

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Alexander Georg Fridrich

Ein integriertes
Fahrdynamikregelkonzept
zur Unterstützung des
Fahrwerkentwicklungs-
prozesses



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo consists of a stylized chess knight icon on the left, followed by the text 'Springer Vieweg' in a serif font.

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IFS.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

Alexander Georg Fridrich

Ein integriertes
Fahrodynamikregelkonzept
zur Unterstützung des
Fahrwerkentwicklungs-
prozesses

Alexander Georg Fridrich
IFS, Fakultät 7, Lehrstuhl für
Kraftfahrwesen
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2020

D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-32273-1 ISBN 978-3-658-32274-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-32274-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung der Verlage. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Für meine Großeltern

Käthe und Josef,

Lina und Georg.

In Liebe und Dankbarkeit.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart im Bereich Fahrzeugtechnik und Fahrndynamik.

Ganz besonders danke ich meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die wissenschaftliche Betreuung, die wertvolle Unterstützung und den fachlichen Freiraum zur Gestaltung der Arbeit. Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Oliver Sawodny danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Mitberichts. Herrn Professor Dr.-Ing. Andreas Wagner danke ich für die angenehmen und konstruktiven Gespräche, die Unterstützung in den Forschungsprojekten und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Jens Neubeck und Herrn Dr.-Ing. Werner Krantz für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die gebotene wissenschaftliche Freiheit und die fruchtbaren Diskussionen. Allen Kolleginnen und Kollegen des IFS und des FKFS danke ich herzlich für die uneingeschränkte Hilfsbereitschaft, die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und die großartige Zusammenarbeit. Dadurch konnte ich die herausfordernde Arbeit genießen. Stellvertretend und besonders gebührt meinem langjährigen Bürokollegen Herrn Dr.-Ing. Alexander Ahlert Dank für die facettenreichen Gespräche, die gegenseitige Unterstützung, die tiefgründigen fachlichen Diskussionen und die Durchsicht dieser Arbeit. Den Kollegen des Instituts für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt gilt mein Dank für die angenehme und produktive Zusammenarbeit im *LEICHT*- und *GEMEF*-Projekt. Dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg sei gedankt für die finanzielle Förderung der beiden Projekte. Überdies bedanke ich mich bei all meinen Studierenden, die durch ihre studentischen Arbeiten und Hilfstätigkeiten wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlichster Dank gilt meinen lieben Eltern Traude und Albrecht und meiner lieben Schwester Kristina für die Förderung, das Vertrauen und den grenzenlosen Rückhalt, den sie mir zeit meines Lebens geben. Meiner wundervollen Freundin Nadine danke ich für ihre unendliche Unterstützung, Geduld und bedingungslose Liebe für ihren „besten Linienzeichner der Welt“.

Nufringen

Alexander Georg Fridrich

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	XIX
Zusammenfassung.....	XXXIII
Abstract	XXXVII

1 Einleitung 1

1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Zielerfordernungen	3

2 Grundlagen, Stand der Technik und Forschungsansatz 5

2.1 Grundlagen aktiver Fahrwerksysteme	5
2.1.1 Vorderachsüberlagerungslenkung	5
2.1.2 Hinterachslenkung	7
2.1.3 Elektrische Antriebs- und Rekuperationssysteme	8
2.1.4 Aktive Bremssysteme.....	8
2.2 Stand der Technik der integrierten Fahrdynamikregelung.....	9
2.3 Forschungsansatz.....	21
2.3.1 Konkretisierung der Zielerfordernungen	21
2.3.2 Regelkonzeptbewertung, -gegenüberstellung und -auswahl	23
2.3.3 Struktur des Fahrdynamikregelkonzepts	28

3	Modellierung der Fahrdynamik.....	31
3.1	Referenzmodell.....	31
3.1.1	Methode der Sollvorgabe	31
3.1.2	Auslegungsmethode des Referenzmodells	32
3.2	Modellierung und Auslegung der Regelstrecke	35
3.2.1	Modellierung der Regelstrecke	35
3.2.2	Kriterien der fahrdynamischen Detailauslegung der Regelstrecke	38
3.2.3	Ergebnis der Auslegung der Regelstrecke.....	40
4	Entwicklung der Fahrdynamikregelung	45
4.1	Zustands- und Parameterfilterung des Reglerentwurfsmodells	45
4.1.1	Relevanz der Zustands- und Parameterfilterung für das Regelkonzept.....	45
4.1.2	Methode der Zustands- und Parameterfilterung	46
4.1.3	Adaptives Reglerentwurfsmodell der Querdynamik	48
4.1.4	Filtermodell der Querdynamik	51
4.2	Steuer- und Regelgesetz.....	56
4.2.1	Regelungsverfahren.....	56
4.2.2	Adaptives Vorsteuergesetz	59
4.2.3	Robustes Regelgesetz.....	60
4.3	Modellprädiktive Stellgrößenallokation	64
4.3.1	Formulierung des modellprädiktiven Optimierungs- problems.....	64
4.3.2	Auslegungsmethode der Stellgrößenallokation	74
4.3.3	Lösung des modellprädiktiven Optimierungsproblems.....	76
4.4	Synthese des Fahrdynamikregelkonzepts	77
4.5	Aspekte der Stabilität und Robustheit.....	79

5	Validierung der Fahrdynamikregelung	81
5.1	Validierungs- und Auslegungsmethode	81
5.1.1	Fahrmanöver, Manöverkataloge und Manöver- bewertung.....	82
5.1.2	Systematik der Validierung und Auslegung.....	88
5.2	Prinzipvalidierung anhand wankerweitertem Einspurmodell	92
5.3	Validierung anhand des LEICHT-Fahrzeugs.....	95
5.3.1	Filtergüte	96
5.3.2	Gesteuerte Fahrdynamik	101
5.3.3	Kombiniert vorgesteuerte und kontinuierlich geregelte Fahrdynamik	110
5.3.4	Gesteuerte Fahrdynamik mit Betrachtung des Energiebedarfs durch Aktoreingriffe.....	114
5.3.5	Zusammenfassung der Validierung.....	119
6	Fazit und Ausblick.....	121
	Literaturverzeichnis	125
	Anhang.....	139
A1.	Parameter und Adaptionvorschrift des Referenzmodells	139
A2.	Ergebnisse der Auslegung von Referenzmodell und LEICHT-Fahrzeug.....	140
A3.	Matrizen des wankerweiterten linearen Einspurmodells	142
A4.	Ansatz zur Reduktion der Auslegungskomplexität des Zustands- und Parameterfilters.....	142
A5.	Beobachtbarkeit der Regelstrecke.....	143
A6.	Steuerbarkeit der Regelstrecke	145
A7.	Herleitung des Querdynamikregelgesetzes	146
A8.	Beweis der Robustheit des Regelgesetzes	149
A9.	Prädiktionsmodell der Zusatzachslenkwinkel und Reifenlängskräfte.....	154

A10. Prädiktionsmodell der Motorwirkungsgrade	156
A11. Identifikation konstantparametrischer Reglerentwurfsmodelle	157
A12. Definition der Fahrmanöverkataloge der Validierung	158
A13. Validierung der Filtergüten am Beispiel des LEICHT-Fahrzeugs..	159
A14. Validierung der gesteuerten Fahrdynamik am Beispiel des LEICHT-Fahrzeugs	161
A15. Validierung der gesteuerten Fahrdynamik mit Betrachtung des Energiebedarfs durch Aktoreingriffe am Beispiel des LEICHT-Fahrzeugs	162

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema einer Vorderachsüberlagerungslenkung mit Wellgetriebe, Prinzip des Wellgetriebes mit Draufsicht (links unten).....	7
Abbildung 2:	Prinzipstruktur einer integrierten Fahrdynamikregelung mit Referenzmodellfolge	9
Abbildung 3:	Einordnung der Regelkonzepte des Standes der Technik anhand Hauptzeleigenschaften	20
Abbildung 4:	Strukturkonzept und Schnittstellen der integrierten Fahrdynamikregelung.....	29
Abbildung 5:	Stationäres Eigenlenk-, Gier- und Wankverhalten (a), b), c)) des passiven LEICHT-Fahrzeugs (<i>LEICHT-P</i>) und des Referenzfahrzeugs der Fahrdynamikregelung (<i>REF</i>)	41
Abbildung 6:	Übertragungsverhalten von Gierrate und Schwimmwinkel als Reaktion auf eine Lenkradwinkeleingabe bei konst. Geschwindigkeit von 80 km/h; a), b) Amplitudenverstärkungen $ G_{\delta_H\dot{\psi}} $, $ G_{\delta_H\beta} $, c), d) Phasenverschiebungen $\arg G_{\delta_H\dot{\psi}}$, $\arg G_{\delta_H\beta}$	43
Abbildung 7:	Saturierungsfunktion sat_{tot} des robusten Regelgesetzes (s : Gleitvar./ Regelfehler, d_{tot} : Regeltotzone, ϕ_{sat} : Reziproke Steigung)	61
Abbildung 8:	k -diskretisierte Optimierungssequenz für die Aktorstellgröße $u_{A,k}^i$ bei virtueller Stellgröße $y_k^{virt,i}$ und prädizierter Kraft- bzw. Momentenwirkung $G_i x_{A,k}^i$ ($T_{s,p}$: Prädiktionsschrittweite, n_p : Prädiktionshorizont); Beiträge zur Kostenfunktion der Optimierung sind kreisförmig markiert	76
Abbildung 9:	Modulare Struktur und Schnittstellen der integrierten Fahrdynamikregelung	78
Abbildung 10:	Charakteristische Amplituden und Zeitpunkte der Fahrzeugreaktionen des Referenzmodells (<i>REF</i>) und der Regelstrecke (<i>RST</i>) im Lenkradwinkelsprungmanöver	85

- Abbildung 11:** Bewertungsmethode der integrierten Fahrdynamikregelung anhand der Güteindizes ζ (v : Geschwindigkeit, f : Frequenz, Indizes st : stationär, $inst$: instationär, $qual$: qualitativ, man : Gesamtmanöver) 87
- Abbildung 12:** Schwimmwinkel des gesteuerten, wankerweiterten lin. Einspurmodells (a)); Hinterachssteifigkeiten der Reglerentwurfsmodelle (b)); Lenkradwinkelsprung nach 1 s, 80 km/h, $a_y = 2 \text{ m/s}^2$; Halbierung d. Achssteifigkeiten d. Regelstrecke ab 3 s (K : Konstantparametrisch, A : Adaptiv, $WESM$: Wankerweitertes lineares Einspurmodell, WH : Wankhebelarmadaption, FY : Reifenseitenkraftkorrektur) 94
- Abbildung 13:** Güteindizes der Schwimmwinkelfilterung des LEICHT-Fahrzeugs für den Nominalmanöverkatalog im nichtlin. Fahrdynamikbereich ($AESM$: Ebenes lineares Einspurmodell) 97
- Abbildung 14:** Schwimmwinkel und Wankraten des passiven LEICHT-Fahrzeugs (a, c)); Hinterachssteifigkeiten und Wankhebelarme d. Reglerentwurfsmodelle (b, d)); Sinuslenken, 1 Hz, 50 km/h, $a_y^{st} = 8 \text{ m/s}^2$ 99
- Abbildung 15:** Güteindizes der adapt. Schwimm- und Gierdynamiksteuerung des LEICHT-Fahrzeugs für den Nominalmanöverkatalog im lin. Fahrdynamikbereich 102
- Abbildung 16:** Schwimmwinkel und additive Vorderachslenkwinkel des adaptiv gesteuerten LEICHT-Fahrzeugs (a, d)); Vorderachssteifigkeiten und virtuelle Seitenkräfte der Reglerentwurfsmodelle (b, c)); Sinus mit Haltezeit, 0,7 Hz, 30 km/h, $a_y^{st} = 2 \text{ m/s}^2$ 104
- Abbildung 17:** Güteindizes der Schwimm- und Gierdynamiksteuerung des LEICHT-Fahrzeugs für den Robustheitsmanöverkatalog im nichtlin. Fahrdynamikbereich ($EWESM$: Wankerweitertes lineares Einspurmodell mit Rollsteuern und Achsseitenkraftaufbaudynamik) 106

- Abbildung 18:** Virtuelle Stellgrößen und nominell radinduzierte Schwerpunktskräfte u. –momente des adaptiv gesteuerten LEICHT-Fahrzeugs mit *AWESM-WH*Filter; a) Seitenkräfte; b) Giermomente; Sinuslenken, 0,25 Hz, 80 km/h, $a_y^{st} = 8 \text{ m/s}^2$, Ausfall Überlagerungslenkung und Vorderachsradmomente ab 6 s 108
- Abbildung 19:** Gütebewertung der kombiniert adapt. Schwimm- und Gierdynamikvorsteuerung und -regelung des nominellen LEICHT-Fahrzeugs für Sinus- und Gleitsinusmanöver im lin. Fahrdynamikbereich (ΔE : Zusatzenergiebedarf durch Regelung) 111
- Abbildung 20:** Schwimmwinkel und additive Lenkwinkel an Vorder- u. Hinterachse des adaptiv gesteuerten (FF) und zusätzlich geregelten (FF+FB) LEICHT-Fahrzeugs (a), c), d)); Vorderachssteifigkeiten der Reglerentwurfsmodelle (b)); Sinus mit Haltezeit, 0,7 Hz, 120 km/h, $a_y^{st} = 8 \text{ m/s}^2$, Kofferraumbeladung +300 kg 113
- Abbildung 21:** Güteindex der adapt. Schwimm- und Gierdynamikvorsteuerung des nominellen LEICHT-Fahrzeugs vs. relativem Aktorenergiemehrbedarf; Variation w_R (Gewichtungsfakt. der quadr. Stellgrößen in der MPSA); Gleitsinuslenken bis 2 Hz, 80 km/h, $a_y^{st} = 4 \text{ m/s}^2$ 116
- Abbildung 22:** Energieoptimale Grenzkurven des Güteindex vs. rel. Aktorenergiemehrbedarf für verschiedene Fahrwerkvarianten in definierbarem Manöverkatalog..... 118
- Abbildung 23:** Übertragungsverhalten v. Querbeschleunigung und Wankwinkel als Reaktion auf eine Lenkradwinkeleingabe bei konst. Geschwindigkeit von 80 km/h; a), b) Amplitudenverstärkungen $|G_{\delta_H a_y}|, |G_{\delta_H \phi}|$, c), d) Phasenverschiebungen $\arg G_{\delta_H a_y}, \arg G_{\delta_H \phi}$ 141
- Abbildung 24:** Saturierungsfunktion sat_{tot} und Hilfsleitvariable s_Δ des robusten Regelgesetzes (s : Gleitvariable/Regelfehler, d_{tot} : Regeltotzone, ϕ_{sat} : Reziproke Steigung) 150

- Abbildung 25:** Übertragungsverhalten von Gierrate und Hinterachsschwimmwinkel als Reaktion auf eine Lenkradwinkeleingabe bei konst. Geschwindigkeit von 80 km/h; a), b) Amplitudenverstärkungen $|G_{\delta_H\psi}|$, $|G_{\delta_H\beta_{HA}}|$, c), d) Phasenverschieb. $\arg G_{\delta_H\psi}$, $\arg G_{\delta_H\beta_{HA}}$ 158
- Abbildung 26:** Güteindizes der Schwimmwinkelfilterung des LEICHT-Fahrzeugs für den Nominalmanöverkatalog im lin. Fahrdynamikbereich 159
- Abbildung 27:** Güteindizes der Schwimmwinkelfilterung des LEICHT-Fahrzeugs für den Robustheitsmanöverkatalog im lin. Fahrdynamikbereich 160
- Abbildung 28:** Güteindizes der Schwimmwinkelfilterung des LEICHT-Fahrzeugs für den Robustheitsmanöverkatalog im nichtlin. Fahrdynamikbereich 160
- Abbildung 29:** Gierrate und Querbeschleunigung des adaptiv gesteuerten LEICHT-Fahrzeugs (a, b)); Sinus mit Haltezeit, 0,7 Hz, 30 km/h, $a_y^{st} = 2 \text{ m/s}^2$ 161
- Abbildung 30:** Güteindizes der adapt. Schwimm- und Gierdynamiksteuerung des LEICHT-Fahrzeugs für den Robustheitsmanöverkatalog im lin. Fahrdynamikbereich 161
- Abbildung 31:** Schwimmwinkel, Gierraten und additive Vorderachslenkwinkel des adaptiv gesteuerten LEICHT-Fahrzeugs (a, c, d)); Vorderachssteifigkeiten der Reglerentwurfsmodelle (b)); Bremsen in der Kurve, 100 km/h, $a_y^{st} = 8 \text{ m/s}^2$, Bremsen mit $a_x = -4 \text{ m/s}^2$ zwischen 6 s und 8 s 162
- Abbildung 32:** Radmomente u. Radmotorwirkungsgrade des adapt. gesteuerten LEICHT-Fahrzeugs (a, c)) mit *AWESM-WH*-Filter; Wirkungsgradkennfeld der Motoren bei konst. Drehzahl (b)); Variation $w_{R,\eta}$ (Gewichtungsfakt. des mittl. Motorwirkungsgrades in der MPSA); Gleitsinulenken, 1 Hz, 80 km/h, $a_y^{st} = 4 \text{ m/s}^2$ (*vl*: vorne links, *vr*: vorne rechts) 163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Quantitative Bewertungskriterien zur Validierung der integrierten Fahrdynamikregelung.....	84
Tabelle 2:	Validierungsmethode der integrierten Fahrdynamikregelung (FDR).....	90
Tabelle 3:	Reglerentwurfsmodelle zur Validierung der Fahrdynamikregelung anhand des LEICHT-Fahrzeugs	96
Tabelle 4:	Parameter des Referenzmodells.....	139
Tabelle 5:	Kennfeld der querbeschleunigungsabhängigen Umschaltvariablen \hat{w}_{ref} und des Achssteifigkeitsverhältnisses $\hat{\xi}_{ref}$ des Referenzmodells	140
Tabelle 6:	Mechanische Kenngrößen des LEICHT-Fahrzeugs	140
Tabelle 7:	Parameter des ebenen linearen Einspurmodells.....	157
Tabelle 8:	Zusätzliche Parameter des wankerweiterten linearen Einspurmodells gegenüber dem ebenen linearen Einspurmodell.....	157
Tabelle 9:	Zusätzliche Parameter des Rollsteuern und das laterale Achseinlaufverhalten abbildenden wankerweiterten linearen Einspurmodells gegenüber dem wankerweiterten linearen Einspurmodell	157
Tabelle 10:	Definition von Fahrmanöverkatalogen und stationären Querbeschleunigungen der Validierungsmanöver (NMK: Nominalmanöverkatalog, RMK: Robustheitsmanöverkatalog).....	159

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole und Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	m/s^2	Absolutbeschleunigung des Fahrzeugschwerpunkts
A_{max}	$\text{rad/s} \text{rad}$	Maximale Amplitude
A_{MPSA}		Systemmatrix zur Prädiktion der Aktor- und Reifenkraftdynamik in der MPSA
A_{WESM}		Systemmatrix des wankerweiterten linearen Einspurmodells
a_x	m/s^2	Schwerpunktbeschleunigung in Fahrzeuginnenrichtung
a_y	m/s^2	Schwerpunktbeschleunigung in Fahrzeugaußenrichtung
B		Eingangsmatrix der Regelstrecke
B_{MPSA}		Eingangsmatrix zur Prädiktion der Aktor- und Reifenkraftdynamik in der MPSA
B_{WESM}		Eingangsmatrix des wankerweiterten linearen Einspurmodells
c_h	N/rad	Hinterachssteifigkeit
$C_{S,WESM}$		Ausgangsmatrix des wankerweiterten linearen Einspurmodells
c_v	N/rad	Vorderachssteifigkeit

Zeichen	Einheit	Beschreibung
c_w	Nm/rad	Wanksteifigkeit
\mathbf{D}		Matrix der Schranken parametrischer Unsicherheiten in der Wirkung von Eingangsgrößen
$dom(\cdot)$	–	Definitionsmenge
$d_{tot,i}$	rad/s rad	Regeltotzonen des Sliding Mode-Reglers der Gierrate ($i = \dot{\psi}$) und des Schwimmwinkels ($i = \beta$)
d_w	Nms/rad	Wankdämpfung
$e_{rel,i}$	–	Relativfehler der Gierrate ($i = \dot{\psi}$) und des Schwimmwinkels ($i = \beta$)
\mathbf{E}_{WESM}		Störgrößenmatrix des wankerweiterten linearen Einspurmodells
f	1/s Hz	Frequenz
f_{konv}		Konvexe Funktion
f_{rob}		Funktion für die Schranke des Dynamikfehlers zwischen Regelstrecke und Reglerentwurfsmodell
f_{UKF}		Dynamikmodell des Filtermodells
$F_{x,ij}$	N	Längskraft am Rad ij , $ij \in \{vl, vr, hl, hr\}$
F_x^{virt}	N	Virtuelle Längskraft im Fahrzeugschwerpunkt
$F_{y,h}$	N	Seitenkraft an der Fahrzeughinterachse
$F_{y,v}$	N	Seitenkraft an der Fahrzeugvorderachse
F_y^{virt}	N	Virtuelle Seitenkraft im Fahrzeugschwerpunkt

Zeichen	Einheit	Beschreibung
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
\mathbf{G}_i		Allokationsvektoren zur Bildung des Fehlers der Primärziele in der MPSA ($i = M_z, F_y, F_x$)
G_{ij}		Übertragungsfunktion von Eingang i auf Ausgang j
$G_i x_k^i$	Nm N	MPSA-prädizierte Kraft- und Momentenwirkung der Aktorwirkzustände auf den Fahrzeugschwerpunkt zum diskreten Zeitpunkt k
\mathbf{g}_{UKF}		Messmodell des Filtermodells
\mathbf{G}_η		Energieeffizienzvektor zur Prädiktion des mittleren Wirkungsgrades der Antriebe in der MPSA
\mathbf{h}_{UKF}		Ausgangsmodell des Filtermodells
$\mathbf{I}_{2 \times 2}$		Diagonale Einheitsmatrix zweiter Dimension
$\mathbf{I}_{A,red}$		Reduktionsmatrix der Aktorwirkzustände
J_{xx}	kgm^2	Trägheitsmoment um die Fahrzeuglängsachse
J_{zz}	kgm^2	Trägheitsmoment um die Fahrzeughochachse
\mathbf{k}_{rob}		Vektor der Verstärkungen des Sliding Mode-Reglers
\mathbf{K}_{rob}		Diagonalmatrix der Reglerverstärkungen des Sliding Mode-Reglers
k_σ	—	Konfidenzintervallfaktor des Sliding Mode-Reglers
l_h	m	Abstand der Fahrzeughinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt
l_v	m	Abstand der Fahrzeugvorderachse zum Schwerpunkt

Zeichen	Einheit	Beschreibung
m	kg	Gesamtfahrzeugmasse
$M_{A,ij}$	Nm	Antriebsmoment am Rad ij , $ij \in \{vl, vr, hl, hr\}$
$M_{B,ij}$	Nm	Bremsmoment am Rad ij , $ij \in \{vl, vr, hl, hr\}$
M_{mot}	Nm	Moment des elektrischen Antriebs- und Rekuperationsmotors
\mathbf{M}_{Rad}		Vektor der Radmomente
$M_{z,TV}$	Nm	Giermoment um Fahrzeughochachse durch radindividuelle Momentenverteilung
M_z^{virt}	Nm	Virtuelles Giermoment um Fahrzeughochachse
n_{mot}	1/s	Drehzahl des elektrischen Motors
n_p	–	Anzahl der zeitlichen Diskretisierungsstellen des Prädiktionsmodells der MPSA
$n_{p,Ziel}$	–	Anzahl der zeitlichen Diskretisierungsstellen zur Evaluation der Zielfunktion der MPSA
n_{UKF}	–	Anzahl der Filtermodellzustände
p	–	Fahrpedalstellung
\mathbf{Q}_{MPSA}		Normierungs- und Gewichtungsmatrix der primären Ziele in der MPSA
\mathbf{q}_{UKF}		Vektor der Ausgangsmodell-Derivierten des Filters
\mathbf{Q}_{UKF}		Beobachtbarkeitsmatrix auf Basis des Filtermodells
\mathbf{r}_{dyn}		Vektor der dynamischen Radhalbmesser

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$r_{dyn,ij}$	m	Dynamischer Radhalbmesser am Rad ij , $ij \in \{vl, vr, hl, hr\}$
\mathbf{R}_{HS}		Vektor der rechten Seite zum Beweis der Robustheit des Sliding Mode-Reglers
\mathbf{R}_{MPSA}		Normierungs- und Gewichtungsmatrix der sekundären Ziele in der MPSA
$r_{r,VAL}$	m	Effektiver Ritzelradius des Lenkgetriebes der Vorderachslenkung
\mathbf{s}	–	Vektor der Gleitvariablen des Sliding Mode-Reglers
$sat_{tot}(\cdot)$	–	Saturierungsfunktion des Sliding Mode-Reglers
$sgn(\cdot)$	–	Signumsfunktion
s_h	m	Spurweite an der Fahrzeughinterachse
s_{HAL}	m	Hubstangenposition der aktiven Hinterachslenkung
s_i	rad/s rad	Sliding Mode-Gleitvariable der Gierrate ($i = \dot{\psi}$) und des Schwimmwinkels ($i = \beta$)
s_v	m	Spurweite an der Fahrzeugvorderachse
s_{VAL}	m	Zahnstangenposition der Vorderachslenkung
$s_{\Delta,i}$	rad/s rad	Hilfsgleitvariablen des Sliding Mode-Reglers für die Gierrate ($i = \dot{\psi}$) u. für den Schwimmwinkel ($i = \beta$)
t	s	Zeit
T_{max}	s	Zeitpunkt maximaler Fahrzeugreaktion bei Lenkradwinkelsprungmanöver