

Schriftenreihe  
Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme  
am Institut für Fahrzeugtechnik,  
TU Braunschweig



**Nr: 5**

**M.Sc.  
Lukas Borkowski  
2021**

# Virtuelle Freigabesystematik für zentrale Fahrwerkregelsysteme

---

Herausgegeben von:  
apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

# Virtuelle Freigabesystematik für zentrale Fahrwerkregelsysteme

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von: Lukas Borkowski  
aus (Geburtsort): Falkenberg

eingereicht am: 27.08.2020  
mündliche Prüfung am: 02.03.2021

Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze  
Prof. Dr. Ludger Frerichs



Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme  
am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Band 5

**Lukas Borkowski**

**Virtuelle Freigabesystematik  
für zentrale Fahrwerkregelsysteme**

Shaker Verlag  
Düren 2021

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8000-1

ISSN 2700-046X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen. Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.



Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit bei der Volkswagen AG, in der Abteilung Fahrdynamik Fahrwerkregelsysteme der Technischen Entwicklung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. R. Henze, dem Abteilungsleiter für Fahrdynamik und aktive Systeme des Instituts für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Referats und dafür, dass er diese Arbeit über die gesamte Zeit mit seiner wohlwollenden Unterstützung begleitete. Mein Dank gilt ebenfalls dem Direktor des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay, der diese Arbeit durch sein fachliches Interesse und zahlreiche Diskussionen in besonderem Maße gefördert hat.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. L. Frerichs, Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Köhler, Leiter des Instituts für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Für die Ermöglichung dieser Arbeit in seiner Abteilung Fahrdynamik Fahrwerkregelsysteme bei der Volkswagen AG und sein entgegengebrachtes Vertrauen gebührt ein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. J. Reichel. Darüber hinaus bedanke ich mich ausdrücklich bei Herrn Dr.-Ing. A. Bartels, der diese Arbeit als Betreuer begleitet hat und bei Herrn Dr.-Ing. N. Laumanns, der mit seinen kreativen Anregungen und wertvollen Fachgesprächen einen unschätzbar hohen Beitrag geleistet hat. Den Kollegen aus der Fahrwerksentwicklung und des Instituts danke ich für die vielen fruchtbaren Diskussionen und die freundschaftliche Atmosphäre.

Das Fundament meines beruflichen Werdegangs verdanke ich meiner Mutter. Ihre fürsorgliche Erziehung hat mich als Persönlichkeit geprägt. Sie hat mir meine Ausbildung ermöglicht und somit einen entscheidenden Anteil an der Entstehung dieser Dissertation gehabt. Meinem Bruder danke ich für den großartigen Rückhalt. Schließlich richtet sich mein Dank auch an alle, die mich im privaten Umfeld bei der Durchführung der Arbeit begleitet und unterstützt haben.





# Virtuelle Freigabesystematik für zentrale Fahrwerkregelsysteme

von Lukas Borkowski

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Beherrschung der Komplexität sowie die Menge möglicher Testfälle eines zentralen Fahrwerkregelsystems für eine Sicherheitsvalidierung. Hierbei ist das Ziel, eine simulationsbasierte Freigabesystematik zu entwickeln, aus der die sicherheitsrelevanten Testfälle hervorgehen und diese in reale sowie simulationsbasierte Freigabe-Tests unterteilt werden können.

In einer vorangehenden Probandenstudie wird, basierend auf einer Gefahren- und Risikoanalyse, eine leistungsorientierte Kontrollierbarkeitsgrenze identifiziert. Diese liefert für eine stationäre Kreisfahrt bei 80 km/h und  $4 \text{ m/s}^2$  sowie  $6 \text{ m/s}^2$  eine Kontrollierbarkeitsgrenze von  $7,5^\circ/\text{s}$  Gierratenänderung. Anhand von Sicherheitskriterien (Spurabweichung  $< 0,5 \text{ m}$  sowie Gierratenänderung  $< 7,5^\circ/\text{s}$ ) wird die Bewertungsgrundlage geschaffen, um verschiedene fahrdynamische Zustände hinsichtlich der Sicherheitsrelevanz bzw. Kritikalität zu bewerten. Für die Identifikation der sicherheitsrelevanten Testfälle wird nach dem Prinzip des „Schweizer-Käse-Modells“ eine Clusterung des komplexen Gesamtsystems in mehrere, weniger komplexe Teilsysteme durchgeführt. Die Teilsysteme bestehen für das vorliegende zentrale Fahrwerkregelsystem aus der Aktuatorkombination, Fahrzeugkonfiguration, den Sensorfehlern sowie den Funktionsparametern. Für jedes dieser Teilsysteme werden die sogenannten Worst-Case-Zustände ermittelt. Die Ergebnisse der Zustände werden in Form einer stationären Kreisfahrt im gesamten Geschwindigkeits- sowie Querschleunigungsbereich getestet. Daraus geht hervor, dass für die Sicherheitsvalidierung mit realen Fahrversuchen der relevante Geschwindigkeitsbereich zwischen 135 km/h und 160 km/h und der Querschleunigungsbereich zwischen  $5,1 \text{ m/s}^2$  und  $6,5 \text{ m/s}^2$  liegt. Fahrversuche außerhalb der genannten Bereiche besitzen eine geringere Kritikalität und können damit auch über die Simulation freigegeben werden.

Eine Ableitung der generischen Freigabesystematik schließt das Thema ab und ermöglicht eine Anwendung auf ähnliche Fahrwerkregelsysteme.



# Virtual approval systematics for central chassis control systems

by Lukas Borkowski

## Abstract

The present paper deals with the mastery of complexity as well as the number of possible testcases of a central chassis control system for a safety validation. In doing so, the objective is to develop a simulation-based approval system from which the safety-relevant test cases emerge and which can be divided into real and simulation-based approval tests.

In a previous study with test persons, a performance-based controllability limit was identified based on a hazard and risk analysis. For a stationary circular drive at 80 km/h with  $4 \text{ m/s}^2$  and  $6 \text{ m/s}^2$ , this provides a controllability limit of  $7,5^\circ/\text{s}$  yaw rate change. Based on safety criteria (lane deviation  $< 0,5 \text{ m}$  as well as yaw rate change  $< 7,5^\circ/\text{s}$ ), the valuation basis is created in order to assess various conditions of driving dynamics with regard to safety relevance and criticality. In order to identify the safety-relevant test cases, the complex overall system is clustered into several less complex subsystems based on the principle of the „Swiss cheese model“. The subsystems for the present central chassis control system consist of the actuator combinatorics, vehicle configuration, sensor errors as well as the functional parameters. The so-called worst case conditions are determined by means of each of these subsystems. The results of the conditions are tested in the form of a stationary circular drive in the entire speed as well as lateral acceleration range. Consequently, the relevant speed range for safety validation with real driving tests is between 135 km/h and 160 km/h and the lateral acceleration range is between  $5,1 \text{ m/s}^2$  and  $6,5 \text{ m/s}^2$ . Driving tests outside the ranges mentioned are less critical and can therefore also be approved via the simulation. A derivation of the generic approval system concludes the topic and enables an application in similar chassis control systems.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung . . . . .	3
1.2 Aufbau und Vorgehensweise . . . . .	4
<b>2 Fahrdynamische Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn . . . . .	10
2.2 Zweispurmodell . . . . .	16
2.3 Radindividueller Bremsengriff . . . . .	19
2.4 Dämpferregelung . . . . .	25
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>33</b>
3.1 Aufbau Fahrwerkregelsysteme . . . . .	33
3.1.1 Koexistenzansatz . . . . .	36
3.1.2 Zentralisierung . . . . .	38
3.1.3 Reglerstruktur . . . . .	39
3.2 Entwicklung von sicherheitsrelevanten Funktionen nach ISO 26262	42
3.3 Definition Spurabweichung . . . . .	51
3.4 Freigabe-Manöver . . . . .	68
3.5 Kontrollierbarkeit . . . . .	69
3.5.1 Begrifflichkeit . . . . .	71
3.5.2 Bisherige Studien . . . . .	73
3.5.3 Bekannte Akzeptanzgrenzen . . . . .	75
3.5.4 Untersuchungsbedarf . . . . .	76

---

<b>4</b>	<b>Kontrollierbarkeitsstudie</b>	<b>79</b>
4.1	Methodisches Vorgehen . . . . .	80
4.2	Experimentelle Studie . . . . .	83
4.2.1	Identifikation der Störaufschaltung . . . . .	83
4.2.2	Subjektive Bewertungsskala . . . . .	91
4.2.3	Probandenstudie . . . . .	93
4.3	Simulative Bewertung der Kontrollierbarkeit . . . . .	100
4.3.1	Fahrermodell . . . . .	100
4.3.2	Simulationsstudie . . . . .	104
<b>5</b>	<b>Sicherheitsrelevante Freigabeparameter</b>	<b>107</b>
5.1	Methodisches Vorgehen . . . . .	107
5.2	Fahrzeugparameter . . . . .	109
5.2.1	Aktuatorkombination . . . . .	110
5.2.2	Sensitivitätsanalyse . . . . .	115
5.2.3	Ableich mit realen Messungen . . . . .	128
5.2.4	Identifikation Worst-Case-Fahrzeugkonfiguration . . . . .	135
5.3	Funktionsparameter . . . . .	142
5.3.1	Analyse möglicher Sensorfehler . . . . .	143
5.3.2	Erweiterte Sensitivitätsanalyse . . . . .	147
5.3.3	Identifikation Worst-Case-Funktionsparameter . . . . .	149
<b>6</b>	<b>Identifikation relevanter Freigabemanöver</b>	<b>153</b>
6.1	Ableitung sicherheitskritischer Pfad . . . . .	153
6.2	Untersuchung des globalen Versuchsraums . . . . .	154
6.3	Ergebnisse . . . . .	155
<b>7</b>	<b>Definition einer generischen Freigabesystematik</b>	<b>159</b>
7.1	Diskussion . . . . .	162
7.2	Fazit . . . . .	163
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>165</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>169</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Zusammenhang zwischen der Systemkomplexität und der verunglückten Personen [Ahr11, Ers17, Des18] . . . . .	2
1.2	Systemmodell der Validierung für eine beliebige Funktion . . . . .	5
1.3	Kritischer Pfad anhand des „Schweizer-Käse-Modells“ [Rea90] . . . . .	6
1.4	Gliederung und Vorgehensweise . . . . .	7
2.1	Fahrzeugkoordinatensystem nach DIN ISO 8855 . . . . .	9
2.2	Kraftschluss-Schlupf-Kurve / -Schräglaufwinkel-Kurve [Fis00] . . . . .	11
2.3	Krempel-Diagramm nach [Kre65] . . . . .	13
2.4	PT <sub>1</sub> -Seitenkraftaufbau nach Schräglaufwinkelsprung . . . . .	14
2.5	Einfluss des Reifenmodells nach Böhm mit $l_E = 0,64$ m . . . . .	15
2.6	Zweispurmodell [Bet07] . . . . .	16
2.7	Prinzipdarstellung von Bremsingriffen vorne und hinten . . . . .	20
2.8	Zusammenhang zwischen $k_{G/B}$ , $\delta_v$ und $k_{vert}$ . . . . .	21
2.9	Bremskrafthebelarm an der VA [Fuh09] . . . . .	22
2.10	Lenkradwinkelbedarf ohne und mit XDS+ [Vol09] . . . . .	25
2.11	Konfliktschaubild [Mit90, Bar14] . . . . .	26
2.12	Relevanten Komponenten der Dämpferregelung [Pud13] . . . . .	28
2.13	Prinzipdarstellung eines Zweirohrdämpfers mit extern angeordnetem Ventil [Vol08] . . . . .	29
2.14	Unterschiedliche Konstantbestromung . . . . .	30
3.1	Erweiterter Fahrer - Fahrzeug Regelkreis [Con97] . . . . .	34
3.2	Koexistente Ansteuerung der Fahrwerkregelsysteme [Lau07] . . . . .	36
3.3	Zentralisierte Ansteuerung der Fahrwerkregelsysteme [Lau07] . . . . .	38
3.4	Grundstruktur der Modellfolgeregelung nach [Lau07] . . . . .	41
3.5	Sicherheitslebenszyklus nach ISO 26262 . . . . .	43
3.6	Parameterraum der ASIL-Einstufung . . . . .	48
3.7	Einfluss unterschiedlicher Reaktionszeit auf die Störgierrate . . . . .	55



3.8	Kräfte und Momente im Einspurmodell nach [Eck14]	59
3.9	Sensitive Fahrzeugparameter auf die Spurbabweichung	63
3.10	Relativkoordinaten von der Fahrzeugecke vorne links	66
3.11	Auswertelogik zur Ermittlung der Spurbabweichung	67
3.12	Beispielhafte Auswertung der Spurbabweichung	67
3.13	Bewertungsskala nach Neukum/Krüger [Neu03]	73
4.1	Arbeitsschritte Sicherheitsvalidierung Realität / Simulation	80
4.2	Methodik und Aufbau der Studie	82
4.3	Ansteuerungslogik Bremse	84
4.4	Prinzip zur Verteilung der Störaufschaltungen	87
4.5	Vergleich der gefahrenen Querbeschleunigungen	89
4.6	Mögliche Störungsreihenfolge	90
4.7	Resultierende Störungsreihenfolge für $4 \text{ m/s}^2$ und $6 \text{ m/s}^2$	91
4.8	Beherrschbarkeitsstufen nach ISO 26262 / Bewertungsskala vorliegende Studie	92
4.9	Ergebnisse der unterschiedlichen Störaufschaltungen, $4 \text{ m/s}^2$	95
4.10	Ergebnisse der unterschiedlichen Störaufschaltungen, $6 \text{ m/s}^2$	96
4.11	Subjektive Bewertung der Probanden	99
4.12	Struktur des Fahrermodells für die Querregelung [Hen04]	101
4.13	Einfluss der Fahrerparameter auf die Güte der Spurregelung	103
4.14	Ergebnisse Fahrermodell-Varianten, stat. Kreisfahrt, $4 \text{ m/s}^2$	105
5.1	Ansatz zur Untersuchung der Freigabeparameter [Wan14a]	108
5.2	Methodik zur Identifikation der WoCa-Fahrzeugkonfiguration	109
5.3	Lage der Funktionsgrenze / Störungsaufschaltung	111
5.4	Getestete Kombinationen an allen vier Rädern	112
5.5	Streudiagramme der Dämpfereingriffe	113
5.6	Streudiagramme der Bremsingriffe	114
5.7	Variantenbaum auf Basis eines einzigen Fahrzeugmodells	118
5.8	Übersicht lokale Sensitivitätsanalyse	120
5.9	Sensitivitätsanalyse Frontantrieb mit einer Mehrlenker-HA	121
5.10	Änderung Wankwinkel / Radlastdiff. bei Var. Schwerpunkthöhe	122
5.11	Änderung Seitenkräfte aller Räder bei zusätzlicher Beladung	123
5.12	Änderung Gierrate / Radlastdiff. bei max. Beladungshöhe	125
5.13	Sensitivitätsanalyse Allradantrieb mit einer Mehrlenker-HA	126

---

5.14	Sensitivitätsanalyse Frontantrieb mit einer Verbundlenker-HA . . . . .	127
5.15	Variantenbaum der gefahrenen Fahrzeugvarianten . . . . .	129
5.16	Modellvalidierung Frontantrieb / Mehrlenker-Hinterachse . . . . .	131
5.17	Modellvalidierung Allradantrieb / Mehrlenker-Hinterachse . . . . .	132
5.18	Modellvalidierung Frontantrieb / Verbundlenker-Hinterachse . . . . .	133
5.19	Prinzip-Darstellung Partikelschwarm-Optimierung [Fes11] . . . . .	136
5.20	Methodik zur Identifikation der WoCa-Fahrzeugkonfiguration . . . . .	137
5.21	Gefundene Kombinationen mit maximaler Spurabweichung . . . . .	140
5.22	Ergebnisse der Worst-Case-Fahrzeugkonfiguration . . . . .	141
5.23	Zusammenhang Funktionskomplexität / Testaufwand . . . . .	143
5.24	Erläuterung der Sensoreigenschaften . . . . .	144
5.25	Auswirkungen von Sensorfehlern auf das Sicherheitskriterium: Simulation (links) / Realität (rechts) . . . . .	146
5.26	Vergleich lokale / Erweiterte Sensitivitätsanalyse . . . . .	149
5.27	Methode zur Identifikation der WoCa-Funktionsparameter . . . . .	150
5.28	Vergleich zwischen Ausgangs- und WoCa-Funktionsparametern . . . . .	150
6.1	Worst-Case-Zustände des kritischen Pfades . . . . .	154
6.2	Simulationsergebnisse der Sicherheitskriterien: (a) Spurabweichung (b) Störgierrate . . . . .	156
6.3	Worst-Case Betrachtung: (a) Spurabweichung (b) Störgierrate (c) Schnittmenge . . . . .	157
7.1	Worst-Case-Zustände des kritischen Pfades . . . . .	160



## Tabellenverzeichnis

2.1	Einflussfaktoren auf die Schräglaufsteifigkeit nach [Ein10, Mih16] . . . . .	12
2.2	Änderung dynamischer Eigenschaften bei ansteigender Bestromung . . . . .	31
3.1	Ansätze einer zentralen Reglerstruktur . . . . .	40
3.2	Klassifizierung der Schadensschwere [ISO11] . . . . .	45
3.3	Klassifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit [ISO11] . . . . .	45
3.4	Grenzen E-Parameterklassen [VDA15] . . . . .	46
3.5	Klassifizierung der Kontrollierbarkeit [ISO11] . . . . .	47
3.6	Analytische ASIL-Einstufung . . . . .	49
3.7	Ableitung des Sicherheitskriteriums . . . . .	52
3.8	Zulässige Spurbabweichung verschiedener Fahrzeugsegmente . . . . .	54
3.9	Übersicht veröffentlichter Reaktionszeiten [Die09, Sim13] . . . . .	56
3.10	Giermomentgrenzen in Abhängigkeit der Spurbabweichung . . . . .	63
3.11	Messtechnik zur Erfassung der DGPS-Koordinaten . . . . .	64
3.12	Mögliche Fahrmanöver für die FuSi-Validierung [Hei06] . . . . .	70
3.13	Bekannte Akzeptanzgrenzen der Störgiertrate . . . . .	76
4.1	Beurteilungsgrenzen der Kontrollierbarkeit . . . . .	86
4.2	Störungen bei 80 km/h und $4 \text{ m/s}^2$ . . . . .	87
4.3	Störungen bei 80 km/h und $6 \text{ m/s}^2$ . . . . .	88
4.4	Zusammenfassung der Versuchsbedingungen . . . . .	94
4.5	Fragebogen: Themenfelder sowie zugehörige Fragen . . . . .	98
5.1	Untersuchungsräume der ausgewählten Fahrzeug-Parameter . . . . .	117
5.2	Versuchsvariationen der realen Messungen . . . . .	130
5.3	Vergleich der gemessenen Spurbabweichungen aller Konfigurationen . . . . .	134
5.4	Variationsraum der Optimierungsparameter . . . . .	138
5.5	Worst-Case-Fahrzeugkonfiguration . . . . .	141
5.6	Eigenschaften der untersuchten Signale . . . . .	144

5.7	Allgemeine Beschreibung der Signale zur Fehleraufschaltung . . . .	145
6.1	Testraum der stationären Kreisfahrt für Freigabemanöver . . . . .	155
6.2	Ergebnisse der Testbereiche . . . . .	158

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Fläche
$a_x$	$m/s^2$	Längsbeschleunigung
$a_y$	$m/s^2$	Querschleunigung
$B$	$m$	Fahrzeugbreite
$c_\alpha$	$N/rad$	Schräglaufsteifigkeit
$c_h$	$Nm/rad$	Wanksteifigkeit hinten
$c_\lambda$	$N/rad$	Längslaufsteifigkeit
$c_v$	$Nm/rad$	Wanksteifigkeit vorne
$F$	$N$	Kraft
$f$	–	Auftretenshäufigkeit
$F_{B,Rad}$	$N$	Bremskraft Rad
$F_{F1}$	$N$	Zentrifugalkraft
$F_N$	$N$	Normalkraft
$F_x$	$N$	Längskraft
$F_{x,Antrieb}$	$N$	Antriebskraft
$F_{x,Bremse}$	$N$	Bremskraft
$F_y$	$N$	Seitenkraft / Querkraft
$F_z$	$N$	Radlast
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$h$	$m$	Höhe
$H_{MR}$	–	Übertragungsfunktion Regelung
$H_{MS}$	–	Übertragungsfunktion Steuerung
$i$	–	Partikel
$i_D$	$A$	Dämpferströme
$J_z$	$kg/m^2$	Trägheitsmoment
$k_{G/B}$	–	Faktor Giermoment / Bremsmoment

---

$k_{\text{Vert}}$	—	Bremskraftverteilung
$L$	$m$	Fahrzeuglänge
$l$	$m$	Radstand
$l_{\text{a}}$	$m$	Bremskrafthebelarm außen
$l_{\text{E}}$	$m$	Einlaufänge
$l_{\text{h}}$	$m$	Abstand Fzg.-Schwerpunkt zu HA
$l_{\text{i}}$	$m$	Bremskrafthebelarm innen
$l_{\text{v}}$	$m$	Abstand Fzg.-Schwerpunkt zu VA
$l_{\text{x,E}}$	$m$	Einlaufänge in x-Richtung
$l_{\text{y,E}}$	$m$	Einlaufänge in y-Richtung
$m$	$kg$	Masse
$M_{\text{B}}$	$Nm$	Bremsmoment
$M_{\text{z}}$	$Nm$	Giermoment
$n$	—	Anzahl
$R$	$m$	Radius
$R_{\text{s}}$	—	Risikoparameter
$r_{\text{dyn}}$	$m$	Dynamischer Reifenhalbmesser
$S$	—	Sensitivität
$s$	$m$	Spurweite
$s_{\text{y}}$	$m$	Spuränderung
$t$	$s$	Zeit
$t_{\text{r}}$	$s$	Reaktionszeit
$T_1, T_{Z1}, T_2, T_{Z2}$	$s$	Verzögerungszeiten 1. / 2. Ordnung
$T_{\text{P}}$	$s$	Vorausschauzeit
$T_{\text{x}}$	$s$	Zeitkonstante in x-Richtung
$T_{\text{y}}$	$s$	Zeitkonstante in y-Richtung
$v$	$m/s$	Geschwindigkeit
$V_{\text{MR}}$	$rad/m$	Vertärkungsfaktor Regelung
$x$	$m$	Weg
$y$	$m$	Spur
$\Delta y$	$m$	Spurabweichung
$\Delta y_{\text{TP}}$	$m$	Querabweichung zum Zeitpunkt $t + T_{\text{P}}$

## Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	<i>rad</i>	Schräglaufwinkel
$\alpha_H$	<i>rad</i>	Headingwinkel
$\beta$	<i>rad</i>	Schwimmwinkel
$\delta$	<i>rad</i>	Lenkwinkel
$\delta_{LR}$	<i>rad</i>	Regelanteil Lenkradwinkel
$\delta_{LS}$	<i>rad</i>	Steueranteil Lenkradwinkel
$\kappa_s$	$1/m$	Krümmung des Bahnverlaufes
$\lambda$	–	Radschlupf
$\lambda_A$	–	Antriebsschlupf
$\lambda_B$	–	Bremsschlupf
$\lambda_x$	–	Schlupf in x-Richtung
$\lambda_y$	–	Schlupf in y-Richtung
$\mu$	–	Kraftschlussbeiwert
$\mu_x$	–	Kraftschlussbeiwert in x-Richtung
$\mu_y$	–	Kraftschlussbeiwert in y-Richtung
$\tau$	<i>s</i>	Totzeit
$\varphi$	<i>rad</i>	Wankwinkel
$\dot{\psi}$	<i>rad/s</i>	Gierrate
$\Delta\dot{\psi}$	<i>rad/s</i>	Störgierrate
$\ddot{\psi}$	<i>rad/s<sup>2</sup></i>	Gierbeschleunigung
$\omega_R$	<i>rad/s</i>	Raddrehzahl

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Antiblockiersystem
ACD	Active Control Damping
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
ASIL	Automotive Safety Integrity Level



ASR	Antischlupfregelung
Basisfzg.	Basisfahrzeug
Bel.	Beladung
BMW	Bayerisches Motoren Werk
CAN	Controller Area Network
DCC	Dynamic Chassis Control
DGPS	Differentielles Globales Positionierungssystem
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EDS	Elektronische Differenzialsperre
E / E	Elektrisch-Elektronisch
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
KF	Kreisfahrt
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FTA	Fehlerbaumanalyse
FTZ	Fehlertoleranzzeit
FuSi	Funktionale Sicherheit
Fzg	Fahrzeug
G&R	Gefahren & Risikoanalyse
HAL	Hinterachslenkung
HiL	Hardware in the Loop
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IPG	Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. R. Gnadler GmbH
ISO	Internationale Organisation für Normung
Li	Links
LW	Lenkwinkel
LWS	Lenkwinkelsprung
MP	Momentenpol
OEM	Originalausrüstungshersteller
P	Parameter
PASM	Porsche Active Suspension Management
Pkw	Personenkraftwagen
QM	Qualitätsmanagement
Radlastdiff.	Radlastdifferenz
RAS	Richtlinien für die Anlage von Straßen
Re	Rechts

RM	Reifenmodell
RQ	Regelquerschnitt
SiL	Software in the Loop
SOP	Start of Production
SP	(Fahrzeug) Schwerpunkt
SPW	Spurwechsel
SW	Software
TDI	Turbocharged Direct Injection
VAQ	Vorderachsquersperre
Var.	Variiert
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDM	Vehicle Dynamics Management
VW	Volkswagen
WoCa	Worst Case
XDS	Elektronisches Quer - Sperrdifferenzial

## Indizes

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
A	Aufbau
a	Außen
ai/aj	Ausgangsgröße Sensitivität
B	Beladung
dyn	Dynamisch
Fbn	Fahrbahn
Fzg	Fahrzeug
ges	Gesamt
h	Hinten
HA	Hinterachse
HL	Hinteres linkes Rad
HR	Hinteres rechtes Rad
i	Innen / Partikel
L	Lenkrad
max	Maximalwert

min	Minimalwert
opt	Optimalwert
p	Parameter
pi	Startparameter
PSO	Partikelschwarmoptimierung
R	Rollzentrum
ref	Referenz
Res	Resultierend
s	Strecke
SiKr	Sicherheitskriterien
sim	Simulation
SP	Schwerpunkt
TP	Vorausschauzeit
v	Vorne
VA	Vorderachse
VL	Vorderes linkes Rad
VR	Vorderes rechtes Rad
w	Rad
WP	Wankpol / Wankzentrum
zul.	Zulässig