Es ist festzuhalten, dass sich bei der Integration von Bremsregelsystemen bei Berücksichtigung realistischer Verzögerungen im Übertragungsverhalten auf ebener Straße eine gute Reproduktion des Bremsverhaltens und der auftretenden Lasten erzielen lässt. Da die Wahl eines geeigneten Verzögerungswertes als entscheidend für die Abbildungsqualität bei der Einbindung des Regelsystems identifiziert wurde, soll die Auswirkung auf die Ergebnisqualität untersucht und dadurch der notwendige Aufwand für die Parametrierung abgeschätzt werden.

In Abbildung 6.7 ist dafür der Zusammenhang zwischen Verzögerungszeit und Querlenkerkraft an der Vorderachse dargestellt. Abbildung 6.7a verdeutlicht die Korrelation zwischen der Pseudoschädigung und der Verzögerungszeit. Bei geringen Verzögerungszeiten bis etwa 50 ms sind kaum Unterschiede in der Pseudoschädigung zu erkennen. In diesem Zeitbereich ist das Ansprechverhalten des Regelsystems so effizient, dass signifikante Drehzahleinbrüche und somit umfangreiche Eingriffe des Regelsystems verhindert werden können. Infolgedessen trägt das Regelsystem in diesem Zeitbereich nicht in relevantem Maße zur Schädigung bei, die in diesem Bereich primär durch die ins Fahrwerk eingeleiteten Bremskräfte bestimmt wird.

Ab einer Verzögerungszeit von 50 ms beginnt die Pseudoschädigung steigende Fluktuationen und einen inkrementellen Anstieg aufzuweisen. In dieser Phase führt die erhöhte Reaktionszeit des Regelsystems zu einer stärker werdenden Radblockierung, wie sie in Abbildung 6.4b bereits für die Validierungsmessung aufgezeigt wurde. Das zunehmende Blockieren des Rads bedingt intensivere Regelsystemeingriffe, die in steigenden Schädigungswerten resultieren. Mit einer Verzögerungszeit über 150 ms stabilisiert sich die Schädigung auf einem erhöhten Niveau, hervorgerufen durch vollständig blockierte Räder, die konstant maximale Eingriffe des Regelsystems erfordern. Aufgrund der Darstellung der Schädigungswerte für eine einzige spezifische Messung ist eine hohe Streuung dieser Schädigungswerte zu beobachten. In Abbildung 6.7b ist die jeweils zugehörige maximale, auftretende Kraft während des Bremsvorgangs dargestellt, deren Verlauf analog erklärbar ist.

Die Ausführungen verdeutlichen die hohe Relevanz der Identifikation der Verzögerungszeit. Eine einfache Festlegung im realistischen Bereich, der laut Isermann [35] zwischen 50 ms und 250 ms variiert, ist unzureichend, da die Entscheidung einen maßgeblichen Einfluss auf die Fahrwerklasten nimmt. Zur Einschätzung der notwendigen Genauigkeit bei der Festlegung der Verzögerungszeit wird in Abbildung 6.7 eine Abweichung von $\pm 10\%$ um die hier validierte Verzögerungszeit von 100 ms verstärkt betrachtet. Das Ergebnis zeigt Abweichungen von 10 % in der maximalen Kraft und etwa 38 % in der Schädigung, was eine Bestimmung in der Größenordnung von 10 ms angesichts bestehender Unsicherheiten im System, wie beispielsweise der Modellierung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts, rechtfertigt. Diese neuartigen Erkenntnisse hinsichtlich der Verzögerungszeit, die durch das detaillierte Aufzeigen und Quantifizieren des Einflusses des Parameters gewonnen

wurden, stellen folglich eine wesentliche Orientierungshilfe für den notwendigen Parametrierungsaufwand sowie eine Grundlage zur Interpretation der Ergebnisse in zukünftigen wissenschaftlichen Untersuchungen von Bremssimulationen dar.

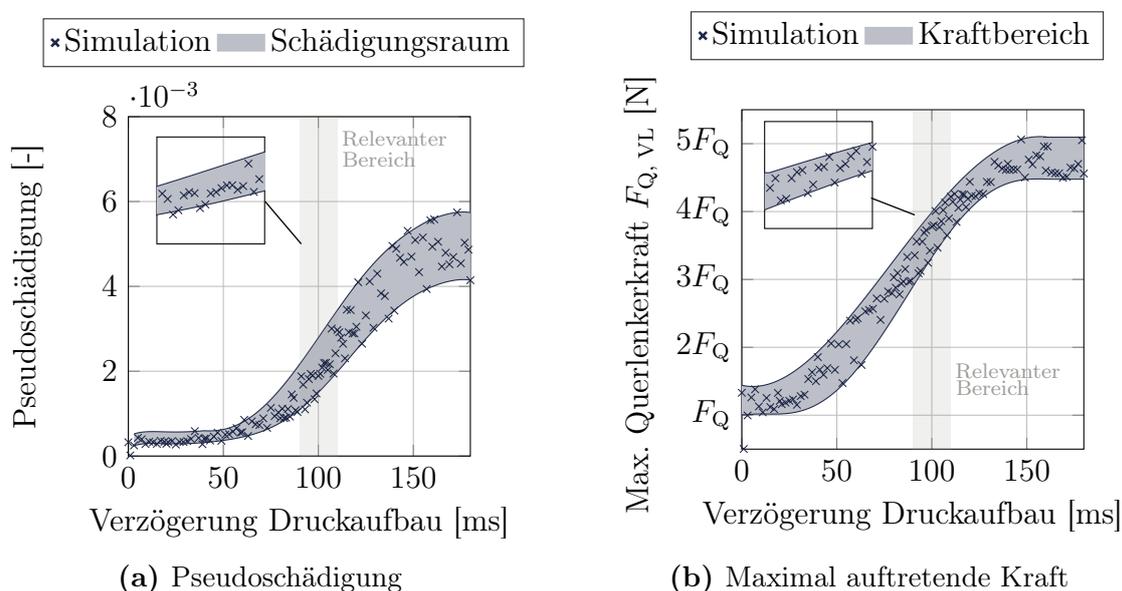


Abb. 6.7: Einfluss der Verzögerungszeit auf die vordere Lenkerkraft bei einer Vollbremsung auf ebener Straße

6.2.2 Bremsung auf unebener Straße

Nach der Identifizierung der erreichbaren Simulationsgüte eines Bremsvorgangs auf ebener Strecke wird in diesem Abschnitt die Ergebnisqualität bei Bremsungen auf unebenem Untergrund bewertet. Bei der betriebsfesten Auslegung von Fahrwerkskomponenten sind Bremsvorgänge auf unebenen Fahrbahnen von signifikanter Bedeutung, da dabei die durch das Bremsregelsystem induzierten Kräfte mit den durch die Unebenheiten des Bodens in das Fahrzeug eingeleiteten Kräften überlagert werden. Dieses Zusammenwirken des hochdynamischen Bremsprozesses bei gleichzeitigen Anregungen der Straße führt zu einer Komplexitätssteigerung im Vergleich zur Abbildung klassischer Bremsvorgänge auf ebenen Oberflächen [93, 8].

In Abbildung 6.8 werden die Simulationsergebnisse einer Vollbremsung mit einer nominalen Startgeschwindigkeit von 60 km/h den entsprechenden tatsächlichen Messergebnissen gegenübergestellt. Zur Ermittlung dieser Ergebnisse wurden die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich einer geeigneten Verzögerungszeit aus dem vorherigen Abschnitt berücksichtigt. Auch die in der Messung beobachtete geringfügige Überschreitung der nominalen Startgeschwindigkeit wurde in der Simulation für einen akkuraten Vergleich miteinbezogen. Analog der im vorangegangenen Abschnitt erzielten Ergebnisse für ebene Untergründe zeigt sich auch hier eine gute Korrelation in der Bremswirkung zwischen Simulation und Messung. Wie in Abbildung 6.8a ersichtlich, sind der Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit und damit das grundlegende Verhalten sehr präzise reproduzierbar.

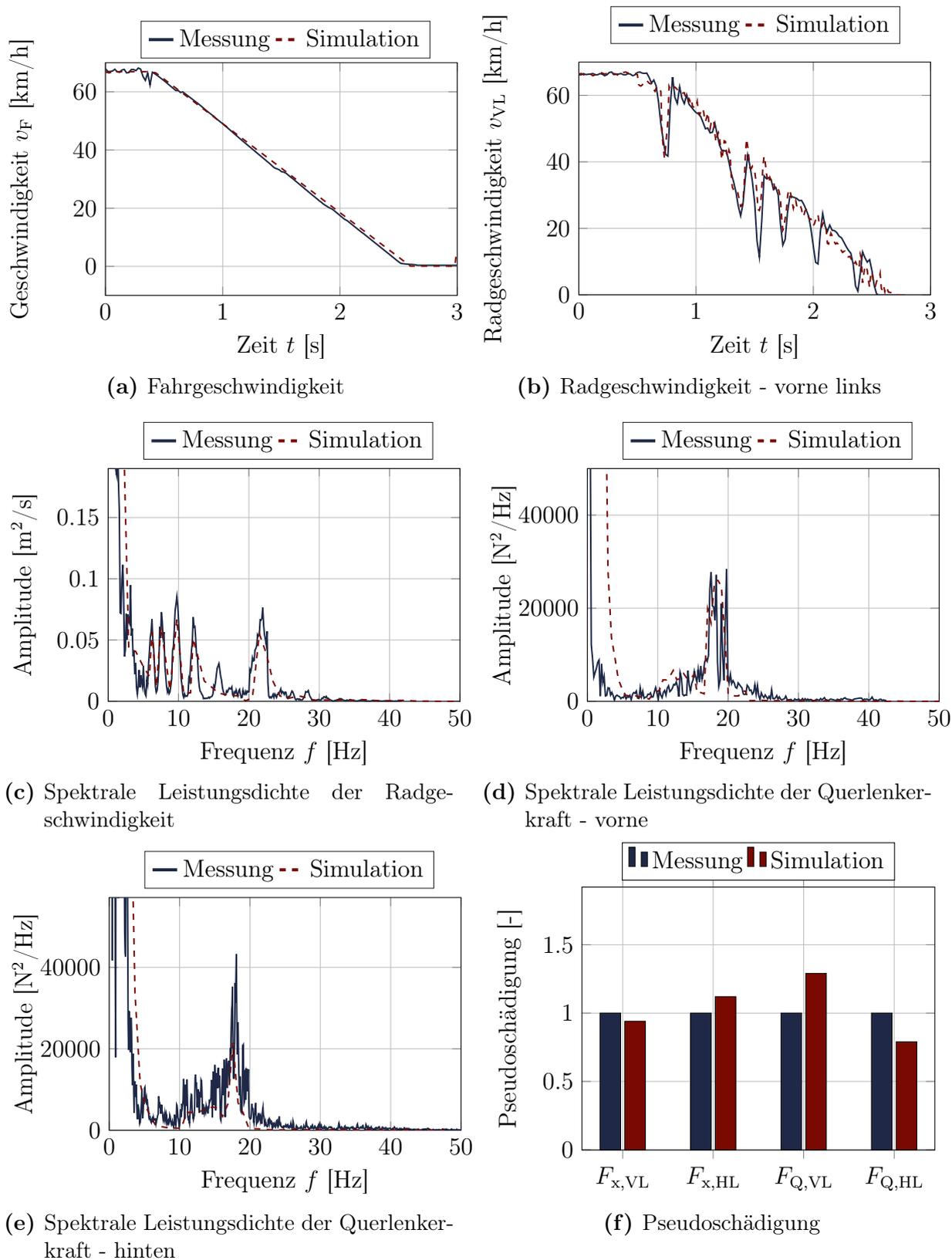


Abb. 6.8: Abgleich ausgewählter Fahrgrößen für eine 60 km/h-Vollbremsung mit validierter Verzögerungszeit auf unebener Straße

Aus der Betrachtung von Abbildung 6.8b und 6.8c wird ersichtlich, dass die erzielte Übereinstimmung aus einer guten Abbildung des Regelverhaltens resultiert. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Raddrehzahl in Abbildung 6.8b illustriert, dass durch die Simulation sowohl das Blockierverhalten des Rades, als auch der Eingriff des Regelsystems gut bestimmt werden können. Dies wird weiterhin durch die Übereinstimmung der charakteristischen Regelfrequenz von etwa 23 Hz zwischen den Messdaten und der Simulation in Abbildung 6.8c belegt. Verglichen mit dem Leistungsspektrum, welches bei einer Bremsung auf ebener Straße bestimmt worden ist, treten noch weitere charakteristische Peaks bei geringen Frequenzen auf. Diese resultieren aus Anregungen bedingt durch die Straßenebenheiten, welche ebenfalls in der Simulation gut nachgebildet sind.

In den Abbildungen 6.8d und 6.8e wird die spektrale Leistungsdichte der Querlenkerkräfte an der Vorder- und Hinterachse visualisiert, die aufgrund der Bodenunebenheiten ein ausgeprägteres Rauschen aufweisen, als in den Darstellungen des vorherigen Abschnitts. Auch in diesen Abbildungen ist eine deutliche Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Daten erkennbar.

Abbildung 6.8f veranschaulicht die quantitative Übereinstimmung zwischen den Pseudoschädigungen der Simulation und der Messungen für Lenker- und Bremskräfte. Hierbei zeigen die simulativ ermittelten Rad- und Querlenkerkräfte an der Vorder- und Hinterachse eine maximale Abweichung von 29 %.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die im vorherigen Abschnitt vorgenommenen Anpassungen auch bei unebenen Fahrbahnen eine sehr gute Übereinstimmung mit den realen Bremsmessungen erzielen. Die erreichte Genauigkeit in der Nachbildung dieser Manöver liegt auf einem ähnlichen Niveau wie bei Bremsvorgängen auf ebenen Straßen, sodass eine Verminderung der Abbildungsqualität, wie zuvor in [48] erwähnt, in diesen Fällen nicht beobachtet werden kann.

6.3 Reproduktion der Messstreuung

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Reproduktion einzelner Bremsmessungen bei Vorgabe des Bremsdrucks untersucht wurde, wird in diesem Abschnitt der Fokus auf die Bewertung der Simulationsgüte bei Berücksichtigung des Fahrermodells gelegt. Dies bedeutet, dass im Gegensatz zu den vorherigen Untersuchungen lediglich die reinen Fahrmanöver vorgegeben werden und der Bremsdruck innerhalb der Simulation bestimmt und an die jeweilige Fahrsituation angepasst wird. Analog zu den vorangegangenen Betrachtungen wird hierbei eine Vollbremsung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h untersucht. Da auch bei Fahrzeugmessungen bei Vorgabe eines Bremsmanövers die Fahrwerkslasten einer gewissen Streuung unterliegen, kann zur Bewertung der Abbildungsqualität die Simulation nicht ausschließlich mit einer einzelnen, spezifischen Messung abgeglichen werden. In einem ersten Schritt wird daher die auftretende Streuung der Fahrwerkslasten

in den Messdaten analysiert. Auf der Grundlage des dabei identifizierten, realistischen Lastbereichs wird anschließend die Simulation bewertet. Zudem wird eine Sensitivitätsanalyse der Simulationsparameter betrachtet, um zum einen zu bestimmen, in welchem Umfang die in der Realität auftretende Streuung in der Simulation wiedergegeben werden kann und um zum anderen zu identifizieren, welche Parameter den größten Einfluss auf die Fahrwerkslasten ausüben.

6.3.1 Streuung in den Messdaten

Bei Bremsversuchen unterliegen die Fahrwerkslasten einer gewissen Streuung, die u.a. auf kleine Unterschiede in Spur, Geschwindigkeit und Pedalbetätigung zurückzuführen ist. Das Ziel dieses Abschnitts ist, diese Abweichungen zu quantifizieren, um die entsprechenden Ergebnisse der Fahrzeugsimulation bewerten zu können. Hierfür werden die Messdaten aus 22 Vollbremsungen mit einer nominalen Startgeschwindigkeit von 60 km/h einander gegenübergestellt.

Die Unterschiede in den Messdaten werden bereits bei der Untersuchung der tatsächlichen Anfangsgeschwindigkeiten bei Bremsbeginn offensichtlich. Abbildung 6.9 veranschaulicht die Abweichung der Anfangsgeschwindigkeit für die beabsichtigte Vollbremsung aus 60 km/h. Es zeigt sich, dass die Anfangsgeschwindigkeit bis zu 10 % von der nominalen Startgeschwindigkeit abweicht, was einer Geschwindigkeitsdifferenz von 6 km/h entspricht.

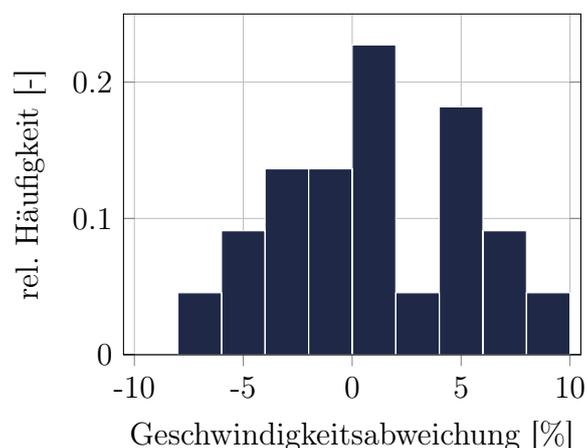


Abb. 6.9: Abweichung der tatsächlichen Startgeschwindigkeit von der nominalen Bremsstartgeschwindigkeit für eine 60-km/h-Vollbremsung

Bei Betrachtung der Streuung der normierten Kräfte und Pseudoschädigungen in Abbildung 6.10 wird die vorhandene Fluktuation ebenfalls ersichtlich. In Abbildung 6.10a ist die Streuung der maximal auftretenden Kräfte und Momente während der einzelnen Bremsmanöver dargestellt. Bei der vorderen Bremskraft ist beispielsweise eine Variation der maximal auftretenden Kraft von ca. 20 % feststellbar. Die hintere Querlenkerkraft

weist mit einer Variation von bis zu 35 % sogar eine noch höhere Streuung auf.

Die maximalen Bremsmomente an der Vorder- und Hinterachse zeigen eine ausgeprägtere Variation der Abweichungen von bis zu ca. 70 %. Da diese Größe direkt mit dem Regelverhalten des Bremsregelsystems korreliert, wird verdeutlicht, dass auch bei mehrfacher Durchführung des gleichen Manövers die Intensität der Regeleingriffe erheblich variieren kann.

Bei Betrachtung der zugehörigen Pseudoschädigung in Abbildung 6.10b wird, verglichen mit den Maximalkräften und -momenten, die höhere Sensitivität der Schädigung deutlich. Dies wurde bereits in Abschnitt 2.1.3 erklärt und ist darauf zurückzuführen, dass Lastamplituden bei der Schädigungsberechnung mit der fünften Potenz eingehen, sodass kleine Änderungen in der Lastamplitude deutlich sichtbar werden. Darüber hinaus ist erkennbar, dass die größere Variation der Maximalwerte des Bremsmoments, verglichen mit den anderen Schädigungen, nicht zu einer erhöhten Variation der Pseudoschädigung führt. So schwankt die normierte Pseudoschädigung der hinteren Querlenkerkraft im Bereich von 0.45 bis 3.23, während die Pseudoschädigung des hinteren Bremsmoments im Bereich von 0.35 bis 2.81 variiert. Wie zuvor erläutert, stehen sowohl das Maximalmoment, als auch die Schädigung des Radmomentes in direktem Zusammenhang mit dem Regelverhalten des Bremsregelsystems. Das maximal auftretende Moment ist dabei i.A. durch den ersten Regelsystemeingriff bestimmt, da dieser für gewöhnlich am stärksten ausfällt. Für die Bestimmung der Schädigung sind hingegen alle Regeleingriffe während des Bremsvorgangs relevant. Ein starker initialer Eingriff führt zu einer Reduktion der Anzahl oder Intensität nachfolgender Eingriffe, wodurch sich die Schädigungswerte über die gesamte Bremsung tendenziell angleichen. Bei der Schädigung der Querlenkerkraft sind neben dem Regelverhalten auch weitere Faktoren, wie die Unebenheiten des Untergrunds, ausschlaggebend. Die Kombination der Eingriffe des Regelsystems und der im Fahrwerk induzierten Kräfte durch diese Unebenheiten kann die Schädigung sowohl erhöhen, als auch verringern, was eine höhere Variation zur Folge hat und den unterschiedlichen Zusammenhang zwischen Maximalkraft und Schädigung bei Lenkerkraft und Radmoment erklärt.

Die Variation der Schädigungen sowie der maximalen Kräfte und Momente, die für die Einordnung der Simulationsergebnisse herangezogen wird, ist lediglich für die linke Fahrzeugseite dargestellt. Wie aus Abbildung 6.11 hervorgeht, sind sowohl für Einzelevents, als auch für die gesamtheitliche Betrachtung der Messung die Messgrößen zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite vergleichbar, wodurch eine Darstellung der rechten Seite keinen zusätzlichen Informationsgewinn liefern würde.

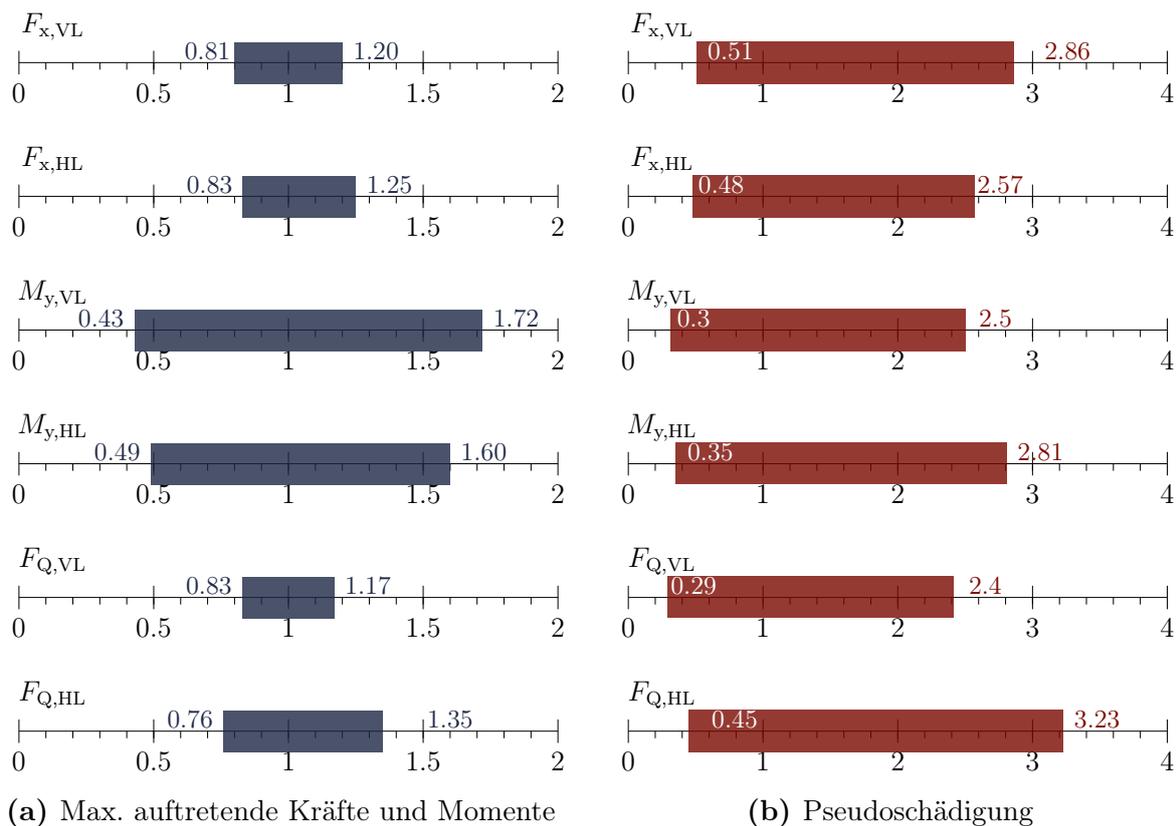


Abb. 6.10: Übersicht der maximalen Variation von Messgrößen bei einer Vollbremsung mit einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h

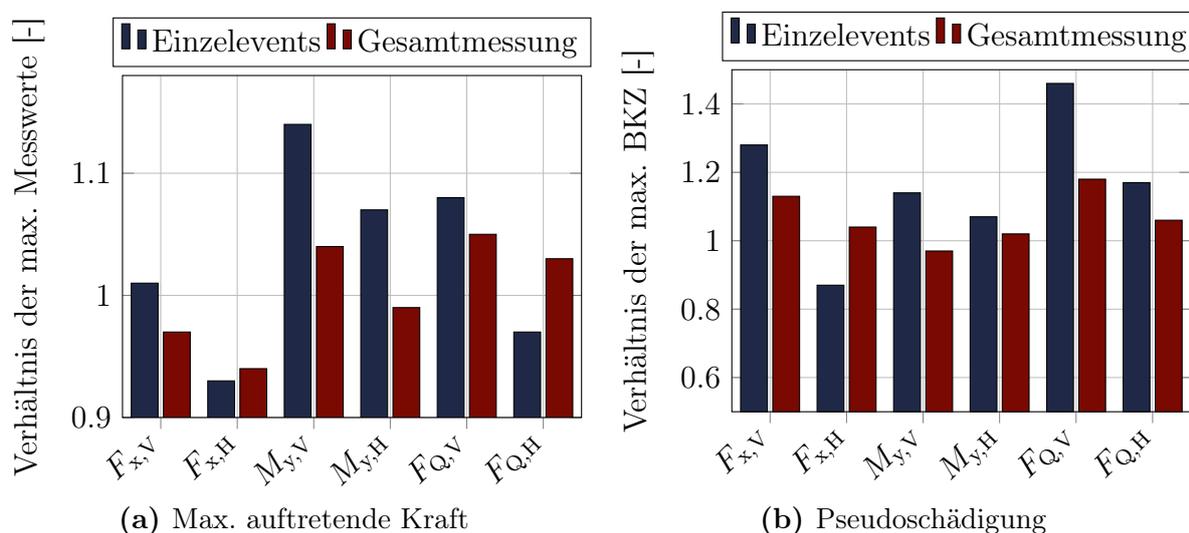


Abb. 6.11: Gegenüberstellung von Messgrößen auf der linken und rechten Fahrzeugseite

Um die Unabhängigkeit der hier gewonnenen Erkenntnisse von individuellen Fahrercharakteristika sicherzustellen, wurde ebenfalls der Fahrereinfluss auf die Variation der Fahrwerkslasten analysiert. Abbildung 6.12 zeigt exemplarisch die normierte Pseudoschädigung für die vordere Querlenkerkraft von drei verschiedenen Fahrern. Die identifizierten

Durchschnittspseudoschädigungen für die drei Fahrer sind mit 1.4, 1.6 und 2 ähnlich. Im Gegensatz zu den Durchschnittswerten ist bei der Betrachtung der individuellen Bremsungen für die einzelnen Fahrer eine signifikante Variation der Pseudoschädigung feststellbar. Fahrer A zeigt beispielsweise in diesem Zusammenhang Schädigungswerte von ca. 0.45 bis zu 3.2. Es wird deutlich, dass die Variation der Schädigung eines Fahrers deutlich größer sein kann als die durchschnittliche Variation zwischen den Fahrern. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sind daher nicht ausschließlich auf die individuelle Fahrweise eines Fahrers zurückzuführen und können somit im Folgenden für die Bewertung der Simulation herangezogen werden.

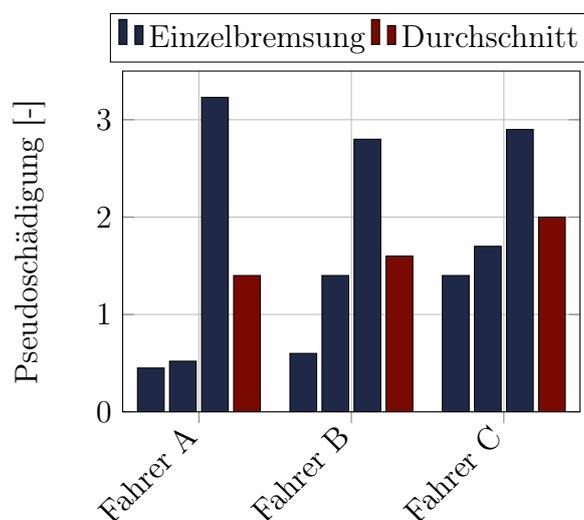


Abb. 6.12: Fahrereinfluss auf Kraftvariation bei Vollbremsungen für die vordere Querlenkerkraft $F_{Q,VL}$

6.3.2 Erreichbare Simulationsgüte und Einfluss der Simulationsparameter

Nach Analyse der in realen Messungen auftretenden Streuung werden in diesem Abschnitt die zugehörigen Simulationsergebnisse in Relation zu dem identifizierten Streuungsbereich gesetzt. Ziel ist dabei die Evaluierung der Vorhersagegüte des Simulationsmodells für die Lastdatenermittlung bei Nutzung eines Fahrermodells und ausschließlicher Vorgabe des Fahrzeugmanövers. Neben der Bewertung der Güte wird durch die Sensitivitätsanalyse verschiedener Simulationsparameter deren Wichtigkeit für die Lastdatenermittlung untersucht. Gleichzeitig wird bewertet, inwieweit die in der Realität auftretende Streuung simulativ abgebildet werden kann.

In Abbildung 6.13 sind die Simulationsergebnisse für eine Vollbremsung auf unebener Straße bei einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h für die maximal auftretenden Kräfte und Pseudoschädigungen dargestellt und in Relation zu den real auftretenden Messstreuungen gesetzt. Es ist erkennbar, dass die Simulationsergebnisse bei allen untersuchten Größen

sowohl für die maximalen Kräfte, als auch für die zugehörigen BKZ im Streubereich der Messung positioniert sind. Folglich lassen sich auch bei Nutzung des Fahrermodells und bei ausschließlicher Vorgabe des Bremsmanövers realistische Betriebslasten ermitteln, welche zur Bewertung des Fahrwerks genutzt werden können und somit eine wesentliche Grundlage zur rein simulativen Entwicklung und Freigabe von Fahrwerksbauteilen darstellen.

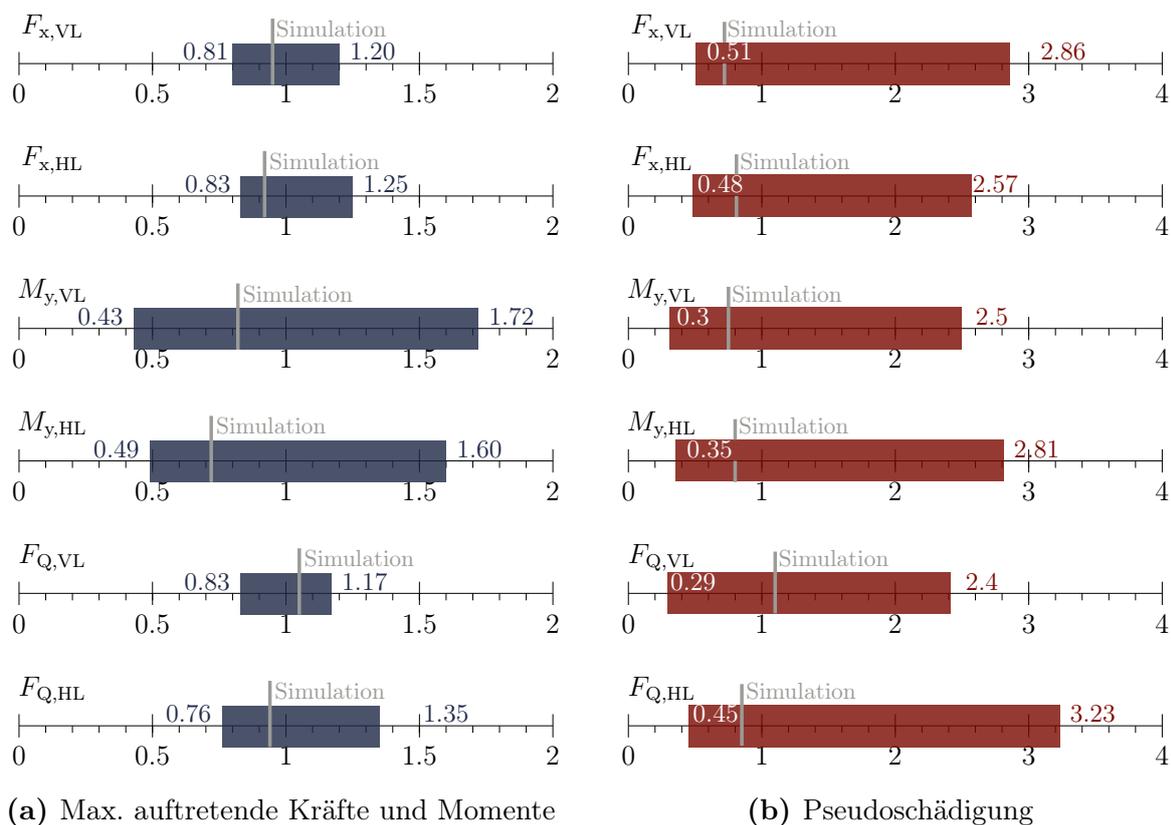


Abb. 6.13: Einordnung der Simulationsergebnisse in maximale Variation von Messgrößen bei einer Vollbremsung mit einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h auf unebener Straße

Um bewerten zu können, inwieweit die in der Realität auftretende Streuung der Lastdaten simulativ abgebildet werden kann, wird die Variation verschiedener Parameter analysiert. Die hohe Modellierungstiefe des Gesamtfahrzeugmodells erlaubt es, sowohl numerische Parameter wie beispielsweise das Kommunikationsintervall, als auch physikalische Größen wie bspw. der Reibungskoeffizient, für die Reifen-Fahrbahn-Interaktion zu analysieren. Darüber hinaus wird der Einfluss der numerischen Parameter in Relation zur tatsächlichen physikalischen Parametervariation gesetzt. Bei der Analyse werden die folgenden Größen analysiert:

1. Reibungskoeffizient für die Reifen-Fahrbahn-Interaktion

Obwohl der Reibungskoeffizient im Kontext dieser Arbeit validiert wurde, können Faktoren wie Abnutzung oder Erwärmung der Reifen sowie Änderungen der Temperaturverhältnisse zu Veränderungen des Koeffizienten bei wiederholten Manövern führen. In dieser Sensitivitätsstudie wird daher der validierte Straßenreibwert von 0.96 um ± 0.1 variiert, um dessen Einfluss zu analysieren.

2. Ausgangsgeschwindigkeit

Wie bereits in Abbildung 6.9 diskutiert, kann in realen Messungen die angestrebte Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h oft nicht exakt eingehalten werden. Die Auswirkungen einer Geschwindigkeitsvariation von ± 5 km/h sind folglich ebenfalls Inhalt dieser Sensitivitätsanalyse.

3. Fahrspur

Bei der wiederholten Durchführung von realen Bremsmanövern sind geringe Unterschiede in der Fahrspur unvermeidlich. Diese longitudinalen Verschiebungen haben durch die unebene Straßentopologie einen Einfluss auf das Bremsverhalten und die Fahrwerkslasten. Durch das Verschieben der Fahrspur um ± 20 cm wird dieser Faktor ebenfalls berücksichtigt.

4. Aufbau der Pedalkraft

Die Betätigung des Bremspedals und die dabei auf das Bremspedal ausgeübte Pedalkraft zeigen in der Praxis eine gewisse Streuung. Auf Basis der Erkenntnisse der Studie von Mortimer [55] zur Streuung der Pedalkraft bei Vollbremsungen wird in der vorliegenden Untersuchung der Einfluss dieses Parameters durch eine Variation der Bremskraft um $\pm 30\%$ berücksichtigt.

5. Kommunikationsintervall

Wie in Abschnitt 5.2 bereits aufgezeigt, hat die Festlegung des Kommunikationsintervalls der Cosimulation einen direkten Einfluss auf das Regelverhalten in der Simulation und die daraus resultierenden Lasten. Da verschiedene Kommunikationsintervalle ein sinnvolles Regelverhalten ermöglichen, wird in dieser Untersuchung auch die Variation des Kommunikationsintervalls berücksichtigt. Das Intervall entspricht der Vergleichbarkeit halber der Untersuchung in Abschnitt 5.2 und liegt somit gleichmäßig verteilt zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ s und $1 \cdot 10^{-4}$ s.

6. Verzögerungszeit

Im vorherigen Abschnitt wurde die Notwendigkeit der Verzögerungszeit beim Druckaufbau in der Simulation identifiziert und deren Einfluss auf die Ergebnisse aufgezeigt. Um diese Erkenntnisse zu erweitern und in Relation zu den anderen Parametern zu setzen, wird dieser Parameter im realistischen Bereich von $\pm 10\%$ um die hier validierte Verzögerungszeit von 100 ms analysiert.

In Abbildung 6.14 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die maximal auftretende Kraft sowie die Pseudoschädigung dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse repräsentativ nur für die hintere Querlenkerkraft dargestellt. Für die anderen Größen sind vergleichbare Ergebnisse erzielt worden, sodass eine Übertragung der Erkenntnisse möglich ist.

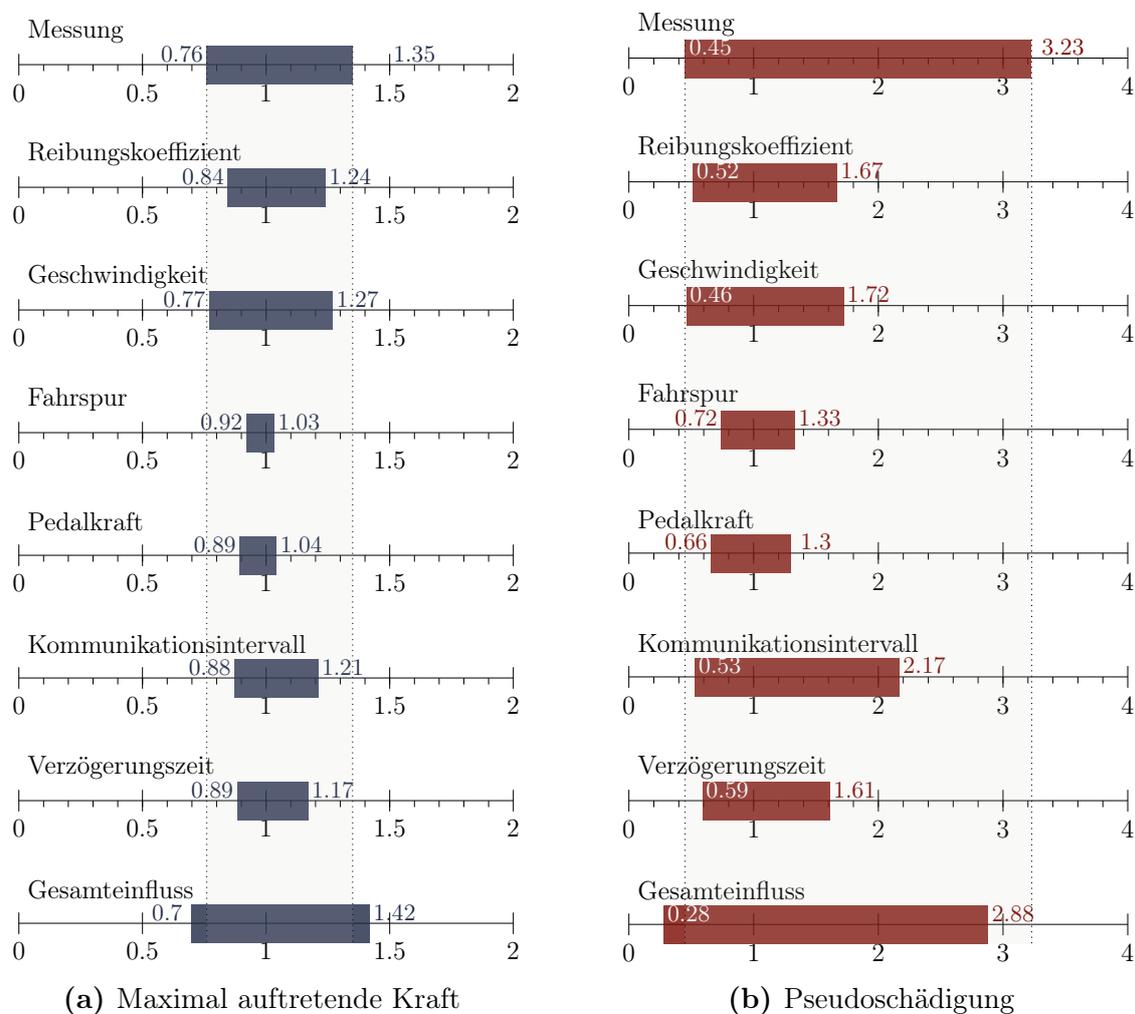


Abb. 6.14: Einordnung der Simulationsergebnisse in die maximale Variation von Messgrößen bei einer Vollbremsung mit einer Startgeschwindigkeit von 60 km/h

Bei Betrachtung der Sensitivitätsanalyse für die maximal auftretende Kraft wird deutlich, dass die aus der Variation der Parameter resultierende Streuung für alle Parameter innerhalb des Streubereichs der Messung und somit in einer realistischen Größenordnung liegt. Die Geschwindigkeitsänderung stellt den dominierenden Einfluss dar. Hierbei resultiert die Steigerung der Geschwindigkeit in höheren ins Fahrwerk eingeleiteten Kräften und somit in einer erhöhten maximalen Kraft. Ebenfalls führt die Variation des Reibkoeffizienten für die Reifen-Fahrbahn-Interaktion zu einer erhöhten Streuung der maximalen Kräfte. Es zeigt sich, dass der erhöhte Reibkoeffizient größere Bremskräfte ermöglicht, die folglich zu der Zunahme der Lenkerkräfte führen. Die beiden variierten, numerischen Para-

meter, das Kommunikationsintervall und die Verzögerungszeit, beeinflussen die maximal auftretenden Kräfte in ähnlicher Intensität wie der Reibungskoeffizient bei der Reifen-Fahrbahn-Interaktion. Die Veränderung der Fahrspur und die Anpassung der Pedalkraft weisen, gemessen an der Messstreuung, hingegen eine eher geringe Sensitivität auf.

Hinsichtlich der Pseudoschädigung ergibt sich, verglichen mit dem Einfluss auf die maximal auftretenden Kräfte, eine veränderte Reihenfolge für die Parametersensitivitäten, da neben der maximal auftretenden Kraft weitere Aspekte, wie bspw. Anzahl und Intensität der Regelsystemeingriffe, ebenfalls eine Rolle spielen. Das Kommunikationsintervall stellt den wesentlichsten identifizierten Faktor für die Pseudoschädigung dar. Wie in Abschnitt 5.2 bereits am Beispiel des Level 0-Steuergerätes erörtert, hat dieser Parameter einen erheblichen Einfluss auf das Regelverhalten. Die daraus resultierenden Schwankungen der Regelsystemeingriffe sind für die gesteigerte Streuung der Resultate verantwortlich. Die Verzögerungszeit, als eine weitere numerische Einflussgröße, zeigt einen ähnlichen Einfluss wie die Änderungen der Geschwindigkeit und des Reibungskoeffizienten für die Pseudoschädigung.

Gegenüber der Messung weisen alle Größen eine signifikant geringere Streuung auf. Somit reicht die Anpassung eines einzelnen Parameters nicht aus, um die Messstreuung adäquat zu reproduzieren. Angesichts dessen, dass eine Vergrößerung der Intervallgrenzen physikalisch nicht sinnvoll ist, wurde eine zusätzliche multidimensionale Parametervariation durchgeführt, um sich der realen Messstreuung anzunähern. Im Hinblick auf die maximale Kraft kann durch diesen Vorgang der gesamte Bereich der Messstreuung abgedeckt werden. Auch bei der Pseudoschädigung ist eine deutliche Vergrößerung der Streuung zu verzeichnen, sodass auch für diese Zielgröße die Simulationsergebnisse einen ähnlichen Streubereich wie die Messung aufweisen. Es ist erwähnenswert, dass bereits durch die Variation von Kommunikationsintervall und Ausgangsgeschwindigkeit ein Großteil der Streuung reproduziert werden kann. Bei alleiniger Variation dieser beiden Parameter können bereits über 95 % des Streubereichs abgedeckt werden. Im Zuge der Reduzierung der Parametervariation von sechs auf zwei Dimensionen kann der Rechenaufwand, bei nahezu gleichbleibender Streubreite, dabei wesentlich reduziert werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Messstreuung durch die Variation der Parameter sowohl bei den maximal auftretenden Kräften, als auch bei der Pseudoschädigung in vergleichbarer Größenordnung reproduziert werden kann. Die numerischen Parameter haben einen ähnlichen oder sogar höheren Einfluss auf das Simulationsergebnis als die physikalischen Parameter. So führt beispielsweise eine Steigerung der Ausgangsgeschwindigkeit um 5 km/h zu einem geringeren Einfluss auf die Schädigung als die Modifizierung des Kommunikationsintervalls. Unabhängig von der gewählten Konfiguration der numerischen Parameter liegen die Ergebnisse im Streubereich der Messung, was erneut die bisherige Erkenntnis untermauert, dass verschiedene Kommunikationsintervalle sowohl möglich als auch zweckmäßig sind.

6.4 Anwendung für Dauerlauffahrversuche

Die im vorherigen Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Reproduktion der Messstreuung sollen in diesem Abschnitt für die simulative Abbildung eines Dauerlaufes angewendet werden. In Abbildung 6.15 sind die Variation der Messschädigung des unteren Querlenkers an der Hinterachse für verschiedene Runden des Dauerlaufkurses sowie der Anteil an der Gesamtschädigung, hervorgerufen durch Bremsmanöver, dargestellt. Auch aus dieser Abbildung geht die bereits mehrfach diskutierte Messstreuung in Erprobungsergebnissen hervor. Des Weiteren wird die Wichtigkeit der korrekten Abbildung der Bremsphänomene für die Lastdatenbestimmung deutlich. Die Bremsphänomene machen je nach Runde zwischen 60 % und 85 % der Gesamtschädigung aus. Da bei der simulativen Abbildung von Erprobungskursen i. A. eine Runde des Kurses berechnet und das Zeitsignal für die gewünschte Anzahl von tatsächlich gefahrenen Runden wiederholt wird, kommt der Auswahl einer repräsentativen Bremsung auf dieser simulierten Runde eine besonders entscheidene Rolle zu. So führt die Wahl einer schädigungsreichen Bremsung zu einer überhöhten Lastsituation, die in der Überdimensionierung des Bauteils endet. Ebenfalls ist eine schädigungsarme Bremsung nicht zielführend, da so zu geringe Lasten erzeugt werden und somit die Gefahr einer Unterdimensionierung der Bauteile besteht.

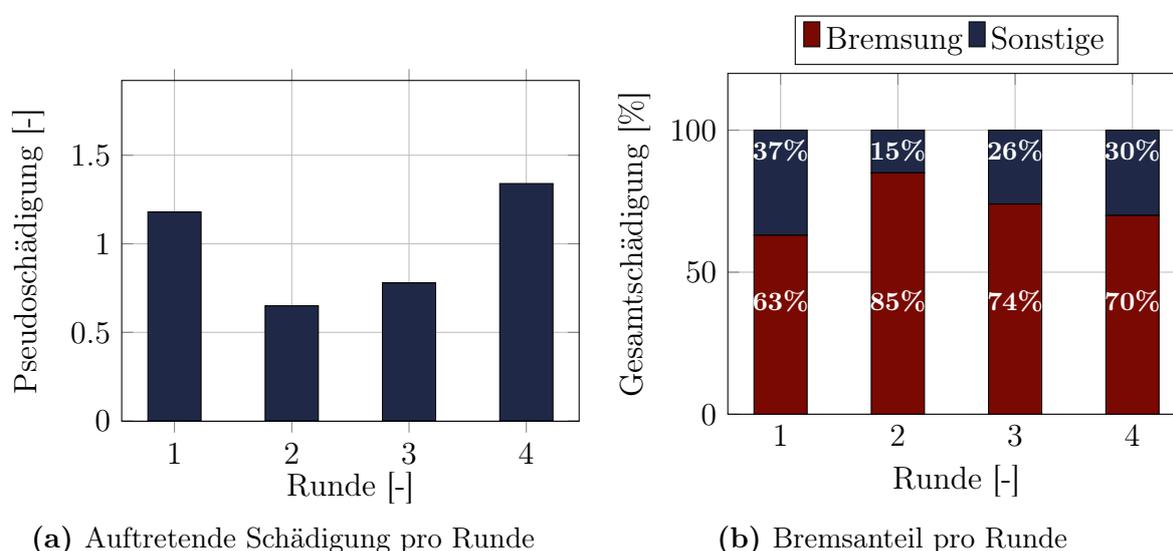


Abb. 6.15: Analyse der auftretenden Streuung der Schädigungswerte des unteren Querlenkers an der Hinterachse bei einer Dauerlaufmessung

Als Entscheidungsgrundlage zur Identifizierung einer repräsentativen Bremsung und somit einer repräsentativen Dauerlaufsimulation sind die Dauerlaufstrecken mit variierenden Simulations- und Kopplungsparametern untersucht worden. Auf Basis der Erkenntnisse des Abschnittes 6.3.2 sind das Kommunikationsintervall für die Regelsystemeinbindung

sowie die Ausgangsgeschwindigkeit für die Bremsmanöver variiert worden, da diese beiden Parameter bereits 95 % der resultierenden Kraft- und Schädigungsvariation bewirkt haben. Die Variation entspricht dem bereits im letzten Abschnitt diskutierten Variationsbereich von $1 \cdot 10^{-3}$ s bis $1 \cdot 10^{-4}$ s für das Kommunikationsintervall und ± 5 km/h für die Bremsausgangsgeschwindigkeit.

In Abbildung 6.16 ist die Häufigkeitsverteilung der resultierenden Schädigung für eine simulierte Dauerlaufrunde bei Variation dieser Parameter dargestellt und in Relation zu dem in der Messung auftretenden Streubereich gesetzt. Bei den so ermittelten, simulativen Schädigungen zeigt sich eine Näherung an eine Normalverteilung mit einer geringeren Schädigungsvariabilität als im vorherigen Abschnitt. Die geringere Variation der Schädigung ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass in diesem Abschnitt nicht nur einzelne Bremsmanöver, sondern die Gesamtschädigung einer Dauerlaufrunde bewertet wird. Da die Abschnitte der gesamten Dauerlaufstrecke ohne Bremsung, und damit ohne Eingriff des Regelsystems, auch bei unterschiedlichen Kommunikationsintervallen konstant bleiben, fällt die Variation der Schädigung folglich geringer aus. Analoges gilt für die Ausgangsgeschwindigkeit. Da diese lediglich kurz vor Bremsbeginn eingestellt wird, beeinflusst auch diese Variation, nur die Bremsmanöver selbst. Der wesentliche Einfluss der Parametervariationen und die Beobachtungen des vorherigen Abschnittes zeigen sich somit primär bei Eingriffen des Regelsystems und beeinflussen nicht die Phasen der Cosimulation, in denen das Regelsystem inaktiv ist.

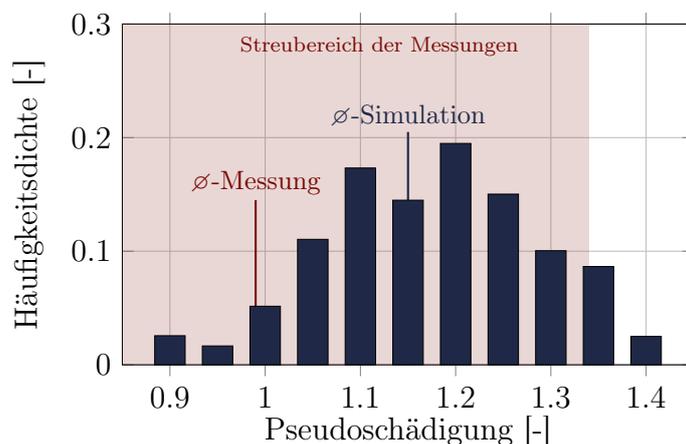


Abb. 6.16: Häufigkeitsverteilung der Schädigung einer simulierten Dauerlaufrunde bei Variation des Kommunikationsintervalls und der Bremsausgangsgeschwindigkeit

In den Simulationsergebnissen liegt der durch Bremsphänomene verursachte Schädigungsanteil zwischen 63 % und 81 %, was im Vergleich zu den Messdaten in Abbildung 6.15b ein realitätsnahes Ausmaß darstellt. Im Vergleich zur durchschnittlichen Schädigung der Messung prognostiziert die Simulation eine um ca. 15 % höhere Gesamtschädigung (vgl.

Abbildung 6.16). Unter Berücksichtigung der Modellierungsunsicherheiten, wie sie zum Beispiel bei der Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn entstehen können, und der Tatsache, dass 79.5 % der Simulationsergebnisse im Schädigungsbereich des tatsächlichen Fahrversuchs liegen, sind diese Ergebnisse als überaus zufriedenstellend einzustufen.

Das Ergebnis verdeutlicht auch die hohe Relevanz der notwendigen Parametervariation zur Einordnung der Simulationsergebnisse. So liegt für die hier gezeigten Daten im ungünstigsten Fall ein Unterschied von 70 % in der Schädigung vor. Die im Auslegungs- und Absicherungsprozess bestehende Unsicherheit und das resultierende Risiko können durch eine gezielte Parametervariation analysiert und beurteilt werden, wodurch die virtuelle Fahrzeugentwicklung erheblich verbessert wird. Die Wahl einer repräsentativen Messung auf Basis der hier identifizierten, durchschnittlichen Schädigung von 1.15 minimiert folglich das Risiko von Unter bzw. Überdimensionierung im Entwicklungsprozess.

Diese zusätzliche Parametervariation stellt einen simulativen Mehraufwand dar. Dieser lässt sich durch die Eingrenzung des Parameterraums auf das Kommunikationsintervall und die Bremsausgangsgeschwindigkeit, welche bereits 95 % der Streubreite abdecken, begrenzen. Zudem bietet dadurch, dass alle betrachteten Fahrmanöver ohne Eingriff des Regelsystems eine gleichbleibende Schädigung aufweisen, die gezielte Simulation der Bremsmanöver des Gesamtkurses die Möglichkeit den Mehraufwand dieser Parametervariation weiter zu minimieren. Durch diese beiden Maßnahmen ist eine effiziente Bewertung des Streubereichs und der repräsentativen Messung möglich, was den Einsatz dieses Vorgehens praktikabel und ökonomisch sinnvoll gestaltet.

Die hier vorgestellte, neuartige Methodik erlaubt also sowohl die realistische Abbildung von Einzelfahrmanövern, als auch die Reproduktion der in der Realität auftretenden Streuung und deren repräsentative Einordnung. Dies bedeutet, dass alle Voraussetzungen zur rein simulativen Bestimmung von Lastdaten für Freigabekurse erfüllt sind, sodass durch diese Methodik auch aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht eine prototypenfreie Entwicklung, die mit einer Effizienzsteigerung im Fahrzeugentwicklungsprozess einhergeht, ermöglicht wird.

Kapitel 7

Nutzung von neuronalen Netzen zur Abbildung des Bremsregelsystems

Während im vorherigen Kapitel die Integration von virtuellen Steuergeräten mit geringer Modellierungstiefe bis zu Level II, die sich auf die Abbildung der Regelalgorithmik und die dafür notwendigen Eingangsgrößen beschränken, thematisiert wurde, widmet sich dieses Kapitel der Untersuchung einer Methodik zur Integration von Regelsystemen mit einem erhöhten Detaillierungsgrad. Da nur virtuelle Steuergeräte mit erhöhtem Detaillierungsgrad (Level III oder IV) die Möglichkeit bieten, seriennahe Tests und Freigaben durchzuführen, liegen virtuelle Steuergeräte häufig in diesen hohen Detaillierungsstufen vor, woraus die Bedeutung der in diesem Abschnitt vorgestellten Methodik für detaillierungsreiche Steuergeräte hervorgeht [94].

Um Level III- und Level IV-Steuergeräte zu verwenden, ist es notwendig, sowohl ein funktionierendes Netzmanagement, als auch eine spezifizierte Menge an Botschaften von anderen Steuergeräten bereitzustellen, da eine Einschränkung der Steuergerätefunktionalität erfolgt, sobald die geräteinternen Überwachungsmechanismen fehlende Kommunikationspartner detektieren [94]. Hierzu werden sogenannte Restbussimulationen verwendet, die die nicht vorhandene Netzwerkkommunikation und die zum Betrieb des Steuergerätes notwendigen Botschaften simulieren und somit dessen Funktionalität ermöglichen [71]. Eine Implementierung der Restbussimulation in die MKS ist aufgrund des hohen Aufwands nicht zweckmäßig. Für das in dieser Arbeit betrachtete Bremsregelsystem müssten beispielsweise über 270 Eingangssignale implementiert und miteinander vernetzt werden.

In diesem Kapitel wird daher ein wissenschaftlich neuer Ansatz untersucht, bei welchem durch den Einsatz neuronaler Netze die Abbildung der Regelfunktionalität auf Basis der virtuellen Steuergeräte hoher Modellierungstiefen ohne Restbussimulation realisiert wird. Hierzu wird im folgenden Abschnitt das dafür entwickelte Vorgehen erläutert. Dieses wird anschließend für einzelne Bremsmanöver und eine komplette Fahrbetriebsmessung angewendet und bewertet. Abschließend wird die Anwendung der Methodik für andere Einsatzbereiche, z. B. die Rekonstruktion ausgefallener Messkanäle, aufgezeigt.

7.1 Vorgehen

Die hier untersuchte Methodik zielt darauf ab, Regelfunktionalitäten durch den Einsatz neuronaler Netze abzubilden. Sie ist insbesondere bei Steuergeräten mit höherem Detaillierungsgrad relevant, bei welchen die Regelfunktionalität zahlreiche Eingangsgrößen erfordert, die den Algorithmus nicht direkt beeinflussen, sondern lediglich für die geräteinternen Überwachungsmechanismen genutzt werden. Die Kernidee des methodischen Ansatzes besteht darin, in einer Umgebung, in der das detaillierte Steuergerät aufgrund einer vorhandenen Restbussimulation sinnvoll betrieben werden kann, Daten zu erzeugen, die zum Training eines neuronalen Netzes genutzt werden. Das Training findet nur auf Basis der für den Regelalgorithmus relevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen ohne Notwendigkeit der Berücksichtigung der geräteinternen Überwachungsmechanismen statt. Das so in der Komplexität reduzierte neuronale Netz kann daraufhin direkt in die MKS-Simulation eingebunden werden.

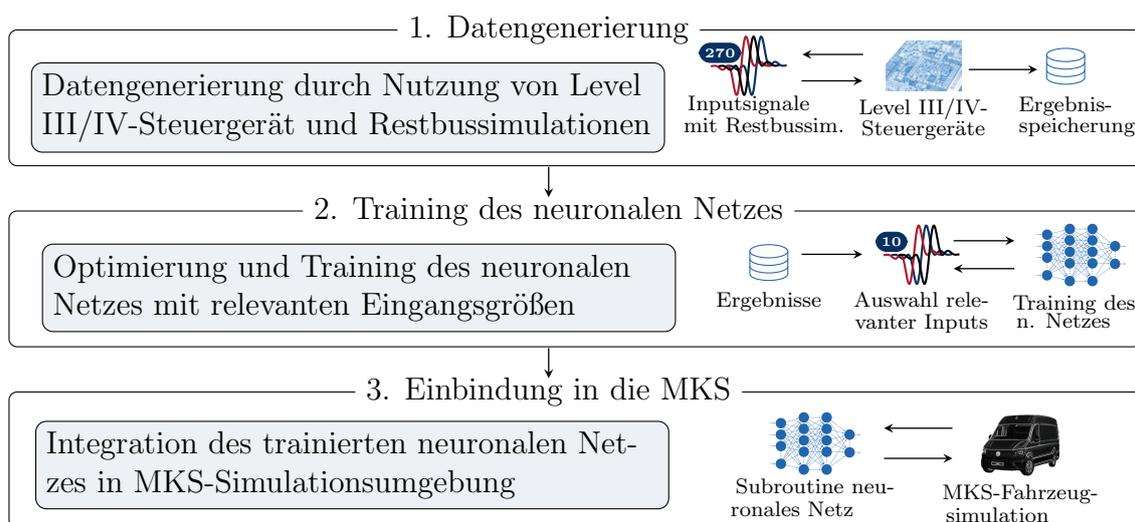


Abb. 7.1: Schematische Darstellung der Methodik zur Integration von Regelfunktionalitäten durch neuronale Netze auf Basis von Level III/IV-Steuergeräten - Alle Rechte vorbehalten

Das genaue Vorgehen der Methodik ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Es gliedert sich in drei Phasen:

1. Datengenerierung

Ziel dieses Schrittes ist die Bereitstellung der Daten für das Training des neuronalen Netzes. Hierzu werden Steuergerätesimulationen in einer vorhandenen, für die hohen Detaillierungslevel der Steuergeräte angepassten Simulationsumgebung durchgeführt. Ein geeignetes Tool für diese Anwendung ist bspw. die Software CANOE, die sowohl die Entwicklung, als auch das Testen einzelner Steuergeräte und vollständiger Netzwerke ermöglicht. Darüber hinaus ist diese Software auf das Aufbauen von

Restbussimulationen spezialisiert, sodass die Bereitstellung aller notwendigen Kommunikationssignale gewährleistet werden kann [68].

Eine Definition von Testfällen, die simuliert werden sollen, ist für die Datengenerierung erforderlich. Die Auswahl sollte dem jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Im Kontext des hier analysierten Bremsregelsystems wurden 1500 Bremsvorgänge unter Variation von Geschwindigkeit, Reibwert der Fahrbahn und Bremsintensität durchgeführt.

2. Training des neuronalen Netzes

Nach der Datengenerierung kann das neuronale Netz zur Abbildung der Regelfunktionalität trainiert werden. Hierbei ist entscheidend, dass nur die für den Algorithmus relevanten Parameter im Training des neuronalen Netzes genutzt werden. Kommunikationssignale, die für die Überwachungsmechanismen des Geräts erforderlich und für das Resultat irrelevant sind, werden während des Trainings vernachlässigt, sodass die Zahl der Eingangsgrößen und damit auch die Komplexität des Regelsystems mithilfe des Trainings reduziert werden kann. Für das hier analysierte Bremsregelsystem werden so die 270, im detailreichen Level III/IV-Steuergerät notwendigen Eingangsgrößen auf die zehn tatsächlich notwendigen Eingangsgrößen reduziert.

Das notwendige Training verwendet ein Trainingsdatensatz, der 70 % der insgesamt erzeugten Daten umfasst. Die restlichen 30 % der generierten Daten, die den Testdatensatz bilden, werden zur Identifikation der optimalen Netzwerkarchitektur im Rahmen einer Hyperparameteroptimierung verwendet. Dabei werden durch Variation von Netzwerkgröße, -layout und Trainingsparametern verschiedene Netzwerkkonfigurationen miteinander verglichen, um die für das jeweilige Steuergerät optimale Konfiguration zu bestimmen.

3. Integration in die MKS

Im letzten Schritt wird die ermittelte, optimale Netzwerkkonfiguration in die MKS-Simulation integriert. Dazu ist eine Subroutine entwickelt worden, welche die Integration von neuronalen Netzen ermöglicht. Die Definition der neuronalen Netze erfolgt per ASCII-Format, sodass diese unabhängig von ihrer Trainings- und Entwicklungsumgebung nutzbar sind. Die Anwendung ist nicht ausschließlich auf Regelfunktionalitäten beschränkt; vielmehr können durch die Subroutine alle gewünschten Größen simuliert werden, die sich mittels eines neuronalen Netzes abbilden lassen. So sind beispielsweise auch die Abbildung von Lagercharakteristiken und die Modellierung von Stoßdämpfern durch neuronale Netze, wie in den Untersuchungen von Sohn et. al. [76] und Pracny et. al. [59] aufgezeigt, möglich.

7.2 Training des neuronalen Netzes

Da die Performance der vorgestellten Methodik maßgeblich vom Training des neuronalen Netzes auf Grundlage der generierten Daten abhängt, soll dieser Schritt nachfolgend detailliert betrachtet und veranschaulicht werden. Eine zentrale Voraussetzung für eine effiziente Abbildung der Regelfunktionalitäten durch neuronale Netze ist die Identifikation einer geeigneten Netzwerkarchitektur. Die in Kapitel 2.4.3 vorgestellten LSTM-Netze erweisen sich für die Abbildung von Regelfunktionalitäten als besonders zweckmäßig, da ihre Fähigkeit, Informationen aus vorherigen Ereignissen zu erfassen, eine effiziente Verarbeitung von Zeitreihen und damit eine präzise Abbildung von dynamischen Systemen ermöglicht. Sie werden hier folglich gemeinsam mit klassischen FC-Schichten (vgl. Kapitel 2.4.2) als Grundlage für das Training der neuronalen Netze genutzt.

Tabelle 7.1: Übersicht des untersuchten Hyperparameterraumes

Hyperparameter	Wertebereich
Größe der LSTM-Schicht	10, 20, ... , 100
Größe der FC-Schicht	10, 20, ... , 100
Größe des Minibatches	60, 70, ... , 140
Anzahl der LSTM-Schichten a	1, 2, ... , 6
Anzahl der FC-Schichten b	1, 2, ... , 6
Netzarchitektur	[a] x LSTM - [b] x FC [b] x FC - [a] x LSTM

Zur Identifizierung der geeignetsten neuronalen Netzkonfiguration werden die sogenannten Hyperparameter angepasst. Hyperparameter sind Parameter des neuronalen Netzes, die während des Trainingsprozesses nicht verändert werden, wie bspw. Anzahl, Typ und Größe der neuronalen Netzschichten. Die gezielte Anpassung dieser Größen und somit die Bestimmung einer effizienten Netzwerkarchitektur wird mithilfe einer Hyperparameteroptimierung realisiert. Im Rahmen dessen wird neben der Netzwerkarchitektur auch die Größe des Minibatches optimiert, die maßgeblich die Effizienz des Trainingsprozess beeinflusst (vgl. Kapitel 2.4.4).

Zur Realisierung dieser Optimierung wird, dank der Einfachheit und hohen Parallelisierungsmöglichkeiten, der sogenannte Grid-Search-Ansatz verwendet. Dabei wird der gesamte Hyperparameterraum durch ein Gitter diskretisiert, wobei jeder Knotenpunkt des Gitters eine mögliche Hyperparameterkonfiguration darstellt. Für jeden Knotenpunkt wird anschließend das neuronale Netz trainiert und bewertet. Eine genaue Übersicht der Diskretisierung der einzelnen Hyperparameter ist in Tabelle 7.1 gegeben. Der Wertebereich und die Anzahl der Schichten wurden in Anlehnung an die Untersuchungen von Hanifi et al. [31] sowie Maties und Fosalau [51] gewählt. Die restlichen notwendigen Trainingsparameter basieren auf den Erkenntnissen von Santhosh et al. [67] und sind in Tabelle 7.2 detailliert aufgeführt.

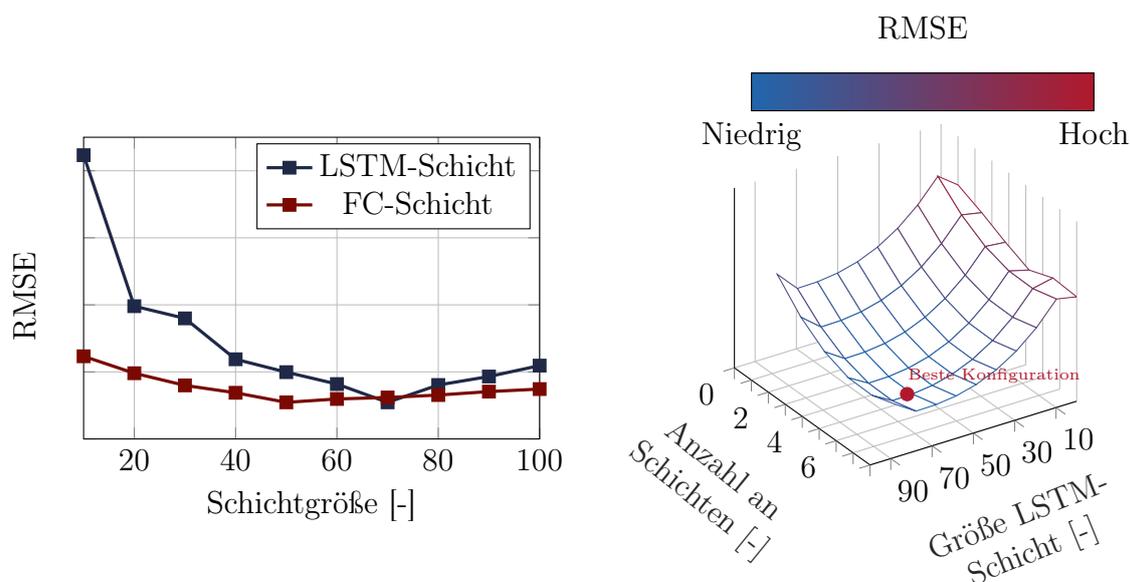
Tabelle 7.2: Trainingsparameter des neuronalen Netzes und Kenndaten des optimierten neuronalen Netzes

Training		Neuronales Netz	
Parameter	Wert	Parameter	Wert
Algorithmus	Levenberg-Marquardt	Größe des Minibatches	60
Zielwert	0	Netzarchitektur	5 x LSTM 2 x FC
Max. Validierungsfehleranzahl	6	FC-Schichtgröße	50
Min. Fehlergradient	$1 \cdot 10^{-7}$	LSTM-Schichtgröße	70
Lernrate η	$1 \cdot 10^{-3}$	Optimierungszeit	62 h
Max. Anzahl der Epochen	500		

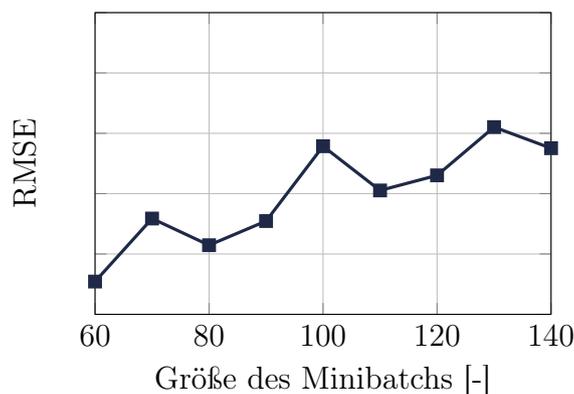
Der Prozess der Hyperparameteroptimierung ist in Abbildung 7.2 dargestellt. In Abbildung 7.2a wird der Einfluss der Auswahl von FC- und LSTM-Schichtgrößen auf die Performance des Netzwerks für einen unabhängigen Testdatensatz gezeigt. Die Anpassung der Neuronenzahl in den gegebenen Schichten weist ähnliche Tendenzen auf. Bei zu kleinen Schichtgrößen fehlen dem Netzwerk ausreichend Parameter, um die zugrundeliegende Regelfunktionalität effizient abstrahieren und abbilden zu können. Auf der anderen Seite führen überdimensionierte neuronale Netze zu einer Überanpassung (engl. Overfitting) an die Trainingsdaten, was die Generalisierungsfähigkeit der Regelfunktionalität auf andere Szenarien behindert. Wie an dem steileren Gradienten bei kleinen Schichtgrößen deutlich wird, ist der Effekt des Overfittings für die Performance weniger beeinträchtigend, als die fehlende Abstraktionsfähigkeit von kleinen Schichtgrößen.

Die Wichtigkeit der LSTM-Schichten für die Abbildung der Regelfunktionalität zeigt sich in Abbildung 7.2b, in der der Einfluss der Schichtanzahl und -größe visualisiert ist. Es zeigt sich, dass eine hohe Anzahl von fünf LSTM-Schichten notwendig ist, um die erforderliche Modellkomplexität für eine präzise Vorhersage des Fahrzustands und der damit verbundenen Regeleingriffe zu gewährleisten.

Hinsichtlich der Trainingsparameter zeigt sich in Abbildung 7.2c, dass kleinere Minibatches beim Training vorteilhaft sind. Bei einer geringeren Minibatchgröße werden die Gradienten und die daraus resultierende Anpassung der Modellgewichte häufiger aktualisiert. Dies führt zu einem Regularisierungseffekt, welcher die Wahrscheinlichkeit eines Overfittings an die Trainingsdaten verringert [38].



(a) Einfluss der Schichtgröße für LSTM- und FC-Schicht (b) Mehrdimensionaler Einfluss der LSTM-Parameter



(c) Einfluss der Minibatchgröße

Abb. 7.2: Ausgewählte Ergebnisse der Hyperparameteroptimierung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mithilfe der Hyperparameteroptimierung systematisch die nicht direkt ableitbaren, notwendigen Parameter zum Training und Design des neuronalen Netzes bestimmt wurden. Eine detaillierte Darstellung des abschließend identifizierten Netzwerks und der Trainingskonfiguration findet sich in Tabelle 7.2. Mit einer benötigten Dauer von 62 Stunden stellt dieser Prozessschritt, im Gesamtkontext des Entwicklungsprozesses betrachtet, eine zeiteffiziente Vorgehensweise dar und gewährleistet eine unkomplizierte Integration in den etablierten Prozess.

Zudem stellte sich heraus, dass die Parametrierung der zeitsequenziellen LSTM-Schichten einen prägenden Einfluss auf das Erlernen der Regelalgorithmik und die daraus resultierende Abbildungsqualität des neuronalen Netzes hat. Es wird daher empfohlen, bei der Abbildung von Regelfunktionalitäten durch neuronale Netze ein besonderes Augenmerk auf die Parametrierung dieser Schichten zu legen, indem ein großer Hyperparameterraum mit möglichst vielen Stützstellen für die damit assoziierten Parameter genutzt wird.

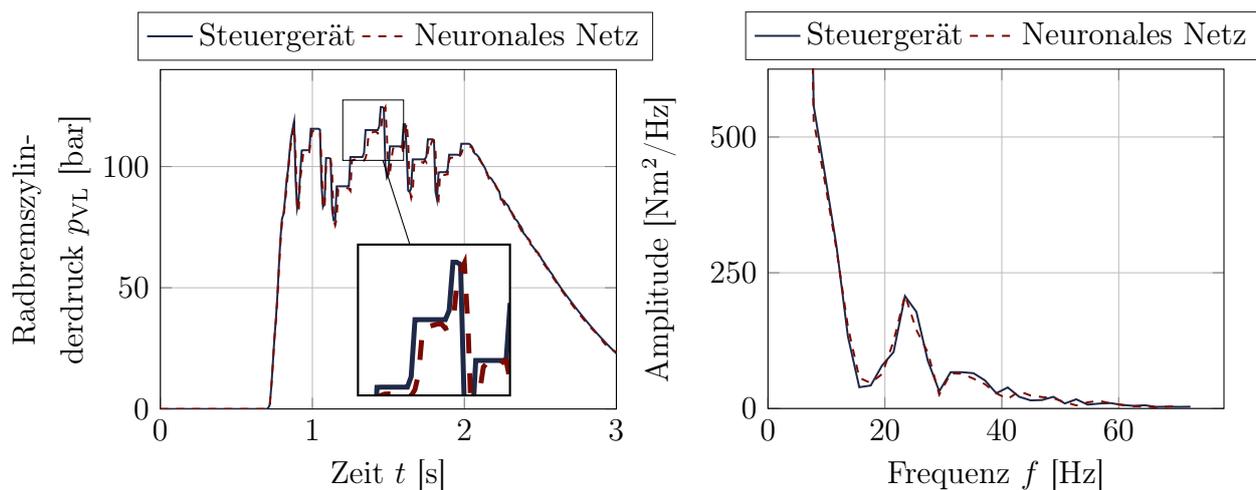
7.3 Bremsung auf ebener und unebener Fahrbahn

Nach der Identifizierung der optimalen Trainingsparameter und Netzwerkarchitektur mittels Hyperparameteroptimierung wird in diesem Abschnitt die Performance der Abbildungsqualität des neuronalen Netzes für einzelne Bremsmanöver dargestellt und evaluiert.

Das Ergebnis für ein außerhalb des Trainingsdatensatzes liegendes Bremsmanöver bei 80 km/h wird in Abbildung 7.3 dargestellt. Für eine qualitative Bewertung werden die Simulationsergebnisse einer klassischen Cosimulation mit Steuergeräteintegration den Simulationsergebnissen mit integriertem neuronalem Netz gegenübergestellt. Der Bremsdruckverlauf für das vordere linke Rad ist in Abbildung 7.3a dargestellt. Der Bremsdruckverlauf der mit dem neuronalen Netz integrierten Simulation weist eine signifikante Übereinstimmung mit der klassischen Simulation auf, sowohl in der Intensität der Regelsystemeingriffe, als auch in Bezug auf die Dauer und den Zeitpunkt dieser Eingriffe. Dies legt eine sehr gute Abbildung der Regelsystemalgorithmik nahe und wird durch die in Abbildung 7.3b dargestellte spektrale Leistungsdichtenanalyse für das Bremsmoment des vorderen linken Rades bestätigt. Die Darstellung des Regelsystems durch das neuronale Netz erzielt über den gesamten Frequenzbereich eine sehr gute Übereinstimmung. Besonders entscheidend für die Bewertung der Regelfunktionalitäten ist die gute Abbildung des charakteristischen Peaks der Regelfrequenz bei 23 Hz. Die auch hier hohe Übereinstimmung bestätigt ein plausibles und realistisches Verhalten der simulierten Bremsung.

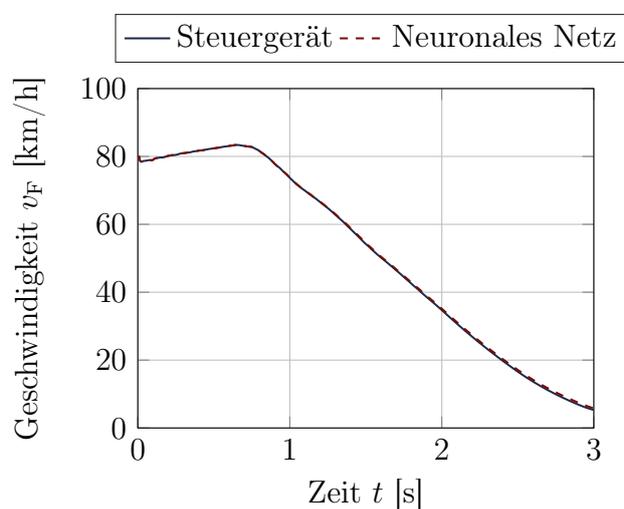
Dies spiegelt sich ebenfalls bei der Visualisierung des Fahrzustandes in Abbildung 7.3c und 7.3d wider. Sowohl die Fahrzeuggeschwindigkeit, als auch die Radgeschwindigkeit und damit einhergehend die Bremsdauer und -wirkung, sind nahezu identisch. Gleiches gilt für die in Abbildung 7.3e und 7.3f dargestellten Fahrwerkskräfte für die hintere linke Querlenkerkraft und die vordere linke Bremskraft.

Identische Resultate und Erkenntnisse wurden gleichermaßen für andere Bremsmanöver auf ebenen Straßenverhältnissen festgestellt, weshalb hier stellvertretend nur ein Resultat präsentiert ist.

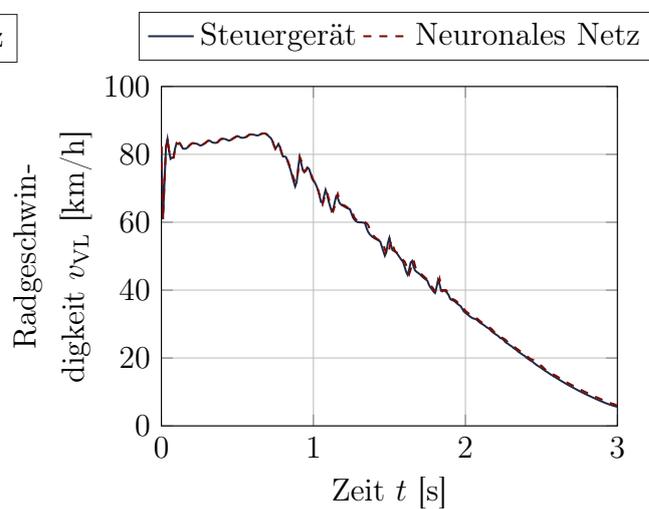


(a) Radbremszylinderdruck - vorne links

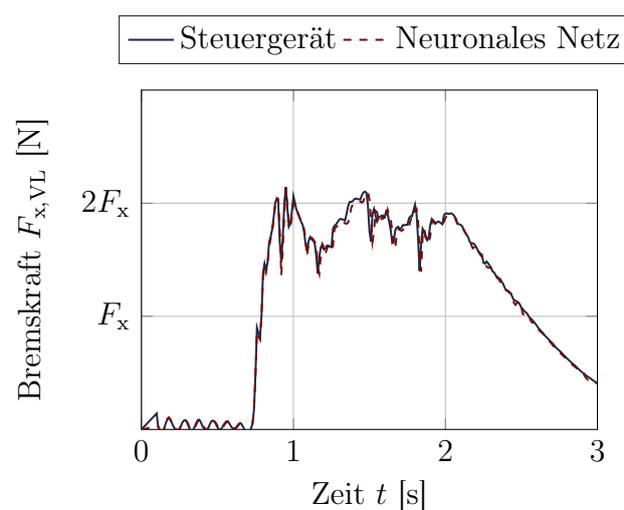
(b) Spektrale Leistungsdichtenanalyse des Bremsmomentes - vorne links



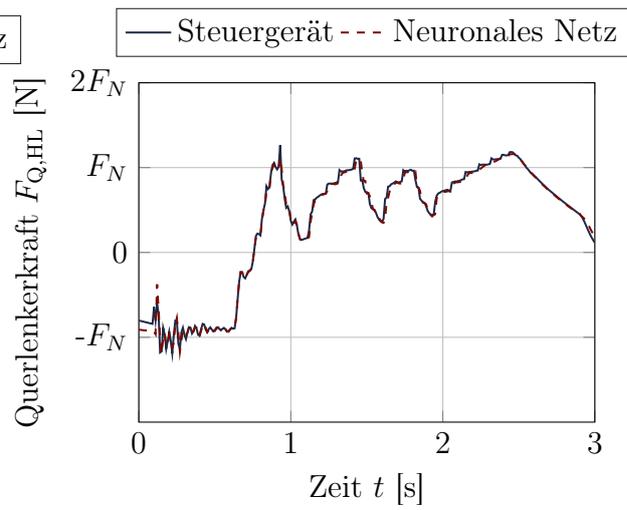
(c) Fahrzeuggeschwindigkeit



(d) Radgeschwindigkeit - vorne links



(e) Bremskraft - vorne links



(f) Querlenkerkraft - hinten links

Abb. 7.3: Darstellung der Simulationsergebnisse für ein Bremsmanöver mit einer Startgeschwindigkeit von 80 km/h auf ebener Straße

Um die Abbildungsqualität und Anpassungsfähigkeit des neuronalen Netzes an nicht im Training berücksichtigte Zustände zu bewerten, wird des Weiteren ein Bremsvorgang auf einer stark unebenen Fahrbahn analysiert. Der Bremsvorgang auf unebener Straße ist mit einem herausfordernden Aspekt für das neuronale Netz verbunden: Das Training und somit die Identifikation des Regelalgorithmus basieren ausschließlich auf Fahrzeugdaten aus Fahrmanövern auf ebener Straße. Durch die starken Unebenheiten des Untergrundes treten bei dem analysierten Fahrmanöver Eingangssignale mit starkem Rauschen bzw. überlagerten Vibrationen auf, die durch das neuronale Netz korrekt verarbeitet werden müssen.

Die Ergebnisse der Analyse einer Vollbremsung aus einer Geschwindigkeit von 80 km/h auf einem stark unebenen Straßenabschnitt sind in Abbildung 7.4 abgebildet. Abbildung 7.4a zeigt den Bremsdruckverlauf. Es existiert eine grundlegende Übereinstimmung im Verlauf des Bremsdrucks zwischen der Simulation mittels neuronalem Netz und dem klassischen Steuergerät. Geringfügige Abweichungen sind jedoch feststellbar. Trotz der geringen Unterschiede bestätigt Abbildung 7.4b durch die Übereinstimmungen der spektralen Leistungsdichteanalyse, besonders mit dem charakteristischen Peak bei der Regeleigenfrequenz von 23 Hz, das sinnvolle Regelverhalten des neuronalen Netzes.

Das konsistente Regelverhalten des neuronalen Netzes wird auch in Abbildung 7.4d deutlich, in welcher die Radgeschwindigkeiten des vorderen linken Rades gegenübergestellt sind. Hinsichtlich der Eingriffsintensität des Regelsystems und der Blockierneigung des Rades zeigt sich ein sehr ähnliches Verhalten. Die Unterschiede im zeitlichen Verlauf resultieren aus den geringen Unterschieden des Bremsdruckverlaufs. Diese geringen Unterschiede führen zu leichten Positionsunterschieden des Fahrzeuges, die durch die starke Unebenheit des Bodens unterschiedliche in das Fahrwerk eingeleitete Stöße bedingen, welche die sichtbaren Abweichungen, verglichen mit der Bremsung auf der ebenen Fahrbahn, erklären.

Auf Gesamtfahrzeugebene sind diese kleinen Unterschiede nicht sichtbar. Wie Abbildung 7.4c veranschaulicht, sind ein identischer Geschwindigkeitsverlauf und somit ebenfalls übereinstimmender Bremsweg und Bremszeit gegeben.

Die gute Übereinstimmung zeigt sich auch für die verglichenen Kräfte in Abbildung 7.4e und 7.4f. Hier wird die Herausforderung für das neuronale Netz durch das starke Rauschen der Zustands- und somit auch der Eingangsgrößen, gegenüber den Kraftverläufen auf ebener Strecke, erneut verdeutlicht (vgl. Abbildung 7.3e und 7.3f). Zur sinnvollen Quantifizierung und objektiven Bewertung der Übereinstimmung sind in Abbildung 7.5 die Pseudoschädigung für die Kräfte sowie andere charakteristische Parameter dargestellt. Unabhängig davon, ob es sich um Kraftgrößen für die Lastdatenerfassung oder regelprozessabhängige Größen wie den Bremsdruckverlauf handelt, beträgt der Unterschied in der Pseudoschädigung zwischen den Simulationen mit neuronalem Netz und mit realem Steuergerät weniger als $\pm 10\%$, was einer hohen Übereinstimmung entspricht.

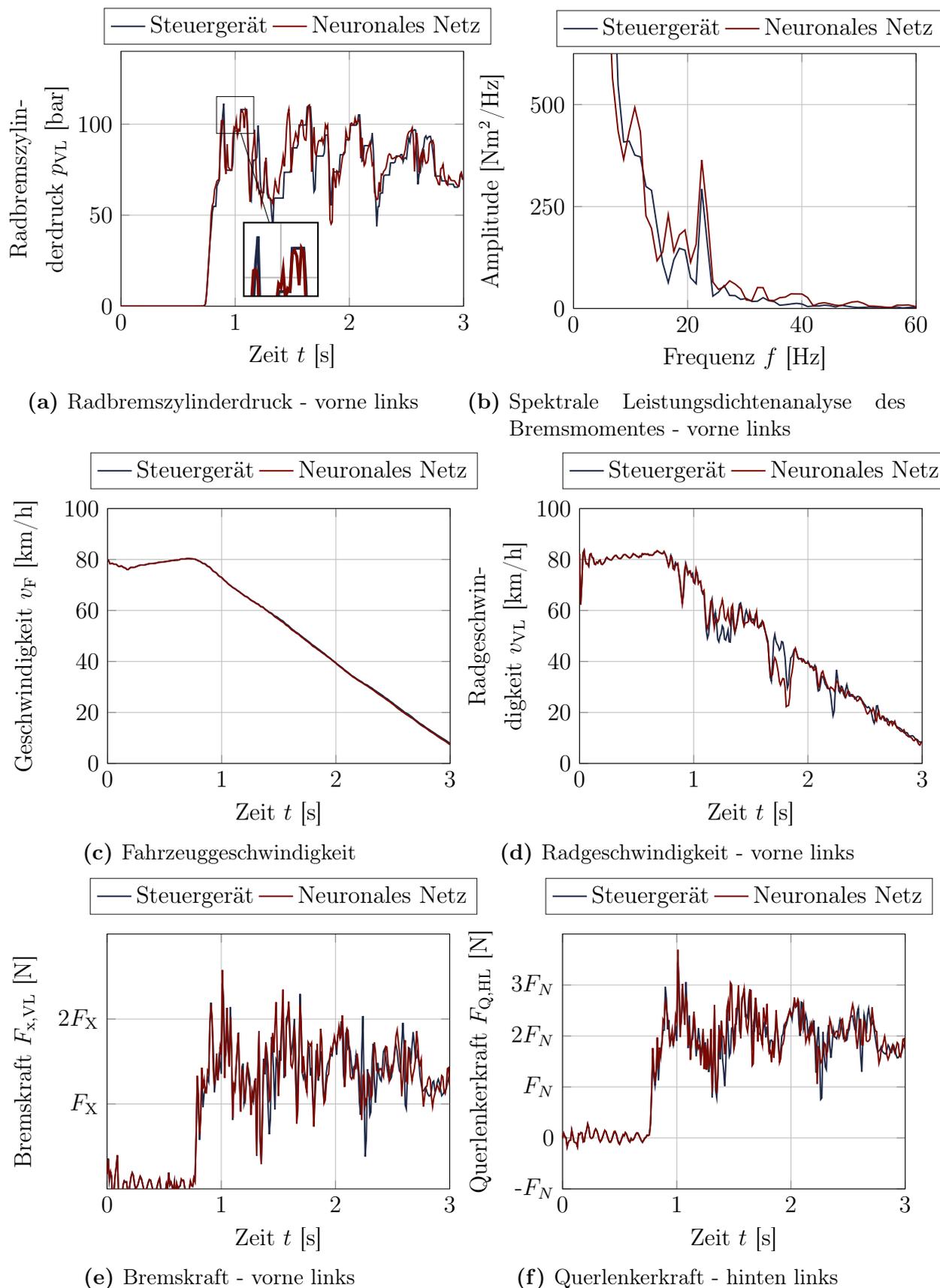


Abb. 7.4: Darstellung der Simulationsergebnisse für ein Bremsmanöver mit einer Startgeschwindigkeit von 80 km/h auf unebener Straße

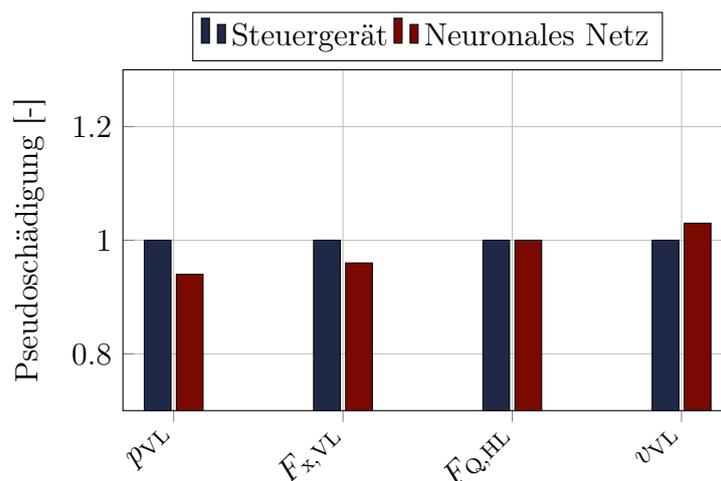


Abb. 7.5: Gegenüberstellung der Pseudoschädigung für ausgewählte Kräfte und charakteristische Zustandsgrößen bei einer Bremsung auf unebenem Untergrund

Das betrachtete Beispiel bestätigt, dass das neuronale Netzwerk auch bei Anwendungsfällen, die stark von den initialen Trainingsszenarien abweichen, sinnvolle und relevante Ausgaben generieren kann. Um die Abbildungsqualität zu maximieren, ist es dennoch ratsam, die Testfälle für die Trainingsdaten an das tatsächliche Anwendungsszenario anzugleichen. So wäre es hier beispielsweise sinnvoll, auch Bremsungen auf unebenem Untergrund in den Trainingsprozess einzuarbeiten, falls die Abbildung des Regelsystems durch neuronale Netze vermehrt für solche Untergründe eingesetzt werden soll und besonders hohe Anforderungen an die Abbildungsgüte bestehen.

Es zeigt sich also, dass die präzise Auswahl von Testfällen zur Generierung von Trainingsdaten einen Schlüsselfaktor für den effizienten Einsatz von neuronalen Netzen zur Abbildung von Regelfunktionalitäten darstellt. Hierbei sollten die Abdeckung des gesamten Anwendungsbereichs sowie ausreichend Diversität in den Trainingsdaten bestmöglich sichergestellt werden. Um dies zu verdeutlichen, sind in Abbildung 7.6 die Simulationsergebnisse einer 60 km/h-Vollbremsung auf einer trockenen, ebenen Straße dargestellt. Die Trainingsdaten für das neuronale Netz wurden einseitig bestimmt und stammen ausschließlich von Bremsungen mit einer Ausgangsgeschwindigkeit oberhalb von 120 km/h auf Straßen mit niedrigem Reibwert. Aufgrund der fehlenden Diversität in den Trainingsdaten ist die korrekte Abstraktion des Regelalgorithmus beeinträchtigt, wodurch eine nicht valide Extrapolation durch das neuronale Netz unplausible Vorhersagen liefert. Diese unplausible Vorhersage des Bremsdrucks führt zu der Einleitung extrem schwankender, unrealistischer Kräfte in das Fahrwerk, welche zu unbrauchbaren Simulationsergebnissen führen. Neben der Erhöhung der Diversität der Testfälle kann auch eine grundsätzliche Erhöhung der Anzahl an Trainingsdaten die Abstraktionsfähigkeit des Regelalgorithmus begünstigen und somit die Abbildungsqualität des neuronalen Netzes verbessern. Falls beide Maßnahmen keine Abhilfe schaffen, ist dies ein Indiz dafür, dass die vordefinierte, neuronale Netzarchitektur nicht zur Abbildung dieser Regelfunktionalität geeignet ist,

sodass eine Überarbeitung oder vor allem eine Erweiterung der zu optimierenden Hyperparameter ratsam ist.

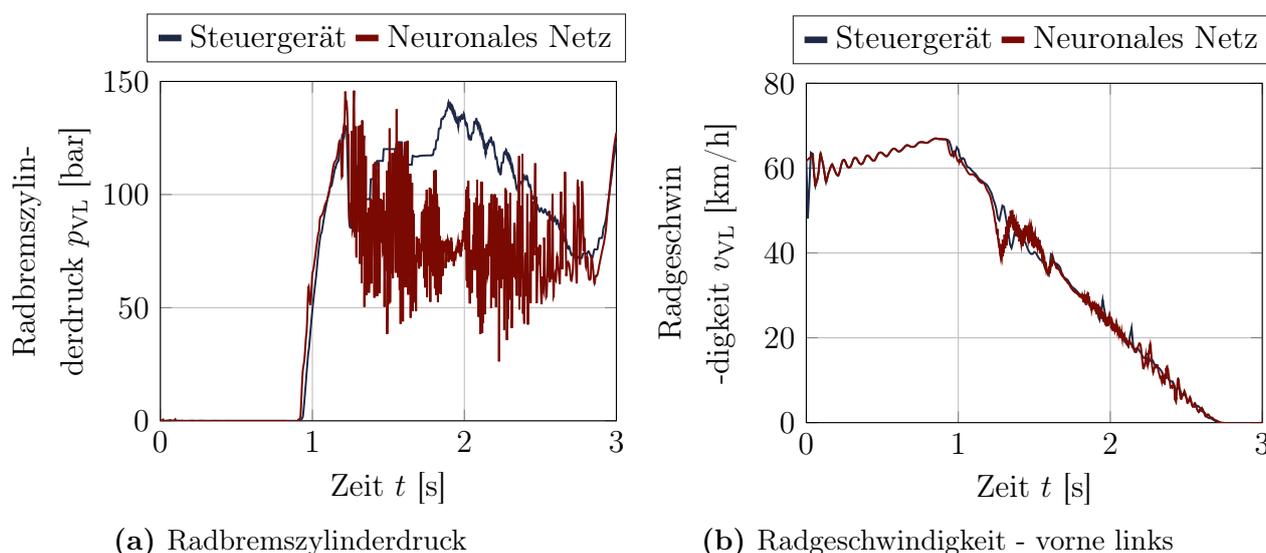


Abb. 7.6: Simulationsergebnisse für ein Vollbremsmanöver aus 60 km/h bei Nutzung eines neuronalen Netzes mit einer unzureichend diversen Datenbasis

7.4 Auswertung eines Dauerlauffahrversuchs

Nach der Analyse und Darstellung von Einzelmanövern wird in diesem Abschnitt die Nutzung der vorgestellten Methodik für eine Dauerlaufsimulation beleuchtet. Dabei sind neben dem Vergleich der simulierten Schädigungen an ausgewählten Bauteilen auch die bisher ebenfalls nicht wissenschaftlich untersuchten Rechenzeitunterschiede zwischen klassischer Cosimulation und Simulation mit integriertem neuronalen Netz von Interesse.

Zum Vergleich der beiden Simulationsmethoden wird eine 460-sekündige Simulation genutzt, in der alle für den Dauerlauf relevanten Manöver enthalten sind. In Abbildung 7.7a sind die für diese Simulation notwendigen Rechenzeiten einander gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die Simulation mittels eines neuronalen Netzes deutlich zeiteffizienter abläuft. Hierbei werden ca. 40 Sekunden Rechenzeit für eine Sekunde Simulation benötigt. Bei der klassischen Cosimulation sind es hingegen ca. 71 Sekunden Rechenzeit pro eine Sekunde Simulation, was einem 75 % höheren Zeitbedarf entspricht. Dies macht sich vor allem bei hohen Simulationsdauern bemerkbar, bei denen andere Aspekte, wie das Laden des Modells und das Schreiben der Ergebnisdatei, eine untergeordnete Rolle einnehmen. Für die 460-sekündige Dauerlaufsimulation ergibt sich für die Simulation mittels neuronalen Netzes eine Simulationszeit von ca. fünf Stunden, was verglichen mit der klassischen Cosimulation eine Zeitersparnis von ca. vier Stunden darstellt. Die Cosimulation ist aus zwei Gründen zeitintensiver. Ein Grund ist der erhöhte Kommunikationsaufwand, da bei der Cosimulation zwischen den beiden verschiedenen Simulationsumgebungen des

Mehrkörpermodells und des Reglermodells zu diskreten Zeitpunkten Informationen ausgetauscht und verarbeitet werden müssen. Um den Kommunikationsaufwand einordnen zu können, ist in Abbildung 7.7b der Einfluss des Kommunikationsintervalls auf die Rechenzeit dargestellt. Es wird deutlich, dass selbst eine Verdopplung des Kommunikationsintervalls und somit eine Halbierung der notwendigen Datenaustausche zwischen den Simulationsumgebungen einen untergeordneten Einfluss auf die Rechenzeit hat. In diesem Fall sorgt die Halbierung der notwendigen Kommunikationen für eine Reduzierung der notwendigen Rechenzeit pro Simulationssekunde von 70 Sekunden auf 68 Sekunden, was einer Gesamtzeiterparnis von lediglich 15 Minuten entspricht.

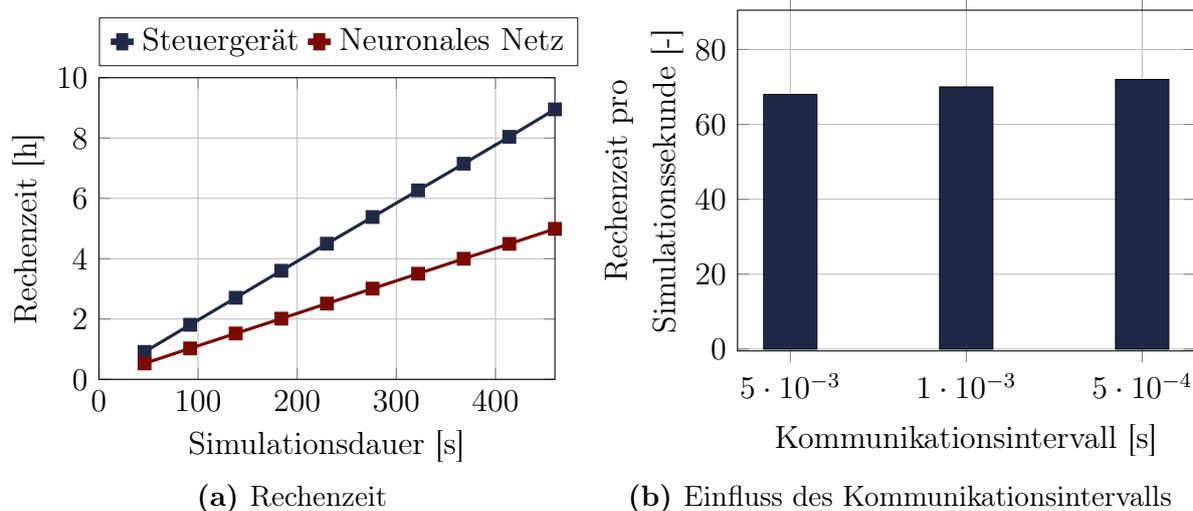


Abb. 7.7: Vergleich der Rechenzeiten für die Dauerlaufsimulation

Der wesentliche Grund für den erhöhten Zeitaufwand ist der hier Anwendung findende, serielle Simulationsablauf nach Gauß-Seidel, bei welchem eine sequentielle Integration des jeweiligen Zeitschrittes in den beiden Simulationsumgebungen stattfindet (vgl. Abschnitt 4.2). Beide Faktoren können durch den Einsatz der direkt integrierten neuronalen Netze eliminiert werden, was zu den deutlichen Performancevorteilen führt.

In Abbildung 7.8 ist des Weiteren die Pseudoschädigung für ausgewählte Kraft- und regelprozessabhängige Zustandsgrößen wie den Bremsdruckverlauf für die klassische Cosimulation und die Simulation mit integriertem neuronalem Netz dargestellt. Hinsichtlich der Vorhersagegüte stimmen die Ergebnisse für den Dauerlauf grundsätzlich mit den Ergebnissen und Ausführungen aus dem vorherigen Abschnitt zu Bremsungen auf unebener Straße überein. Auch hier sind nur sehr geringe Abweichungen von maximal $\pm 5\%$ vorhanden, welche auf kleine Schwankungen in der Bremsdruckvorhersage zurückzuführen sind.

Die Anwendung von neuronalen Netzen zur Abbildung von Regelfunktionalitäten bietet daher sowohl aus rechentechnischer Sicht, als auch bzgl. der Abbildungsqualität die Möglichkeit eines operativen Einsatzes. Die hier entwickelte Methodik zum Einsatz neuronaler

Netze und deren Training mit nur für den Regelalgorithmus notwendigen Eingangsparametern stellt folglich eine bisher nicht realisierbare Lösung dar, die in der Realität häufig existierenden, virtuellen Steuergeräte mit erhöhtem Detaillierungsgrad produktiv in MKS-Gesamtfahrzeugsimulationen einsetzen zu können.

Die Methodik ist jedoch nicht nur auf die Abbildung von Steuergeräten beschränkt, sondern bietet einen grundlegenden Ansatz, um durch die Abbildung von Simulationsbestandteilen mittels neuronaler Netze, Cosimulationen in monolithische Simulationen zu überführen. So können beispielsweise auch komplexe Lagermodelle, wie sie in [13] und [11] vorgestellt und per Cosimulation eingebunden wurden, durch die Methodik direkt in die MKS-Simulationsumgebung integriert werden. Analog können ebenfalls aufwendige Straßen- [79] oder Reifenmodelle [74], die aktuell cosimuliert werden müssen, direkt in die MKS-Simulation eingebunden werden.

Für alle genannten Anwendungsbeispiele lassen sich so die Vorteile von monolithischen Simulationen nutzen. Die direkte Implementierung des Gesamtsystems in eine Simulationsumgebung und somit die Nutzung lediglich eines numerischen Integrators trägt nicht nur zur numerischen Stabilität bei, sondern ermöglicht auch, wie im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt, eine Reduktion der benötigten Simulationszeit. Des Weiteren wird durch die ausschließliche Nutzung der MKS-Entwicklungsumgebung eine nahtlose Integration in den bestehenden Entwicklungsprozess begünstigt. Dies erhöht die Praktikabilität, was den operativen Einsatz in industriellen Anwendungsbereichen erleichtert.

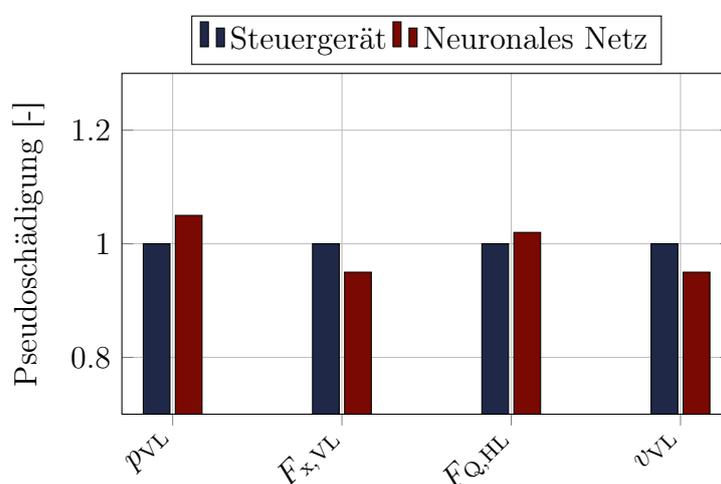


Abb. 7.8: Gegenüberstellung der Pseudoschädigung für ausgewählte Kräfte und charakteristische Zustandsgrößen für eine Dauerlaufsimulation

7.5 Adaption der Methodik zur Rekonstruktion ausgefallener Messkanäle

Die entwickelte Methodik und die daraus gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Abbildung von Regelsystemen mittels neuronaler Netze können auf diverse andere Kontexte

adaptiert werden. Grundsätzlich stellt die Methodik ein strukturiertes Verfahren zur Verarbeitung zeitlich veränderlicher Eingangssignale mit dem Ziel der Vorhersage zeitabhängiger Ausgangssignale dar. Dieses kann auch für andere Problemstellungen wie beispielsweise zur Vorhersage ausgefallener Messkanäle genutzt werden.

Bei Dauerlaufversuchen, in denen Testfahrzeuge mehrere hunderttausend Kilometer zurücklegen, stellt der Ausfall von Messkanälen aufgrund langer Messzeiten und wechselnder Wetter- sowie Straßenbedingungen eine bedeutende, häufig auftretende Herausforderung dar [92, 66]. Da es aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich ist, einen Dauerlauf während des Entwicklungsprozesses zu wiederholen, können die Adaption und Anwendung der hier entwickelten Methodik Abhilfe schaffen, um die ausgefallenen Messkanäle zu rekonstruieren und für die Analyse der Betriebslasten zu nutzen.

Die Grundidee besteht darin, dass ein ausgefallener Messkanal durch einen eindeutigen Zusammenhang zu anderen Messkanälen auf Basis der Daten der funktionstüchtigen Messkanäle ermittelt und rekonstruiert werden kann. Da für viele der Messkanäle dieser Zusammenhang nicht unmittelbar mathematisch dargestellt werden kann, bietet das neuronale Netz eine Möglichkeit, den Zusammenhang zu identifizieren und so den Kanal zu rekonstruieren. Hier wird die Analogie zu der in dieser Arbeit entwickelten Methodik deutlich. Anstatt der Identifizierung des Regelalgorithmus auf Basis der zeitlich variierenden Fahrzeugzustandsgrößen wird nun versucht, mithilfe des neuronalen Netzes auf Basis der zeitlich variierenden Fahrzeugzustandsgrößen ein Zusammenhang zu dem ausgefallenen Messkanal herzustellen. Dazu wird das neuronale Netz mit den Messdaten vor Ausfall des spezifischen Messkanals trainiert.

Die genaue Methodik ist in Abbildung 7.9 schematisch dargestellt. Im Gegensatz zur Abbildung der Regelsysteme, bei denen die Eingangsgrößen klar definiert sind, ist hier als Erstes die Identifikation relevanter Eingangssignale für den ausgefallenen Kanal notwendig, da zu viele oder nicht relevante Eingangsgrößen den Trainingsprozess und die Identifikation eines eindeutigen Zusammenhangs durch das neuronale Netz behindern würden. Natürlich können die Messkanäle auch auf der Grundlage physikalischer Überlegungen ausgewählt werden. Um jedoch eine automatisierte, vom Anwendungsfall unabhängige Methodik vorzustellen, werden die relevanten Kanäle in dieser Arbeit mathematisch bestimmt. Hierzu wird, wie in [34] beschrieben, mithilfe eines auf einem Entscheidungsbaum basierenden Modells ein sogenannter Feature-Identifikationswert für jeden Messkanal bestimmt, der die Korrelation zwischen dem ausgefallenen Signal und dem jeweiligen Kanal angibt.

Auf Basis der ausgewählten Eingangssignale kann analog zur vorgestellten Methodik zur Abbildung der Regelsysteme eine Hyperparameteroptimierung zur Bestimmung der optimalen Netzarchitektur durchgeführt werden. Zusätzlich zu den variierten Parametern wird an dieser Stelle auch die Anzahl an Eingangsparametern optimiert.

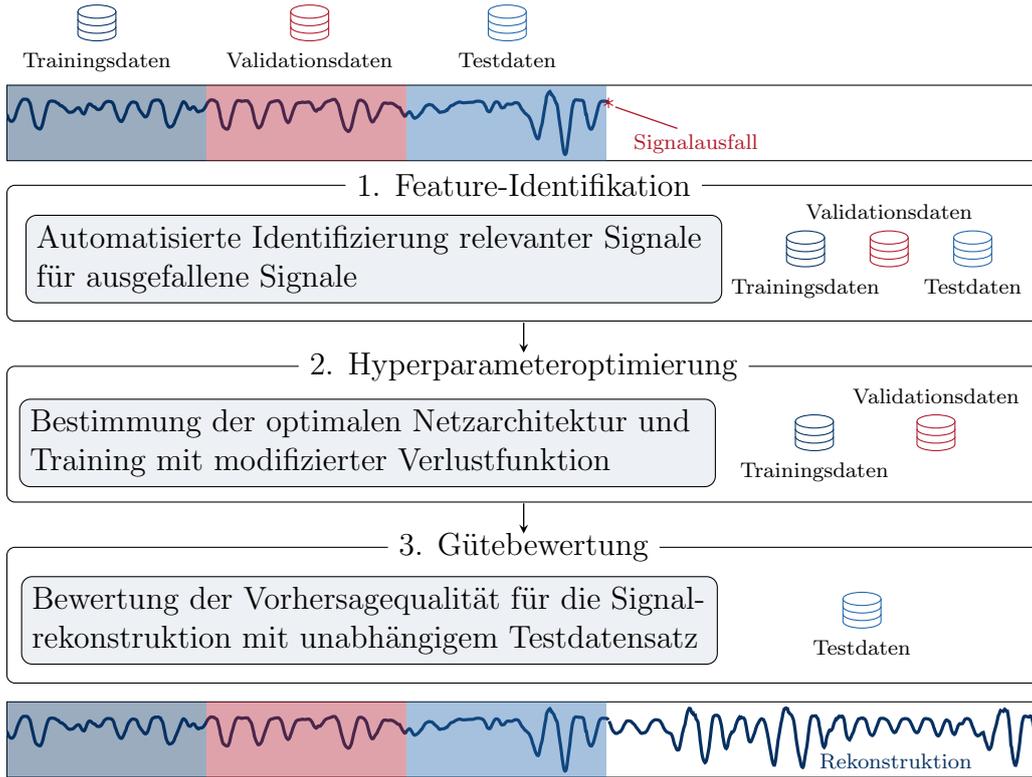


Abb. 7.9: Schematisches Vorgehen zur Rekonstruktion von ausgefallenen Messkanälen mittels neuronaler Netze

Die Zeitreihen der Messsignale vor dem Signalausfall werden in drei Datensätze aufgeteilt. Zum einen erfolgt eine Einteilung in Trainingsdaten, die zum Training des neuronalen Netzes für den jeweiligen Hyperparametersatz verwendet werden. Den zweiten Datensatz stellen die Validierungsdaten dar. Diese werden zur Bewertung der Vorhersagequalität jedes trainierten Netzes anhand der definierten Verlustfunktion genutzt. Da der Schwerpunkt der Rekonstruktion auf ermüdungsbedingten Aspekten und somit auf einer guten Abbildung der Schädigung liegt, ist die Darstellung von Lastspitzen von besonderer Bedeutung. Klassische Verlustfunktionen, wie die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers oder der absolute Fehler (MAE), neigen dazu plötzliche Belastungsspitzen, die für die Schädigung eine entscheidende Rolle spielen, zu vernachlässigen [27]. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine modifizierte, gewichtete RMSE-Verlustfunktion $WRMSE$ für den Trainingsprozess vorgeschlagen:

$$WRMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i (y_{\text{pred},i} - y_{\text{true},i})^2 \quad (7.1)$$

$$\text{mit } a_i = \begin{cases} 1 & \text{für } y_{\text{true},i} < Y_{\text{lim}} \\ C & \text{für } y_{\text{true},i} \geq Y_{\text{lim}} \end{cases}$$

Hierbei bezeichnet y_{pred} den vorhergesagten Wert des neuronalen Netzes und y_{true} den

tatsächlich gemessenen Wert. Hinzu kommt der Gewichtungsfaktor a_i , der den Einfluss von Lastspitzen beim Training verstärkt. Dieser kann durch die beiden Parameter C und Y_{lim} an das jeweilige Anwendungsbeispiel angepasst werden.

Für das im Rahmen der Hyperparameteroptimierung identifizierte, beste neuronale Netz wird anschließend mit den restlichen Daten, dem sogenannten Testdatensatz, die Abbildungsgüte unabhängig quantifiziert. Die Ergebnisse des Validierungsdatensatzes können zu diesem Zweck nicht direkt verwendet werden, da diese Daten im Optimierungsprozess verwendet wurden und somit keine Rückschlüsse auf die Vorhersagequalität für neue unabhängige Daten zulassen.

Das Vorgehen wird im Folgenden am Beispiel eines über sechs Monate dauernden, schädigungsüberwachten Dauerlaufs des Volkswagen Caddy 5 angewendet und verdeutlicht. Während der Messkampagne sind 140 GB an Messdaten verteilt auf 600 Messkanäle aufgezeichnet worden. Es wurde bewusst ein solch umfangreiches Beispiel gewählt, um die Praxistauglichkeit für große Datenmengen zu demonstrieren. Um die Vorhersagequalität zu bewerten und die Hypothese zu überprüfen, dass die Vorhersagequalität des unabhängigen Testdatensatzes mit der der Signalrekonstruktion übereinstimmt, wird die Rekonstruktion am Beispiel eines hypothetischen Messkanalausfalls einer Längslenkerkraft demonstriert. Der fiktive Ausfall tritt nach 30 % Messkampagnenfortschritt auf.

In einem ersten Schritt werden die relevanten Kanäle für die Längslenkerkraft anhand des Feature-Identifikationswertes bestimmt. In Abbildung 7.10 ist diese Bewertung für mehrere Kanäle in normalisierter Form dargestellt. Ein Wert von null bedeutet, dass kein Zusammenhang zwischen der Längslenkerkraft und dem jeweiligen Kanal besteht. Dies ist z.B. für die GPS-Höhe des Fahrzeugs der Fall. Da es aus mechanischer und physikalischer Sicht keine Korrelation zwischen diesem Messkanal und der Lenkerkraft gibt, war dieser Wert zu erwarten.

Die höchste Korrelation zeigen die Längslenkerkraftkanäle an anderen Messstellen sowie die Beschleunigungssensoren an den einzelnen Rädern. Auch die Dehnungen an den Dämpfern weisen eine hohe Korrelation auf. Die Korrelationen zwischen den Längslenkerkraftkanälen, den Dehnungssignalen der Dämpfer und den Beschleunigungssignalen der Messräder sind plausibel, da diese auf die in das Fahrwerk eingeleiteten Kräfte zurückgeführt werden können, die auch die gesuchte Längslenkerkraft bestimmen.

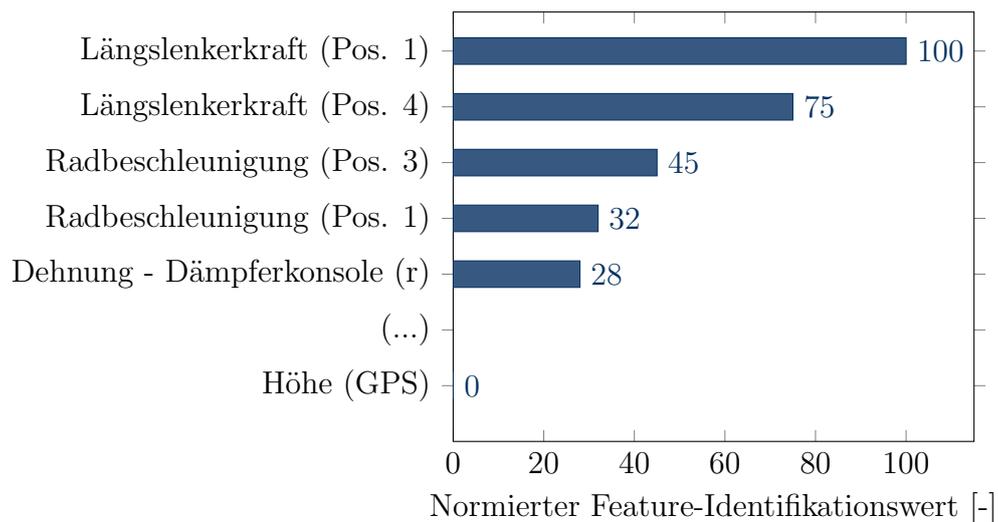
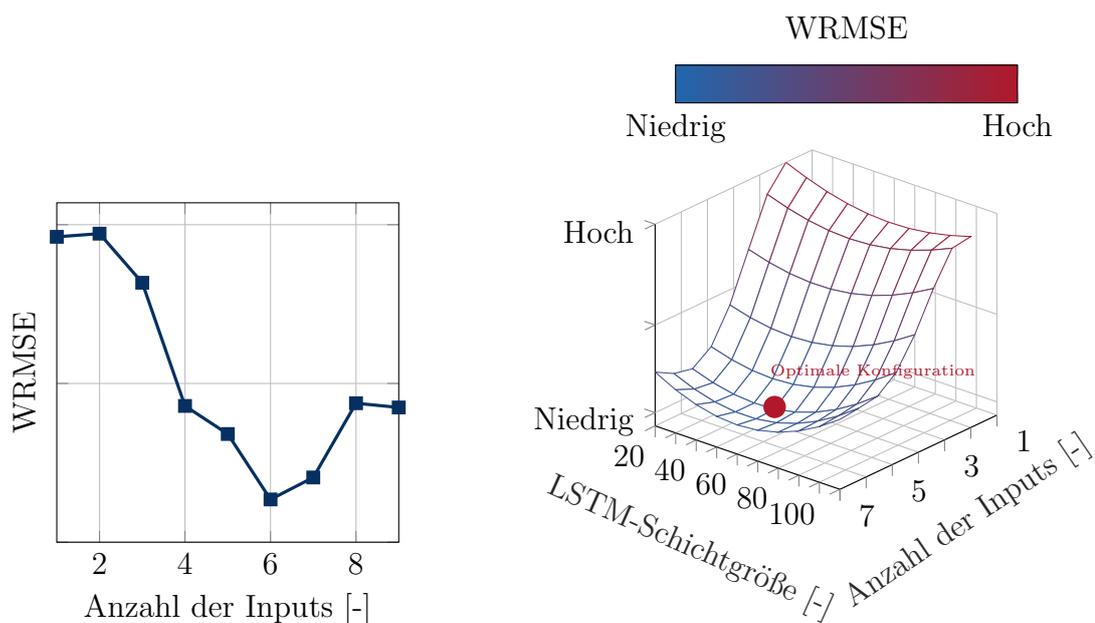


Abb. 7.10: Übersicht des normierten Feature-Identifikationswerts ausgewählter Größen für die Längslenkerkraft



(a) Einfluss der Anzahl der Eingangssignale auf WRMSE **(b)** Einfluss der Schichtenanzahl und -größe auf WRMSE

Abb. 7.11: Ergebnisse der Hyperparameteroptimierung zur Identifizierung der optimalen Netzwerkarchitektur

Nach Bestimmung der Eingangsparameter kann, analog zur Abbildung von Regelsystemen, die Hyperparameteroptimierung durchgeführt werden. In Abbildung 7.11 sind dazu ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Im Gegensatz zu der Hyperparameteroptimierung in Abschnitt 7.2 ist, wie bereits erwähnt, ebenfalls die Anzahl der Eingangsgrößen ein zu optimierender Parameter. Wie aus der Abbildung hervorgeht, hat dieser Parameter sogar einen deutlich höheren Einfluss als die Schichtgröße und Architektur des neuronalen Netzes. Bei einer zu geringen Anzahl an Eingangsgrößen liegen dem neuronalen Netz nicht ausreichend Informationen vor, um den mechanischen Zusammenhang sinnvoll zu bestimmen. Auch eine zu hohe Anzahl an Eingangssignalen behindert den Optimierungsprozess und führt zu einer verminderten Vorhersagegüte.

Mithilfe der so bestimmten Netzarchitektur kann die Abbildungsqualität des neuronalen Netzes bestimmt werden. In Abbildung 7.12 sind die Abweichungen der Pseudoschädigung vor Ausfall des Messkanals für die einzelnen Datensätze dargestellt. Erwartungsgemäß sind die Abweichungen von dem zur Optimierung verwendeten Trainings- und Validationsdatensatz am geringsten. Für den unabhängigen Testdatensatz zeigt sich eine durchschnittliche Abweichung von 7 % über die gesamte Dauer der verfügbaren Daten vor dem Ausfall des Messsignals. Bei der Einzelauswertung über kurze Zeiträume liegt die Abweichung zwischen 5 % und 9 %. Festzuhalten ist, dass über den gesamten Zeitraum eine ähnliche Vorhersagequalität vorliegt und keine Verschlechterung der Vorhersagequalität über die Zeit erkennbar ist. Dies lässt vermuten, dass die so ermittelte Vorhersagequalität auch bei der Rekonstruktion des Kanals eine ähnliche Übereinstimmung aufweist.

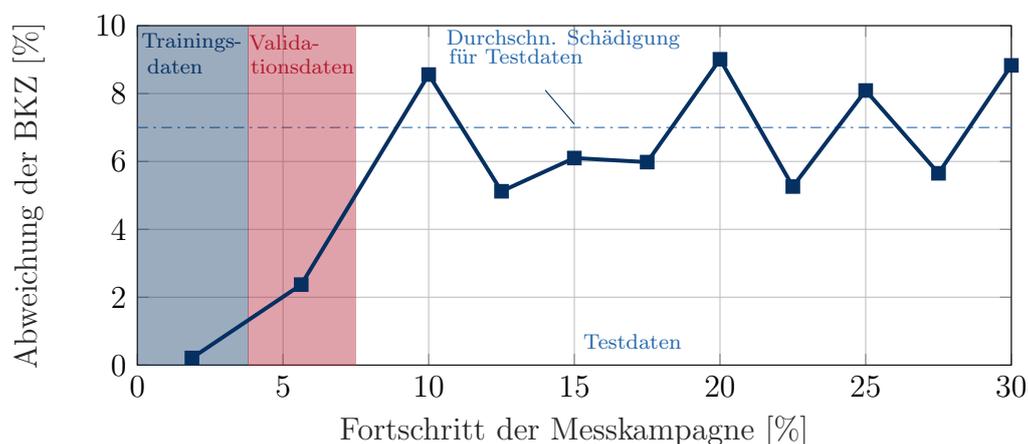


Abb. 7.12: Zeitlicher Verlauf der Abweichung der Pseudoschädigung für die vorhandenen Daten vor Messsignalausfall

Die Ergebnisse der Vorhersage sind in Abbildung 7.13 den tatsächlichen Messwerten gegenübergestellt. Es zeigt sich qualitativ, dass das neuronale Netz eine sehr gute Rekonstruktion des Messsignals im Zeit- und im Frequenzbereich ermöglicht. Dies wird auch in Abbildung 7.14 quantitativ bestätigt, in der die Abweichung der Pseudoschädigung abschnittsweise dargestellt ist. Diese liegt im Schnitt bei 7.4 %, was zeigt, dass das rekon-

struierte Signal dank der hohen Übereinstimmung für die Analyse und den Freigabeprozess uneingeschränkt genutzt werden kann. Des Weiteren belegt dies, dass die auf Basis des Testdatensatzes ermittelte Vorhersagequalität von 7 % ein aussagekräftiges Maß zur Bewertung des neuronalen Netzes darstellt. Für die mehrmonatige Messkampagne mit 140 GB Messdaten dauerte die durchgeführte Kanalrekonstruktion 6.5 Stunden. Die Modifikation der Verlustfunktion und die damit verbundene Effizienzverbesserung des Trainingsprozesses erlaubte, verglichen mit klassischen Verlustfunktionen, eine Reduktion um 2.5 Stunden.

In diesem Abschnitt wurden beispielhaft die Adaption der ursprünglichen Methodik und dessen Anwendung umrissen, um Potentiale für Anwendungen jenseits der Überführung von Cosimulationen zu monolithischen Simulationen aufzuzeigen. Für tieferegehende Informationen hinsichtlich der Adaption und Rekonstruktion von Messkanälen sei auf [34] verwiesen.

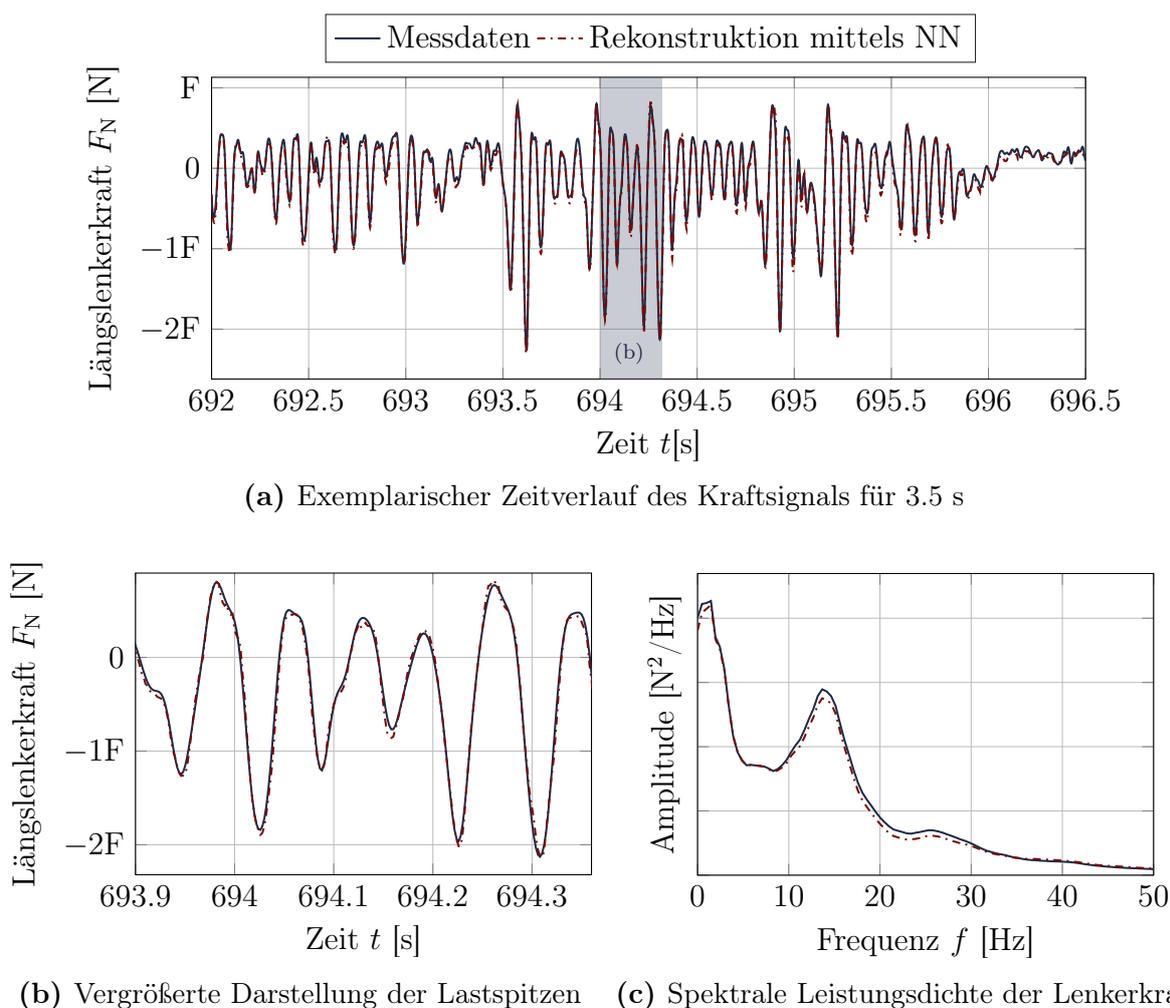


Abb. 7.13: Gegenüberstellung von rekonstruiertem und tatsächlichem Signal für Längslenkerkraft

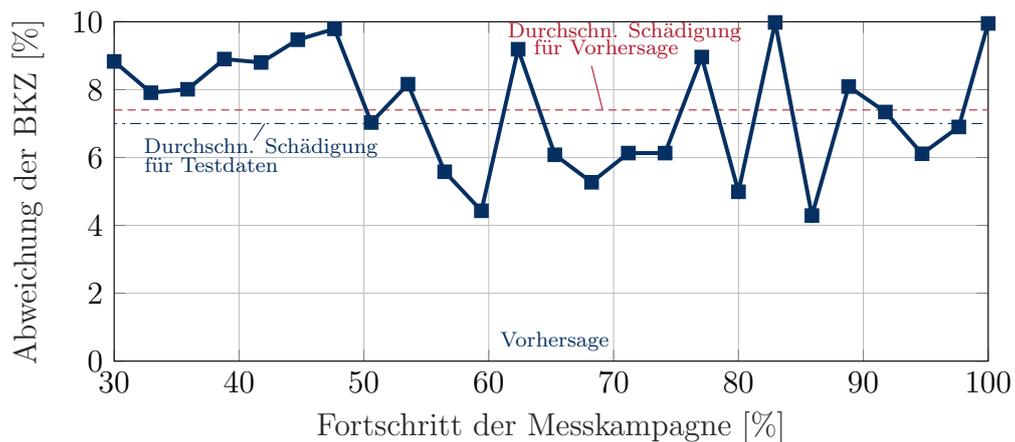


Abb. 7.14: Zeitlicher Verlauf der Abweichung der Pseudoschädigung für das rekonstruierte Signal

Kapitel 8

Fazit und Ausblick

Im Fahrzeugentwicklungsprozess bietet das Ersetzen physischer Prototypen durch virtuelle Simulationsmethodiken ein großes Potential zur Effizienzsteigerung. Für eine prototypenfreie Entwicklung ist es aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht unerlässlich, die zunehmend relevanter werdenden Auswirkungen von Regelsystemen auf die Bauteilbelastung simulativ abbilden zu können. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit die Integration von Regelsystemen in Mehrkörper-Gesamtfahrzeugsimulationen untersucht, um zu bewerten, ob eine prototypenfreie Entwicklung unter Berücksichtigung betriebsfestigkeitstechnischer Anforderungen realisierbar ist.

Aufgrund der Tatsache, dass Bremsungen einen wesentlichen Beitrag zur Schädigung von Fahrwerkskomponenten leisten und somit für den Auslegungsprozess von Bauteilen besonders relevant sind, wurden die Untersuchungen am Beispiel eines Bremsregelsystems durchgeführt. Für eine fundierte Beurteilung der systematischen Integration des Regelsystems wurden drei zentrale Fragen behandelt, die nun abschließend beantwortet werden sollen:

1. Welcher ist der geeignetste Kopplungsansatz für die Integration von Regelfunktionalitäten in MKS-Gesamtfahrzeugsimulationen?

Als ein wesentliches Entscheidungskriterium für die Auswahl des passenden Kopplungsansatzes erwies sich die Kompatibilität der vorhandenen virtuellen Steuergerätemodelle mit dem jeweiligen Kopplungsansatz. So liegen die seriennahen, virtuellen Steuergeräte häufig in selbstintegrierender Form vor, für welche ausschließlich eine schwache Kopplung in Form einer Cosimulation geeignet ist. Für die Nutzung der Cosimulation bedarf es der Bestimmung zusätzlicher, kopplungsbedingter Abstimmparameter. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Analyse wurde die Sensitivität und damit die Wichtigkeit des Kommunikationsintervalls für die Abbildungsgüte festgestellt. Die hohe Sensitivität dieses Parameters konnte mithilfe eines transparenten Level 0-Regelsystemmodells auf einen sich selbstverstärkenden Prozess von Diskretisie-

rungsunterschieden der ausgetauschten Simulationsgrößen zurückgeführt werden. Die Anwendung von in der Literatur etablierten Erfahrungswerten zur Bestimmung dieses Parameters hat sich als grundlegender Orientierungsrahmen bewährt. Eine individuelle Überprüfung und Anpassung für jedes spezifische Szenario ist jedoch zwingend erforderlich, um ein sinnvolles Regelverhalten und eine hohe Ergebnisqualität sicherzustellen.

Für nicht selbstintegrierende Steuergeräte ist auch die Methode der C-Code-Integration grundsätzlich anwendbar, jedoch war in dieser Arbeit eine fehlerfreie Kompilierung des Regelsystemcodes aufgrund von Versagen der automatischen Codegenerierung nicht möglich, was sich mit Erkenntnissen aus früheren Untersuchungen deckt.

2. Welche Abbildungsgüte ist bei der Vorhersage von Kräften erreichbar und wie steht diese Güte in Relation zu der in Messungen auftretenden Streuung?

Durch die Einbindung eines seriennahen Bremssteuergeräts per Cosimulation konnten alle wesentlichen Charakteristiken des Bremsvorgangs, sowohl bei der Reproduktion einzelner Bremsungen, als auch bei der Vorhersage des gesamten Dauerlaufkurses, abgebildet werden. Die untersuchten Lastgrößen bei den simulierten Bremsmanövern lagen durchgehend innerhalb des im Versuch auftretenden Streuungsbandes, sodass eine realistische, simulative Lastdatenermittlung gegeben ist. Auch das Streuungsband selbst kann durch eine Variation der Simulationsparameter numerisch reproduziert werden. Diese simulative Reproduktion der Messstreuung ermöglicht die Einordnung einzelner, simulierter Bremsmanöver in das Streuungsband und somit die Identifizierung einer geeigneten Bremsung für die Simulation einer repräsentativen Runde des Dauerlaufkurses. Durch dieses Vorgehen konnte eine hohe Abbildungsgüte mit einer Abweichung von nur 15 % in der vorhergesagten Schädigung erzielt werden. Zur Erzielung dieser Abbildungsgüte war die Einführung eines Verzögerungsglieds zwischen dem Regelsystem und dem Gesamtfahrzeugmodell notwendig. Mithilfe einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse konnte die Genauigkeitsanforderung dieses Verzögerungsglieds auf zehn Millisekunden bestimmt werden, was als Richtwert bei der Kalibrierung der Simulationsumgebung für zukünftige Untersuchungen empfohlen wird.

3. Wie können die am häufigsten vorkommenden, virtuellen, seriennahen Steuergeräte produktiv integriert werden, obwohl viele Kommunikationsgrößen in MKS-Modellen nicht abgebildet sind?

In dieser Arbeit konnte das Potential von neuronalen Netzen zur Abbildung von Regelfunktionalitäten und dessen Nutzung in MKS-Gesamtfahrzeugsimulationen aufgezeigt werden. Durch das Training des neuronalen Netzes mittels vorhandener Daten einer beliebigen Datenquelle und dessen anschließende Integration in die MKS-Simulation bietet diese Methodik auch die Möglichkeit der produktiven Integration von seriennahen Steuergerätefunktionalitäten. Für das in dieser Arbeit untersuchte Bremsregelsystem

konnte für die analysierten Kraftgrößen und regelprozessabhängigen Zustandsgrößen eine hohe Abbildungsqualität erreicht werden. Die Abweichungen der vorhergesagten Schädigung betrug hierbei maximal $\pm 5\%$. Hinsichtlich der Rechenzeit ist bei der Integration der Regelfunktionalität durch neuronale Netze ein deutlicher Effizienzvorteil feststellbar. Für die Dauerlaufsimulation konnte so eine Reduzierung der Rechenzeit um 44 % von ca. neun Stunden auf fünf Stunden erreicht werden.

Auf Basis der systematisch beantworteten Fragen sowie den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen lässt sich festhalten, dass die Auswirkungen der Regelsysteme auf Betriebsfestigkeitsphänomene simulativ aussagekräftig abgebildet werden können. Durch die entwickelte Methodik ist auch eine Integration der bisher nicht praktikabel und ökonomisch sinnvoll nutzbaren, detailreichen Steuergeräte möglich. Dies bedeutet, dass die Lastdatenermittlung aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht virtuell durchgeführt werden kann. Eine prototypenfreie Entwicklung und die damit verbundene Effizienzsteigerung im Fahrzeugentwicklungsprozess ist folglich möglich.

Die gewonnenen Erkenntnisse können somit zur Anwendung auf andere Steuergeräte übertragen werden. So wären bspw. Untersuchungen zu den Auswirkungen einer adaptiven Fahrwerksregelung (DCC) auf die Lastsituation im Fahrwerk denkbar.

Neben dem Transfer der Erkenntnisse auf andere Regelsysteme sind auch weiterführende Untersuchungen zu Anwendungsmöglichkeiten realisierbar. Die hohe, hier festgestellte Abbildungsgüte der Regelfunktionalitäten bietet beispielsweise Potential die Abstimmung von Regelsystemparametersätzen oder die Absicherung der Regelfunktionalitäten virtuell durchzuführen. Beides würde die Virtualisierung des Fahrzeugentwicklungsprozesses weiter vorantreiben und eine Verkürzung von Entwicklungszeiten begünstigen.

Ebenfalls bietet die im Rahmen dieser Arbeit etablierte Methodik zur Überführung von Cosimulationen in monolithische Simulationen mittels neuronaler Netze Potential für weiterführende Untersuchungen anderer Simulationsbestandteile, wie bspw. komplexe Lager- oder Reifenmodelle. Wie bereits anhand des Beispiels der Signalrekonstruktion aufgezeigt, sind auch weitere Adaptionmöglichkeiten der Methodik außerhalb von numerischen Simulationen denkbar.

Literatur

- [1] Charu Aggarwal. *Neural Networks and Deep Learning*. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-94463-0.
- [2] Hendrik Amelunxen. *Fahrdynamikmodelle für Echtzeitsimulationen im komfortrelevanten Frequenzbereich*. HNI-Verlagsschriftenreihe. Paderborn: Universitätsbibliothek, 2013.
- [3] Dieter Ammon. *Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik*. Bd. 73. Leitfäden der angewandten Mathematik und Mechanik. Wiesbaden: Springer, 1997.
- [4] Srinivaas Ashok Kumar u. a. “Simulation Study on Variants of ABS”. In: *International Journal of Engineering & Technology* 7 (2018), S. 97–100. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.6.14948.
- [5] Martin Benedikt, Daniel Watzenig und Anton Hofer. “Modelling and analysis of the non-iterative coupling process for co-simulation”. In: *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 19 (2013), S. 451–470. DOI: 10.1080/13873954.2013.784340.
- [6] Christian Bertsch, Elmar Ahle und Ulrich Schulmeister. “The Functional Mockup Interface - seen from an industrial perspective”. In: *the 10th International Modelica Conference*. Linköping University Electronic Press, 2014, S. 27–33. DOI: 10.3384/ecp1409627.
- [7] Hans-Hermann Braess. “Komplexität im Automobilbau”. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117.7-8 (2015), S. 98. DOI: 10.1007/s35148-015-0085-7.
- [8] Sebastian Jürgen Brandes. “Gesamtfahrzeugsimulation betriebsfestigkeitsrelevanter Manöver unter Berücksichtigung von Fahrwerkregelsystemen”. Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2016.
- [9] Martin Brune und Kurt Pötter. “Mechatronische Systeme bei der Betriebsfestigkeitsprüfung und -simulation am Beispiel eines variablen Dämpfers”. In: *Materials Testing* 50.7 (2008), S. 390–396. DOI: 10.3139/120.100896.
- [10] Steven Lee Brunton und J. Nathan Kutz. *Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.

-
- [11] Shea Charkowsky. “Co-Simulation of Active Magnetic Bearing Rotors Using Adams, MSC Apex, and Simulink”. Diss. California Polytechnic State University, 2023.
- [12] Weitao Chen, Matthijs Klomp und Shenhai Ran. “Real-time Co-simulation Method Study for Vehicle Steering and Chassis System”. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018), S. 273–278. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.07.045.
- [13] Makarand Datar, Ilinca Stanciulescu und Dan Negrut. “A Co-Simulation Framework for Full Vehicle Analysis”. In: ANNUAL. SAE International, 2011. DOI: 10.4271/2011-01-0516.
- [14] DIN. *DIN ISO 8855:2013-11, Straßenfahrzeuge- Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013. DOI: 10.31030/1941260.
- [15] Andreas Dörnhöfer. *Betriebsfestigkeitsanalyse elektrifizierter Fahrzeuge: Multilevel-Ansätze zur Absicherung von HV-Batterien und elektrischen Steckkontakten*. Berlin, 2019.
- [16] Christian Eckstein. *Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern*. Bd. 26. Maschinenelemente und Getriebetechnik Berichte. 2017.
- [17] Stefan Einsle. *Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern*. Dresden: TUDpress Verlag, 2011.
- [18] Metin Ersoy und Stefan Gies. *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017.
- [19] FKM. *Analytical strength assessment of components in mechanical engineering: FKM-guideline*. Bd. 5. Frankfurt: VDMA Verlag, 2003.
- [20] Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit. *Jahresbericht 2018 Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit*. 2019. URL: www.lbf.fraunhofer.de/content/dam/lbf/de/ePaper18/epaper/LBF-JB-2017.pdf (besucht am 11.02.2024).
- [21] Detlev Frick u. a. *Data Science: Konzepte, Erfahrungen, Fallstudien und Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [22] Simon Fürst u. a. “AUTOSAR–A Worldwide Standard is on the Road”. In: *14th International VDI Congress Electronic Systems for Vehicles*. Bd. 62. 2009, S. 5.
- [23] Lei Gao u. a. “Multi-body modeling and dynamic analysis of the heavy-load multi-axle vehicle Based on 6S/6M ABS control”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 19 (2022). DOI: 10.1177/09544070221128360.
- [24] Michael Gipser. “FTire – the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics”. In: *Vehicle System Dynamics* 45 (2007), S. 139–151.
- [25] Ting Gong, Hui Yan und Peng Fei Liu. “Modeling and Simulation for Anti-Lock Braking System (ABS) of Automobiles Based on Simulink”. In: *Applied Mechanics*

- and Materials* 716-717 (2014), S. 1504–1507. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.716-717.1504.
- [26] Sebastian Götz und Klaus-Georg Eulitz. *Betriebsfestigkeit*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. DOI: 10.1007/978-3-658-38511-8.
- [27] Benedikt Grupp, Stephan Salber und Alexander Haug. “Use of customer collectives and data-analytics methods to specify durability requirements”. In: *DVM Report* 46 (2019), S. 59–75.
- [28] Günter Schmitz. *Mechatronik im Automobil*. Bd. 18. Haus der Technik. Renningen, 2003.
- [29] Nora Hägele u. a. “Lastannahmen und Betriebsfestigkeitsnachweis für Fahrwerksbauteile”. In: *Materials Testing* 53 (2011), S. 399–406. DOI: 10.3139/120.110242.
- [30] Andrew Halfpenny und Mark Pompetzki. “Proving Ground Optimization and Damage Correlation with Customer Usage”. In: *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 4 (2011), S. 620–631. DOI: 10.4271/2011-01-0484.
- [31] Shahram Hanifi u. a. “Offshore Wind Power Forecasting—A New Hyperparameter Optimisation Algorithm for Deep Learning Models”. In: *Energies* 15 (2022), S. 6919. DOI: 10.3390/en15196919.
- [32] Xing Lei He u. a. “Research on Co-simulation of Anti-lock Brake System Based on Carsim and Simulink”. In: *2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. Bd. 5. 2021, S. 808–812. DOI: 10.1109/ITNEC52019.2021.9586820.
- [33] Bernd Heißing, Metin Ersoy und Stefan Gies. *Fahrwerkhandbuch*. ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. DOI: 10.1007/978-3-658-01992-1.
- [34] Salim Hobusch u. a. “Methodology for Automated Reconstruction of Failed Measurement Channels using Neural Networks”. In: *Advanced Engineering Informatics* (2024). Unveröffentlicht. In Einreichungsprozess.
- [35] Rolf Isermann. *Fahrdynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006. DOI: 10.1007/978-3-8348-9049-8.
- [36] ProSTEP iViP, Hrsg. *Requirements for the Standardization of Virtual Electronic Control Units*. 2020. URL: www.ps-ent-2023.de/fileadmin/prod-download/WhitePaper_V-ECU_2020_05_04-EN.pdf (besucht am 11.02.2024).
- [37] Robert Kastner. “Modellbildung und Simulation eines kooperativen Stauassistenten über ein Co-Simulationsframework”. Diss. Graz: TU Graz, 2017.
- [38] Nitish Shirish Keskar u. a. “On large-batch training for deep learning: Generalization gap and sharp minima”. In: *arXiv preprint* (2016).

- [39] Christina Klüver, Jürgen Klüver und Jörn Schmidt. *Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-35276-9.
- [40] Andreas Koch, Jonas Brauer und Jens Falkenstein. “Drivability Optimization of Electric Vehicle Drivetrains for Brake Blending Maneuvers”. In: *World Electric Vehicle Journal* 13 (2022), S. 209. DOI: 10.3390/wevj13110209.
- [41] Thorsten Koch. *Integration von Konstruktion und mechatronischer Komposition während des Entwurfs mechatronischer Systeme am Beispiel eines integrierten Radmoduls*. Bd. 401. Rechnerunterstützte Verfahren. Düsseldorf: VDI Verl., 2005.
- [42] Michael Köhler u. a. *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Dordrecht: Springer, 2012.
- [43] Hakan Koylu und Ersin Tural. “Experimental study on braking and stability performance during low speed braking with ABS under critical road conditions”. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal* 24 (2021), S. 1224–1238. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.02.001.
- [44] Ferit Küçükay. *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2022. DOI: 10.1007/978-3-658-36727-5.
- [45] Steven Lange. *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Reifensimulation auf digitale Lastkollektivaussagen: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2012*. Bd. 2013,4. Garbsen: PZH Verl., 2013.
- [46] Kangwon Lee, Youngwoo Kim und Jinhee Jang. “A study of integrated chassis control algorithm with brake control and suspension control systems for vehicle stability and handling performance”. In: *ICCAS-SICE*. 2009, S. 4053–4057.
- [47] Martin Levesley u. a. “Multi-body co-simulation of semi-active suspension systems”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics* 221 (2007), S. 99–115. DOI: 10.1243/1464419JMBD69.
- [48] Georg Mack. *Eine neue Methodik zur modellbasierten Bestimmung dynamischer Betriebslasten im mechatronischen Fahrwerkentwicklungsprozess*. Bd. 28. Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik. Karlsruhe: Univ.-Verl., 2009.
- [49] Giulio Maier u. a. *Simulation Techniques for Applied Dynamics*. Bd. 507. CISM International Centre for Mechanical Sciences. Wien: Springer Verlag, 2009.
- [50] MathWorks. *Anti-Lock Braking System (ABS)*. 2023. URL: de.mathworks.com/help/simulink/slref/modeling-an-anti-lock-braking-system.html (besucht am 11.02.2024).
- [51] George Matieş und Cristian Fosala. “Detection of ABS Events in Electronic Brake Systems using Machine Learning Algorithms”. In: *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. 2023, S. 1–6. DOI: 10.1109/ATEE58038.2023.10108131.

- [52] Gregory McCann und Prashant Dilip Khapane. “Integration of Active Braking System in Multi-Body Systems Tool to Improve Prediction of Braking Loads”. In: *SAE International Journal of Commercial Vehicles* 10 (2017), S. 219–235.
- [53] Warren McCulloch und Walter Pitts. “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”. In: *The Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (1943), S. 115–133. DOI: 10.1007/BF02478259.
- [54] Milton Miner. “Cumulative damage in fatigue”. In: *Journal of applied mechanics* 12 (1945), S. 159–164.
- [55] Roger Mortimer. “Foot brake pedal force capability of drivers”. In: *Ergonomics* 17 (1974), S. 509–513. DOI: 10.1080/00140137408931381.
- [56] Dan Negrut und Brett Harris. “ADAMS theory in a nutshell”. In: *Department of Mechanical Engineering, The University of Michigan* (2001).
- [57] Arvid Palmgren. “Die Lebensdauer von Kugellagern”. In: *Verfahrenstechnik* 68 (1924), S. 339–341.
- [58] Thomas Potinecke, Christina Edelmann und Alexander Slama. “Digitale Produktentstehung”. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 98 (2003), S. 274–275. DOI: 10.3139/104.100645.
- [59] Vlado Pracny, Martin Meywerk und Alexander Lion. “Full vehicle simulation using thermomechanically coupled hybrid neural network shock absorber model”. In: *Vehicle System Dynamics* 46.3 (2008), S. 229–238. DOI: 10.1080/00423110701271864.
- [60] Francesco Pretagostini u. a. “Survey on Wheel Slip Control Design Strategies, Evaluation and Application to Antilock Braking Systems”. In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 10951–10970. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965644.
- [61] Baopu Qian. *Ermittlung von Fahrwerksbelastungen aus CAN-Daten*. Bd. 167. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2023. DOI: 10.1007/978-3-658-40975-3.
- [62] Jochen Rauh. “OpenCRG—the new open standard to represent high precision 3D road data in vehicle simulation tasks on rough roads for handling, ride comfort, and durability load analyses”. In: *Proceedings of the 21st International Symposium Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks IAVSD*. Bd. 9. 2009, S. 17–21.
- [63] Konrad Reif. *Bremsen und Bremsregelsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010. DOI: 10.1007/978-3-8348-9714-5.
- [64] Roland Rennert. *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*. Frankfurt: VDMA-Verl., 2012.
- [65] Georg Rill und Thomas Schaeffer. *Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation: Vertieft in Matlab-Beispielen, Übungen und Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017.
- [66] Eldar Šabanović u. a. “Feasibility of a Neural Network-Based Virtual Sensor for Vehicle Unsprung Mass Relative Velocity Estimation”. In: *Sensors* 21 (2021). DOI: 10.3390/s21217139.

- [67] A. Johnson Santhosh u. a. “Optimization of CNC turning parameters using face centred CCD approach in RSM and ANN-genetic algorithm for AISI 4340 alloy steel”. In: *Results in Engineering* 11 (2021). DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100251.
- [68] Helmut Schelling und Thomas Riegraf. “CAN-Werkzeuge in der Kraftfahrzeugtechnik / CAN-Tools for Automotive Applications”. In: *ITIT* 41 (1999), S. 31–35. DOI: 10.1524/itit.1999.41.5.31.
- [69] Robert Schmoll. *Co-Simulation und Solverkopplung: Analyse komplexer multiphysikalischer Systeme*. Bd. 3/2015. Berichte des Instituts für Mechanik. Kassel: Kassel University Press, 2015.
- [70] Dieter Schramm, Manfred Hiller und Roberto Bardini. *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Berlin: Springer Vieweg, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-54481-5.
- [71] Thomas Sedlacek. “Restbussimulation im Prüfstandseinsatz”. In: *ATZelektronik* 9 (2014), S. 42–45. DOI: 10.1365/s35658-014-0428-2.
- [72] Linda Senger. *Wirkkettenanalyse des Schwingungsphänomens Anfahrstempeln*. Bd. 15. Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2020.
- [73] Young Jin Seo. “A Study on the Vehicle Durability Analysis in Braking Mode”. In: *SAE 2010 World Congress & Exhibition*. SAE Technical Paper Series. SAE International, 2010. DOI: 10.4271/2010-01-0492.
- [74] Radu Serban u. a. “A co-simulation framework for high-performance, high-fidelity simulation of ground vehicle-terrain interaction”. In: *Conference: NATO AVT-265 Specialists’ Meeting, Vilnius, Lithuania (May 2017)*. Bd. 23. 2017, S. 24.
- [75] Snehashish Chakraverty, Deepti Moyi Sahoo, Nisha Rani Mahato. *Concepts of Soft Computing: Fuzzy and ANN with Programming*. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [76] Jeong Hyun Sohn und Woon Kyung Baek. “Vehicle dynamic simulation including an artificial neural network bushing model”. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 19 (2005), S. 255–264. DOI: 10.1007/BF02916143.
- [77] Daniel Sonnet. *Neuronale Netze Kompakt: Vom Perceptron Zum Deep Learning*. IT Kompakt Ser. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2022.
- [78] Rainer Stark u. a. “Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie”. In: *Informatik-Spektrum* 34 (2011), S. 20–28. DOI: 10.1007/s00287-010-0501-z.
- [79] Gerhard Hippmann Stefan Dietz und Gunter Schupp. “Interaction of Vehicles and Flexible Tracks by Co-Simulation of Multibody Vehicle Systems and Finite Element Track Models”. In: *Vehicle System Dynamics* 37.sup1 (2002), S. 372–384. DOI: 10.1080/00423114.2002.11666247.
- [80] Guangfu Sun. *Berechnung von Gittermast-Fahrzeugkranen unter Berücksichtigung der Antriebs- und Regelungssysteme*. FML. München: Utz, Wiss, 2002.

- [81] Bhimavarapu Usharani. “ILF-LSTM: Enhanced loss function in LSTM to predict the sea surface temperature”. In: *Soft Computing* 39 (2022), S. 4214. DOI: 10.1007/s00500-022-06899-y.
- [82] Ondřej Vaculín, Wolf R. Krüger und Michael Valášek. “Overview of Coupling of Multibody and Control Engineering Tools”. In: *Vehicle System Dynamics* 41 (2004), S. 415–429. DOI: 10.1080/00423110412331300363.
- [83] Nico van der Merwe, P. Schalk Els und Vidas Žuraulis. “ABS braking on rough terrain”. In: *Journal of Terramechanics* 80 (2018), S. 49–57. DOI: 10.1016/j.jterra.2018.10.003.
- [84] Lars Völker. “Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation”. Diss. 2011. DOI: 10.5445/KSP/1000021208.
- [85] Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009. DOI: 10.1007/978-3-8348-9977-4.
- [86] Christoph Woernle. *Mehrkörpersysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-15982-4.
- [87] Gary Wood, Mike Blundell und Sanjiv Sharma. “A low parameter tyre model for aircraft ground dynamic simulation”. In: *Materials & Design* 35 (2012), S. 820–832. ISSN: 02613069. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.041.
- [88] Zhang Xiu-qin u. a. “Research on ABS of Multi-axle Truck Based on ADAMS/Car and Matlab/Simulink”. In: *Procedia Engineering* 37 (2012), S. 120–124. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.04.213.
- [89] Shengjie Xu. “The Synthetic 3DOF Wheel Force for Passenger Vehicle Based on Predicted Frequency Response Function Model”. In: *WCX World Congress Experience*. SAE Technical Paper Series. 2018. DOI: 10.4271/2018-01-0123.
- [90] Genki Yagawa und Atsuya Oishi. *Computational Mechanics with Neural Networks*. Cham: Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-66111-3.
- [91] Libin Zhang u. a. “Hydrodynamics analysis and coordinated control method of anti-lock brake based on dynamic axle load”. In: *Desalination and Water Treatment* 269 (2022), S. 228–237. DOI: 10.5004/dwt.2022.28727.
- [92] Ying Zhao u. a. “A Visual Analysis Approach for Understanding Durability Test Data of Automotive Products”. In: *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 10 (2019), S. 1–23. ISSN: 2157-6904. DOI: 10.1145/3345640.
- [93] Yaoqun Zhou. *Dynamisches Bremsverhalten des Reifen-Fahrwerk-Systems*. Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2022.
- [94] Werner Zimmermann und Ralf Schmidgall. *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014.

Disclaimer

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Doktorandentätigkeit bei Volkswagen Nutzfahrzeuge in der Abteilung Fahrwerksentwicklung entstanden. Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.