

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Alexander Ahlert

Ein modellbasiertes Regelungskonzept für einen Gesamtfahrzeug- Dynamikprüfstand



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight icon to the left of the text 'Springer Vieweg'.

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) 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 IVK.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

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

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

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

Alexander Ahlert

Ein modellbasiertes Regelungskonzept für einen Gesamtfahrzeug- Dynamikprüfstand

 Springer Vieweg

Alexander Ahlert
IVK, 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 978-3-658-30098-2 ISBN 978-3-658-30099-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-30099-9>

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

© 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 des Verlags. 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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart im Bereich Fahrzeugtechnik und Fahrdynamik.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts. Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Hanss danke ich für das Interesse, die angenehmen Gespräche sowie die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Für das entgegengebrachte Vertrauen, die gewährten Freiheiten, die Anregungen und die Betreuung der wissenschaftlichen Tätigkeiten möchte ich mich insbesondere bei Herrn Dr.-Ing. Jens Neubeck sowie Herrn Dr.-Ing. Werner Krantz sehr bedanken.

Ferner möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des IVK und FKFS für das ausgezeichnete Arbeitsklima, die tolle Zeit und die Hilfsbereitschaft herzlich bedanken. Stellvertretend danke ich meinem langjährigen Bürokollegen Herrn Alexander Fridrich, M.Sc. für die abwechslungsreichen Gespräche, die intensiven fachlichen Diskussionen und die gegenseitige Unterstützung. An dieser Stelle möchte ich auch meinen langjährigen Prüfstandskollegen Herrn Dipl.-Ing. Daniel Zeitvogel hervorheben und bedanke mich bei ihm für die Durchsicht der Arbeit sowie die intensive Zusammenarbeit.

Auch den Mitarbeitern der MTS Systems Corporation, die die Entstehung des Fahrzeugdynamikprüfstands erst ermöglichten, möchte ich für Ihre ausgezeichnete Entwicklungs- sowie die angenehme Zusammenarbeit danken.

Weiterhin gilt mein Dank allen ehemaligen Studenten, die mich im Rahmen ihrer Bachelor-, Studien- und Masterarbeiten sowie studentischen Hilfstätigkeiten maßgeblich bei der Entstehung der vorliegenden Arbeit unterstützt haben.

Abschließend möchte ich mich vor allem bei meiner Lebensgefährtin Ksenia, meiner Tochter Sofia und meinen Eltern bedanken. Ohne den unermesslichen Rückhalt, die liebevolle Unterstützung, die Geduld und das Verständnis wären diese Arbeit sowie mein Studium nicht möglich gewesen. Diese Arbeit ist meiner Familie gewidmet.

Alexander Ahlert

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungs-, Symbol- und Formelverzeichnis	XVII
Zusammenfassung.....	XXVII
Abstract	XXXI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	7
2.1 Der Stuttgarter Fahrzeugdynamikprüfstand.....	7
2.1.1 Aufbau, Funktionsweise und Softwarearchitektur	8
2.1.2 Prüfstandsbedingte Restriktionen und Fehlerquellen	12
2.2 Ganzheitliche Nutzung des HRW	17
2.3 Fahrzeugdynamik- und Prüfstandssimulation	20
3 Grundlagen	23
3.1 Mehrkörpersysteme	23
3.2 Regelungstechnik mit Fokus auf mechanische Systeme.....	26
4 Modellierung der Fahrzeugdynamik.....	31
4.1 Anforderungen, Ziele und Vorgehensweise.....	31
4.2 Modellierungsansatz und Schnittstellen	34
4.3 Prozess zur Herleitung der Bewegungsgleichungen	40
4.4 Bewegungsgleichungen des Fahrzeugs auf dem Prüfstand.....	42

5	Regelung des Fahrzeugdynamikprüfstands.....	47
5.1	Das grundlegende Funktionsprinzip für Fahrmanöver	47
5.2	Weiterentwicklung des grundlegenden Funktionsprinzips	54
5.2.1	Randbedingungen und Anforderungen.....	55
5.2.2	Aktuatorschnittstellen und vorhandene Messgrößen.....	58
5.2.3	Erweiterung der Messgrößen.....	59
5.2.4	Das modulare, erweiterte Regelungskonzept	61
5.3	Kompensation der systemdynamischen Unterschiede	71
5.3.1	Formulierung des Regelungsproblems	71
5.3.2	Auswahl geeigneter Reglerentwurfverfahren	72
5.3.3	Umformulierung der Bewegungsgleichungen für die Fahrzeugdynamikregelung	74
5.3.4	Reglerentwurf mit der Computed-Torque-Methode.....	79
5.3.5	Reglerentwurf mit den Methoden der Sliding-Mode- Regelung	82
5.3.6	Regelung des virtuellen Fahrzeugkörpers	89
6	Simulationsergebnisse	91
6.1	Simulationsumgebung und gewählte Randbedingungen	91
6.2	Vergleich der Fahrzeugdynamik.....	94
6.2.1	Untersuchungsgegenstände und Anwendungsfälle	94
6.2.2	Lenkradwinkelsprung.....	96
6.2.3	Sine-with-Dwell	104
6.2.4	Schwellenüberfahrt in der Kurve	111
6.3	Weitere Untersuchungen.....	119
7	Schlussfolgerung und Ausblick	123
	Literaturverzeichnis	127

Anhang	139
A1. Weitere Abbildungen	139
A2. Modellierung eines virtuellen Fahrzeugkörpers zur Abbildung der gesperrten Freiheitsgrade	141
A3. Weitere Simulationsergebnisse	147
A4. Stabilitätsbeweis unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Eingangsmatrix	155
A5. Parameterunsicherheiten zwischen Regler- und Streckenmodell ...	157

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Der HRW als zusätzliches Bindeglied zwischen Simulation und dem Fahrversuch auf der Straße	3
Abbildung 2.1:	Der Stuttgarter Fahrzeugdynamikprüfstand (HRW) [33].....	8
Abbildung 2.2:	Freiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus auf dem HRW und die Einflussmöglichkeiten durch Aktuatoren, in Anlehnung an [4]	9
Abbildung 2.3:	Grundlegendes Funktionsprinzip zur Durchführung von Fahrmanövern mit dem HRW [3, 4]	10
Abbildung 2.4:	Unterschiede in der Wankbewegung eines Fahrzeugs auf der Straße (links) und auf dem Prüfstand (rechts).....	13
Abbildung 2.5:	Vereinfachte Darstellung des Aktuatorsystems, bestehend aus den Aktuatoren und einer unterlagerten Regelschleife	14
Abbildung 3.1:	Modellelemente eines Mehrkörpersystems, nach [101].....	24
Abbildung 3.2:	Topologien von Mehrkörpersystemen, in Anlehnung an [121]	25
Abbildung 4.1:	MKS-Topologie des Fahrzeugmodells als Baumstruktur (FL: front left, FR: front right, RL: rear left, RR: rear right).....	36
Abbildung 4.2:	Ansatz der Radaufhängungsmodellierung beruhend auf Kinematik-Kennfeldern zur Abbildung der nichtlinearen Radträgerbewegung und der Kraftelemente	38
Abbildung 4.3:	Gelenkkoordinaten des Fahrzeugmodells auf dem HRW	43
Abbildung 5.1:	Blockschaltbildorientierte Darstellung des grundlegenden Funktionsprinzips	49
Abbildung 5.2:	a) Bewegung eines Fahrzeugs auf der Straße b) Einstellung von Flachbandwinkel und Bandgeschwindigkeiten am HRW	50
Abbildung 5.3:	Modell des virtuellen Fahrzeugkörpers.....	51

Abbildung 5.4:	Freiheitsgrade des Hybrid-mechanischen Systems	57
Abbildung 5.5:	Erweiterungen des grundlegenden Funktionsprinzips zur Kompensation systemdynamischen Unterschiede, neue Funktionsbausteine in grau	62
Abbildung 5.6:	Verwendete reale und virtuelle Stellgrößen	63
Abbildung 5.7:	Erweiterung des Konzepts um eine Reifenkraftregelung.....	68
Abbildung 5.8:	Das modulare, erweiterte Regelungskonzept	70
Abbildung 5.9:	Innerer-Kreis-Äußerer-Kreis Regelungsstruktur.....	81
Abbildung 6.1:	Beispielhafte Veranschaulichung der MKS-Simulation für den Fall „Fahrzeug auf dem HRW“.....	92
Abbildung 6.2:	Veranschaulichung objektiver Kriterien (Verzögerungszeit T_Z , Maximalwert A_M , stat. Verstärkungsfaktor A_S), Hybrid-mechanisches System = HMS.....	97
Abbildung 6.3:	Wankwinkel und Gierrate, Lenkradwinkelsprung, konstante Längsgeschwindigkeit von 150 km/h, Verwendung des grundlegenden Funktionsprinzips des Hybrid-mechanischen Systems (HMS), Id. Akt. = ideale Aktuatoren, CGR = Kopplung über Reaktionskräfte im CGR, RK = Reifenkraftkopplung, Akt.-Dyn. = Berücksichtigung der Aktuatordynamik	98
Abbildung 6.4:	Wankwinkel und Gierrate, Lenkradwinkelsprung, konstante Längsgeschwindigkeit von 150 km/h, mit Regeln zur Komp. der systemdynamischen Unterschiede, SLM = Sliding-Mode-Regelung, BL = Boundary Layer, CT = Computed Torque	101
Abbildung 6.5:	Veranschaulichung objektiver Kriterien des Sine-with-Dwell Fahrmanövers, Darstellung der normierten Lenkradwinkleingabe und einer normierten Fahrzeugreaktionsgröße	105
Abbildung 6.6:	Wankwinkel und Gierrate, Sine-with-Dwell, grundlegendes Funktionsprinzips des Hybrid-mechanischen Systems (HMS), Id. Akt. = ideale Aktuatoren, CGR = Kopplung über Reaktionskräfte im	

	CGR, RK = Reifenkraftkopplung, Akt.-Dyn. = Berücksichtigung der Aktuatorendynamik	106
Abbildung 6.7:	Vergleich der Schwimmwinkelverläufe beim Sine-with-Dwell	107
Abbildung 6.8:	Wankwinkel und Gierrate, Sine-with-Dwell; Regler zur Komp. der systemdynamischen Unterschiede, SLM = Sliding-Mode-Regelung, BL = Boundary Layer, CT = Computed Torque	109
Abbildung 6.9:	Darstellung der Stellgröße Wankmoment $M_{x,c}$ der CGR-Aktuatoren beim Sine-with-Dwell-Fahrmanöver ...	110
Abbildung 6.10:	Wankwinkel und Gierrate, Schwellenüberfahrt in der Kurve, grundlegendes Funktionsprinzips des Hybridmechanischen Systems (HMS), Id. Akt. = ideale Aktuatoren, CGR = Kopplung über Reaktionskräfte im CGR, RK = Reifenkraftkopplung, Akt.-Dyn. = Berücksichtigung der Aktuatorendynamik	113
Abbildung 6.11:	Radträgerauffederungen am vorderen rechten (FR) und hinteren rechten (RR) Rad, Schwellenüberfahrt in der Kurve, Verwendung des grundlegenden Funktionsprinzips.....	114
Abbildung 6.12:	Wankwinkel und Gierrate, Schwellenüberfahrt in der Kurve, Regler zur Komp. der systemdynamischen Unterschiede, SLM = Sliding-Mode-Regelung, BL = Boundary Layer, CT = Computed Torque, FB = bekannte Fahrbahn	116
Abbildung 6.13:	Radträgerauffederungen am vorderen rechten (FR) und hinteren rechten (RR) Rad, Schwellenüberfahrt in der Kurve, mit Reglern zur Komp. der systemdynamischen Unterschiede.....	117
Abbildung A.1:	Eine Flachbandeinheit mit ihren Hauptkomponenten	139
Abbildung A.2:	Beispiel eines Kinematik-Kennfelds für den Sturzwinkel einer gelenkten Radaufhängung.....	139
Abbildung A.3:	CGR summarische Reaktionsgrößen.....	140
Abbildung A.4:	Prozess zur Herleitung der Bewegungsgleichungen	140
Abbildung A.5:	Verdeutlichung der Simulationsanalyse innerhalb des modularen, erweiterten Regelungskonzepts.....	141

Abbildung A.6:	Nickwinkel und Bewegung des Fahrzeugschwerpunkts in vertikaler Richtung, Schwellenüberfahrt in der Kurve, Verwendung des grundlegenden Funktionsprinzips.....	147
Abbildung A.7:	Nickwinkel und Bewegung des Fahrzeugschwerpunkts in vertikaler Richtung Schwellenüberfahrt in der Kurve, mit Reglern zur Komp. der systemdynamischen Unterschiede.....	148
Abbildung A.8:	Wankwinkel und Gierrate, Lenkradwinkelsprung bis in den nichtlinearen Reifenbetriebsbereich, konstante Längs-geschwindigkeit von 150 km/h, Verwendung des grundsätzlichen Funktionsprinzips	149
Abbildung A.9:	Übertragungsverhalten der Gierrate als Reaktion auf eine Lenkradwinkeleingabe bei einer konstanten Geschwindigkeit von 200 km/h; a) Amplitudenverstärkung $G_{\delta\psi}$, b) Phasenverschiebung $\phi_{\delta\psi}$	151
Abbildung A.10:	Übertragungsverhalten des Wankwinkels als Reaktion auf eine Lenkradwinkeleingabe bei einer konstanten Geschwindigkeit von 200 km/h; a) Amplitudenverstärkung $G_{\delta\varphi}$, b) Phasenverschiebung $\phi_{\delta\varphi}$	152
Abbildung A.11:	Übertragungsverhalten des Wankwinkels als Reaktion auf eine Lenkradwinkeleingabe bei einer konstanten Geschwindigkeit von 200 km/h; a) Amplitudenverstärkung $G_{\delta\varphi}$, b) Phasenverschiebung $\phi_{\delta\varphi}$	153
Abbildung A.12:	Übertragungsverhalten der Reifenquerkraft FL, konstante Längsgeschwindigkeit von 200 km/h; a) Amplitudenverstärkung $G_{\delta Fy,FL}$, b) Phasenverschiebung $\phi_{\delta Fy,FL}$	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1:	Ausführliche Übereinstimmungstabelle anhand der relativen Fehler der objektiven Kriterien, Lenkradwinkelsprung, grundlegendes Funktionsprinzip (Hybrid-mechanisches System) mit Reifenkraftkopplung und idealen Aktuatoren, Geschwindigkeit von 150 km/h.....	102
Tabelle 6.2:	Übereinstimmungstabelle anhand der relativen Fehler, Lenkradwinkelsprung; Angaben in %.....	103
Tabelle 6.3:	Übereinstimmungstabelle anhand der relativen Fehler, Sine-with-Dwell; grundsätzliches Funktionsprinzip des Hybrid-mechanischen Systems, Angaben in %.....	107
Tabelle 6.4:	Übereinstimmungstabelle anhand der relativen Fehler, Sine-with-Dwell; mit den entwickelten Reglern, Angaben in %.....	108
Tabelle A.1:	Übereinstimmungstabelle, Übertragungsverhalten, grundlegendes Funktionsprinzip des Hybrid-mechanischen Systems	150

Abkürzungs-, Symbol- und Formelverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
Akt.-Dyn.	Aktuatordynamik
BL	Boundary Layer
CAE	Computer-aided Engineering
CAN	Controller Area Network (Bussystem)
CGR	Center of Gravity Restraint / Schwerpunkt-Fesselungssystem
CT	Computed Torque
DAE	Differential-algebraic equation / Differential algebraische Gleichung
FB	Fahrbahn
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FL	Front left – vorne links (Kennzeichnung der Radposition)
FR	Front right – vorne rechts (Kennzeichnung der Radposition)
HIL	Hardware in the Loop
HMS	Hybrid-mechanisches System
HRW	Handling Roadway, engl. Bezeichnung des Fahrzeugdynamikprüfstands
id. Akt.	Ideale Aktuatoren
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Komp.	Kompensation
MKS	Mehrkörpersystem

Abkürzung	Bedeutung
MP	Momentanpol
MPC	Model Predictive Control
ODE	Ordinary differential equation / gewöhnliches Differentialgleichungssystem
RK	Reifenkraftkopplung
RL	Rear left – vorne links (Andeutung der Radposition)
RM	Radmitte
RR	Rear right – vorne rechts (Andeutung der Radposition)
SLM	Sliding-Mode-Regelung / Regler
SP	Schwerpunkt
3D	räumlich, dreidimensional / drei Dimensionen

Formelverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
\mathbf{a}	$\text{m/s}^2 \mid \text{rad/s}^2$	Beschleunigungsvektor
ΔA_j	–	Abweichung zwischen dem Fahrzeug auf der Straße und dem Hybrid-mechanischen System für verschiedene Kriterien j beim Sine-with-Dwell
A_M	–	Maximalwert beim Lenkradwinkelsprung
A_S	–	Stationärer Verstärkungsfaktor beim Lenkradwinkelsprung
c	–	Index, deutet die Steuersignale der Aktuatoren des HRW an und steht für command
\mathbf{C}	–	Matrix der Zentrifugal- und Coriolis-Terme
C_i	–	Körperfeste Koordinatensysteme der Radträger
d	–	Index, steht für desired und deutet die gewünschte dynamische Verhalten bzw. die Solldynamik an
e_T	–	Relativer Fehler der Verzögerungszeit zwischen dem Fahrzeug auf der Straße und dem Hybrid-mechanischen System
E	–	Inertialkoordinatensystem
$\mathbf{f}_{\text{coupl,CGR}}$	$\text{N} \mid \text{Nm}$	Kraftvektor der CGR-Reaktionsgrößen
$\mathbf{f}_{\text{aero,virt}}$	$\text{N} \mid \text{Nm}$	Kraftvektor der aerodynamischen Kräfte und Momente auf den virtuellen Fahrzeugkörper
\mathbf{f}^e	$\text{N} \mid \text{Nm}$	Kraftvektor der vom Stellgrößenvektor unabhängigen eingprägten Kräfte und Momente
$\hat{\mathbf{f}}^e$	$\text{N} \mid \text{Nm}$	Kraftwinder der eingprägten Kräfte und Momente
$\hat{\mathbf{f}}^c$	$\text{N} \mid \text{Nm}$	Kraftwinder der verallgemeinerten gyroskopischen Momente sowie Zentrifugal- und Corioliskräfte
$\hat{\mathbf{f}}^p$	$\text{N} \mid \text{Nm}$	Gelenk-Reaktionskraftwinder
$\hat{\mathbf{f}}^r$	$\text{N} \mid \text{Nm}$	Körper-Reaktionskraftwinder

Zeichen	Einheit	Bedeutung
F_q	N	Zentrifugalkraft
$F_{x/y,aero}$	N	Luftwiderstandskraft / Seitliche Luftkraft
$F_{x/y,CGR}$	N	Reaktionskraft im CGR in Längs- bzw. Querrichtung
$F_{x/y,T,i}$	N	Reifenkraft in Längs- bzw. Querrichtung
$F_{x/y,T,i,d}$	N	Sollvorgabe der Reifenkräfte in Längs- bzw. Querrichtung
$F_{z,ist}$	N	Realisierte Vertikalkraft der CGR-Aktuatoren
\mathbf{g}	N	Vektor der Gravitationsterme
\mathbf{G}_c	–	Eingangsmatrix für die Regelung
\mathbf{G}_{virt}	–	Eingangsmatrix für die Regelung des virtuellen Fahrzeugkörpers
$G_{\delta\dot{\psi}}$	1/s	Übertragungsfunktion der Gierrate auf eine Lenkradwinkeleingabe
$G_{\delta\varphi}$	–	Übertragungsfunktion des Wankwinkels auf eine Lenkradwinkeleingabe
$G_{\delta F_{y,FL}}$	N/°	Übertragungsfunktion der Reifenquerkraft vorne links auf eine Lenkradwinkeleingabe
i	–	Indexvariable für Radposition {FL, RL, FR, RR} / Zählvariable
I_{virt}^z	kgm ²	Gierträgheitsmoment des virt. Fahrzeugkörpers
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	kgm ²	Hauptträgheitsmomente des Gesamtfahrzeugs
\mathbf{J}	–	Globale Jacobi-Matrix
\mathbf{J}_i	–	Jacobi-Matrix des jeweiligen Gelenks
\mathbf{k}	–	Vektor der modellbasierten Fehlerabschätzungen
\mathbf{k}^c	N Nm	Vektor der generalisierten Coriolis-Kräfte und Momente
\mathbf{k}^e	N Nm	Vektor der generalisierten eingepprägten Kräften

Zeichen	Einheit	Bedeutung
k_i	–	Modellbasierte Fehlerabschätzung für die Regelung
$\mathbf{K}_D, \mathbf{K}_P$	–	Reglerparametermatrizen
l_v	m	Abstand der Vorderachse zum Fahrzeugschwerpunkt in Fahrzeuglängsrichtung
l_h	m	Abstand der Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt in Fahrzeuglängsrichtung
m	kg	Masse des Fahrzeugs
m_{virt}	kg	Masse des virt. Fahrzeugkörpers
\mathbf{M}	kg kgm ²	Generalisierte Massenmatrix
\mathbf{M}_{virt}	kg kgm ²	Generalisierte Massenmatrix des virtuellen Fahrzeugkörpers
$M_{z,aero}$	Nm	Luftgiermoment
$M_{x/y,ist}$	Nm	Realisiertes Wank- bzw. Nickmoment der CGR- Aktuatoren
$M_{z,CGR}$	Nm	Gierreaktionsmoment im CGR
\mathbf{q}	m rad	Gelenkkoordinaten vom Modell „Fahrzeug auf dem HRW“
$\tilde{\mathbf{q}}$	m rad	Folgefehlervektor auf Positionsebene
$\ddot{\mathbf{q}}_{HRW}$	m/s ² rad/s ²	Gelenkbeschleunigungen des Hybrid-mechanischen Systems. Entsprechen dem dynamischen Verhalten bzw. der Dynamik des Hybrid-mechanischen Systems
$\dot{\mathbf{q}}_r$	m/s rad/s	Vereinfachungsvariable
$\ddot{\mathbf{q}}_{STR}$	m/s ² rad/s ²	Gelenkbeschleunigungen des Fahrzeugs auf der Straße. Entsprechen dem gewünschten dynamischen Verhalten des Fahrzeugs auf der Straße
\mathbf{q}_{virt}	m rad	Gelenkkoordinaten des virtuellen Fahrzeugkörpers