

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 141

**Reihe herausgegeben von/Edited by**  
Volkswagen Aktiengesellschaft  
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

**Reihe herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Samuel Schacher

# Das Mentorensystem Race Trainer

Konzept für ein semi-automatisches  
Fahrertraining

 Springer

Samuel Schacher  
AutoUni  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2019

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

ISSN 1867-3635

ISSN 2512-1154 (electronic)

AutoUni – Schriftenreihe

ISBN 978-3-658-28134-2

ISBN 978-3-658-28135-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28135-9>

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 2019

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 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

# Danksagung

Diese Arbeit entstand in großen Teilen während meiner Zeit als Doktorand in der Volkswagen Konzernforschung im Team der Fahrdynamikforschung und zeigt auf, mit welchen technischen und konzeptionellen Ansätzen ein automatisiertes Fahrzeug zu einem Mentor für den Menschen werden kann. Durch die Entwicklung und Umsetzung der Algorithmen im Forschungsfahrzeug Race Trainer und durch das entwicklungsbegleitende Feedback von über 160 Testfahrern wurden ein ganzheitlicher Ansatz für ein semi-automatisches Fahrertraining entwickelt, regelungstechnische Herausforderungen der Fahrer-Fahrzeug Interaktion gelöst und neue Auslegungsmöglichkeiten für Fahrerassistenzsysteme gefunden. Ich bedanke mich dafür bei allen Weggefährten für die Unterstützung in den vergangenen fünf Jahren. Ich hatte das große Glück mit außergewöhnlich talentierten Leuten zu arbeiten.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Rudibert King für die exzellente Betreuung und wertvollen Anregungen sowie dafür, dass seine Vorlesungen Begeisterung für die Regelungstechnik wecken. Ich bedanke mich zudem dafür, dass ich als externer Doktorand am Lehrstuhl für Mess- und Regelungstechnik der TU Berlin promovieren durfte und für die frühe Empfehlung, den Zweitgutachter bei diesem Thema außerhalb der Ingenieurwissenschaften zu suchen. Mein Dank an Prof. Dr.-Phil. habil. Mark Vollrath gilt deswegen, neben der Betreuung der Arbeit als Koreferent, auch für die inhaltlichen Anmerkungen bereits während der Umsetzung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Kraume danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die hervorragende Durchführung des Verfahrens.

I am also very thankful to Prof. J. Christian Gerdes for letting me join his excellent team of the Stanford DDL Lab in the summer of 2015 to learn about MPC design. He and every single one in the lab has to be credited for creating a supportive and encouraging environment that enables excellence in every Ph.D. student.

Insgesamt hatte ich das einmalige Erlebnis in fantastischen Teams in Wolfsburg, Stanford sowie Berlin zu arbeiten und spannende Fragestellungen unter sehr guten Randbedingungen zu erforschen. Diese Möglichkeit hätte ich nicht ohne meinen damaligen Chef Dr.-Ing. Felix Kallmeyer erhalten. Zu jeder Zeit hatte ich seine Unterstützung und konnte sowohl von großem Freiraum als auch von vielen fachlichen und überfachlichen Diskussion profitieren. Für das wiederholt in mich gelegte Vertrauen möchte ich mich sehr bedanke.

Den nachfolgenden Kapiteln würde zudem, ohne die Unterstützung von meinem VW seitigen Betreuer Dr.-Ing Jens Hödt, der fachliche und inhaltliche Feinschliff fehlen. Jens Hödt bin ich ebenfalls dankbar für die Geduld mich viele Ansätze ausprobieren zu lassen und auch für die Ermutigung diese Wege auch nach der ersten Sackgasse zu verfolgen. Das geteilte Interesse an Kulturthemen und den Austausch mittels audiovisueller Anschauungsobjekte habe ich sehr geschätzt.

Jeder aus dem Team der Fahrdynamikforschung hat entweder durch vorherige Arbeiten auf die ich aufbauen konnte, durch organisatorische Unterstützung oder durch fachliche und überfachliche Diskussionen zu dieser Arbeit beigetragen. Das außergewöhnlich gute Arbeitsklima im Büro, auf Testfahrten und auch die Aktivitäten außerhalb des Arbeitskontexts

haben das tägliche Pendeln zwischen zwei Städten vergessen lassen. Durch die produktive Zusammenarbeit als Team auf den wiederholten Testfahrten in Hockenheim, Oschersleben, Most, Portimao, Thunderhill sowie Testgeländen der Volkswagen AG konnten jeweils enorme Fortschritte erzielt und Algorithmen entwickelt werden, die nicht nur in einem spezialisierten Szenario bestand haben.

Ich danke meinem Büro- und Doktorandenkollegen Dr.-Ing. Dennis Schaare dafür, immer als exzellenter Gesprächspartner bereitgestanden zu haben und für eine sehr gute Korrekturlesung dieser Arbeit. Dennis Schaare hat mir zudem dabei geholfen, den Verstand bei dem Wahnsinnsritt, den eine Promotion darstellt, zu bewahren.

Ich bedanke mich bei Dr. rer. nat. Andro Kleen für die hervorragende Zusammenarbeit im Race Trainer Projekt. Inhaltlich und in der Abstimmung der Fahrerinteraktion hat Andro Kleen mit seiner Hintergrund aus der Verkehrspsychologie zudem einen wertvollen Beitrag geleistet. Die vielen Präsentationsfahrten konnten deswegen alle so erfolgreich bewältigt werden, da wir zu einem exzellenten Team zusammenwuchsen. Die Effizienz und Verlässlichkeit, mit der wir uns zum Schluss auch bei neuen Herausforderungen abgestimmt und koordiniert haben, war außergewöhnlich.

Ebenfalls außergewöhnlich war die Zusammenarbeit mit jedem einzelnen aus der Werkstatt der Volkswagen Konzernforschung. Durch deren Fähigkeiten und Engagement ist aus einer Pflichtübung, dem Auf- und Umbau der drei Iterationen vom Race Trainer Versuchsträger, eine Quelle von positiven Erlebnissen geworden.

Ich danke Julia Bolewski, Robert Gieselmann, Jan Haneberg und Mario Oweisi für ihren engagierten Einsatz während Praktika und Abschlussarbeiten und für die Diskussionen zu und die Ausgestaltung von wichtigen Elementen des Mentorenkonzepts.

Ich danke meinen Doktorandenkollegen der TU Berlin für eine stets positive Aufnahme als externer Doktorand und die produktive Atmosphäre zum Schreiben sowie zum Vorbereiten auf die Verteidigung. Für zusätzliche Vorbereitungen auf die Disputation danke ich dem Konzernforum Mobilität-leben.

Um das Verständnis für und die Unterstützung bei meiner Auszeit zum Finalisieren der geschriebenen Arbeit danke ich meinen Kollegen aus dem Team der Forschung automatisches Fahren und meinen Vorgesetzten Dr.-Ing. Jens Langenberg, Dr.-Ing. Helge Neuner und Prof. Dr.-Ing. Thomas Form.

Ganz besonders danke ich meiner Familie. Ohne die bedingungslose und liebevolle Unterstützung meiner Eltern Karin und Dieter hätte ich nicht diese Zeilen schreiben können. Neben der Finanzierung meines Studiums sind es insbesondere der emotionale Rückhalt, ihre Lebenserfahrung und der mir ermöglichte Freiraum, durch den ich wachsen konnte. Meine Frau Nadine hat zudem einen riesigen Anteil am Erfolg dieser Arbeit. Ohne ihr offenes Ohr und vor allem Liebe hätte ich die Promotionszeit nicht überstanden. Für die unzähligen Male, die sie ihre Interessen für mich zurückgestellt hat, reicht kein Dank dieser Welt. Erst recht nicht für das größte Geschenk überhaupt, denn unsere wundervolle Tochter Mia Ada bereichert jeden Moment unseres Lebens.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis . . . . .	IX
Symbolverzeichnis . . . . .	XI
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen . . . . .	3
2.1.1 Koordinatensysteme . . . . .	3
2.1.2 Einspurmodell der Fahrzeugdynamik . . . . .	5
2.1.3 Modellierung des Lenksystems und der Lenkunterstützung . . . . .	8
2.2 Sollvorgaben für die vollautomatische Fahrt im Grenzbereich . . . . .	13
2.2.1 Ausnutzung der maximalen Fahrzeugdynamik . . . . .	14
2.2.2 Vorgabe der Referenzlinie . . . . .	16
2.2.3 Lokale Relativtrajektorien . . . . .	17
2.2.4 Berechnung der Referenzgeschwindigkeit . . . . .	23
2.3 Regelungskonzepte für die vollautomatische Fahrt im Grenzbereich . . . . .	27
2.3.1 Querdynamische Bahnfolgeregelung . . . . .	28
2.3.2 Lenkwinkelregelung . . . . .	32
2.3.3 Längsdynamikregelung . . . . .	33
<b>3 Mentorensysteme . . . . .</b>	<b>37</b>
3.1 Mentorensysteme im Kontext von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	38
3.1.1 Einsatzmöglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	38
3.1.2 Lernpotentiale eines Autofahrers . . . . .	41
3.1.3 Kooperative Fahrerunterstützung . . . . .	44
3.1.4 Kooperationsverhalten und Sicherheit . . . . .	46
3.2 Regelungstechnische Analyse der kooperativen Fahrt . . . . .	48
3.2.1 Sollgrößen eines Mentorensystems . . . . .	48
3.2.2 Regelungsstrukturen und Fahrereinfluss . . . . .	50
3.2.3 Einschränkung der Robustifizierungsmöglichkeiten . . . . .	53
3.3 Konzept für Mentorensysteme . . . . .	55
3.3.1 Eingriffsdominanz und Planungsadaption . . . . .	56
3.3.2 Auslegungsraum der Kooperationstypen . . . . .	60
3.3.3 Eingriffsdominanzregelung und Regelkreis des Mentorensystems . . . . .	62
<b>4 Sollvorgaben für die kooperative Fahrt . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1 Lokale Rückführtrajektorien . . . . .	67
4.1.1 Planungsadaption durch Variation der Rückführdistanz . . . . .	67
4.1.2 Planungsadaption durch Variation der Rückführdistanz . . . . .	69
4.1.3 Restriktionsprüfung zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit . . . . .	71

4.1.4	Trajektorienauswahl und Bewertung der Situationskritikalität . . . .	73
4.2	Fahrerspezifische Geschwindigkeitsprofile . . . . .	75
4.2.1	Planungsadaption durch Nachbildung von Beschleunigungsmustern	76
4.2.2	Individuelle Grenzen im „g-g“-Diagramm . . . . .	78
4.2.3	Weitere Eigenschaften und subjektive Abstimmung . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Regelungskonzepte für die kooperative Fahrt . . . . .</b>	<b>83</b>
5.1	Kooperative Querdynamikregelung . . . . .	83
5.1.1	Ziele und Architekturübersicht der Querdynamikregelung . . . . .	83
5.1.2	Eingriffsdominanzvariation in der Lenkwinkelregelung . . . . .	85
5.2	Kooperative Längsdynamikregelung . . . . .	87
5.2.1	Ziele und Architekturübersicht der Längsdynamikregelung . . . . .	87
5.2.2	Eingriffsdominanzvariation und Aktorikansteuerung . . . . .	89
5.3	Eingriffsdominanzregelung und Kooperationsverhalten . . . . .	93
5.3.1	Regelung und Vorgabe von Eingriffsdominanz und Planungsadaption	93
5.3.2	Regelung der Eingriffsdominanz in kritischen Situationen . . . . .	94
5.3.3	Vorgabe des Kooperationsverhaltens in normalen Situationen . . . .	95
<b>6</b>	<b>Kooperative Assistenz für ein Fahrertraining auf der Rennstrecke . . . . .</b>	<b>99</b>
6.1	Umsetzung eines Mentorensystems für ein Rennstreckentraining . . . . .	99
6.1.1	Rennstreckentraining und Einsatz von Mentorensystemen . . . . .	99
6.1.2	Designentscheidungen und gewünschtes Kooperationsverhalten . .	101
6.1.3	Versuchsfahrzeug und Assistenzstruktur . . . . .	102
6.1.4	Abstimmung des Mentorensystems . . . . .	104
6.1.5	Versuchsdurchführung und Aspekte der Fahrerbewertung . . . . .	107
6.2	Versuchsfahrten und Regelungsergebnisse . . . . .	109
6.2.1	Messgrößen der semi-automatischen Fahrt . . . . .	109
6.2.2	Planungsadaption und Regelungsgenauigkeit . . . . .	115
6.2.3	Semi-automatisches Fahrertraining . . . . .	120
6.2.4	Eingriffsdominanzregelung in Trainings- und in Notsituationen . .	125
6.2.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick . . . . .</b>	<b>133</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>137</b>
	Literatur . . . . .	143
	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>145</b>
A.1	Recheneffiziente Längsruckbegrenzung . . . . .	145
A.1.1	Begrenzung des positiven Längsrucks . . . . .	146
A.1.2	Begrenzung des negativen Längsrucks . . . . .	147
A.2	Potenzieller Effekt eines Fahrertrainings auf die Verkehrssicherheit . . . . .	150
A.3	Indirekte Unterstützungsmöglichkeiten und Sicherheitskonzept . . . . .	152

# Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blockier-System
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
AvD	Automobilclub von Deutschland
ED	Eingriffsdominanz
EDR	Eingriffsdominanzregelung
EPS	Electric Power Steering
ESC	Elektronische Stabilitätskontrolle
ESM	Einspurmodell
FAS	Fahrerassistenzsystem
FDR	Fahrdynamikregelung
LDR	Längsdynamikregelung
LoHA	Level of Haptic Authority
LWR	Lenkwinkelregelung
MPC	Model Predictive Controller
PA	Planungsadaption
QDR	Querdynamikregelung

# Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha$	rad	Schräglaufwinkel: Winkel zwischen Längsachse und Bewegungsrichtung des Reifens
$\alpha_h$	rad	Schräglaufwinkel am Hinterrad des Einspurmodells
$\alpha_v$	rad	Schräglaufwinkel am Vorderrad des Einspurmodells
$\alpha_{v,ref}$	rad	Von der Bahnfolgeregelung gewünschter Schräglaufwinkel der Vorderräder
$\beta$	rad	Schwimmwinkel des Fahrzeugs
$\delta_H$	rad	Tatsächlicher Lenkradwinkel
$\delta_H^*$	rad	Ritzelwinkel: Aus Zahnstangenposition $y_{zst}$ berechneter Lenkradwinkel
$\Delta\psi$	rad	Winkelfehler zwischen Kurswinkel und Referenzwinkel
$\Delta t_{Trainer}^{Intervall}$	s	Transitionsintervall für den Wechsel vom Trainings- auf das Sicherheitsprofil in der Geschwindigkeitsregelung
$\delta_v$	rad	Tatsächlicher Radlenkwinkel
$\delta_v^*$	rad	Aus Zahnstangenposition $y_{zst}$ berechneter Radlenkwinkel
$\delta_{v,ref}$	rad	Von der Bahnfolgeregelung gewünschter Radlenkwinkel
$\kappa_R$	1/m	Krümmung der Referenzlinie
$\kappa_V$	1/m	Krümmung der als statisch angenommenen Kreisbahn, auf der sich das Fahrzeug bewegt
$\mu$	1	Reibungsbeiwert der Kraftübertragung zwischen Reifen und Straße
$\varphi_V$	rad	Wankwinkel des Fahrzeugs
$\psi_K$	rad	Kurswinkel des Fahrzeugs
$\psi_R$	rad	Winkel der Referenzlinie beziehungsweise Winkel des Tangentialvektors $\vec{t}_R$ im ortsfesten Koordinatensystem
$\psi$	rad	Gierwinkel des Fahrzeugs
$\dot{\psi}$	rad/s	Gierwinkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs
$\Theta_{zz}$	kg m/s <sup>2</sup>	Massenträgheitsmoment um den Fahrzeugschwerpunkt

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\theta_V$	rad	Nickwinkel des Fahrzeugs
$\vec{a}_{\text{ges}}$	$\text{m/s}^2$	Auf das Fahrzeug wirkende Gesamtbeschleunigung
$a_{\text{max}}$	$\text{m/s}^2$	Absolute Maximalbeschleunigung
$a_x$	$\text{m/s}^2$	Längsbeschleunigung
$\dot{a}_x$	$\text{m/s}^3$	Längsruck
$\dot{a}_{x,\text{lim}}$	$\text{m/s}^3$	Für die Berechnung des Geschwindigkeitsprofils vorgegebene Längsruckbegrenzung
$\dot{a}_{x,\text{max}}$	$\text{m/s}^3$	Durch die Fahrzeugträglichkeit bestimmter, maximaler Längsruck
$a_{x,\text{ref}}$	$\text{m/s}^2$	Referenzbeschleunigung entlang der gegebenen Referenzlinie
$a_{x,\text{Trainer}}$	$\text{m/s}^2$	Dem Fahrer empfohlenes Beschleunigungsprofil entlang einer gegebenen Referenzlinie
$a_y$	$\text{m/s}^2$	Querbeschleunigung
$c_\alpha$	N/rad	Lineare Approximation der Reifenseitensteifigkeit
$c_{\alpha h}$	N/rad	Lineare Approximation der Reifenseitensteifigkeit der Hinterräder
$c_{\alpha v}$	N/rad	Lineare Approximation der Reifenseitensteifigkeit der Vorderräder
$d$	m	Lateraler Abstand zwischen Referenzlinie und Fahrzeugschwerpunkt im Frenet-Koordinatensystem
$\vec{D}_0$	$[\text{m}, 1, \text{m}^{-1}, \text{m}^{-2}]$	Vorgegebener Startzustand der Relativtrajektorien
$d_{\text{links}}$	m	Lateraler Abstand zwischen Referenzlinie und dem linken Straßenrand im Frenet-Koordinatensystem
$d_{\text{rechts}}$	m	Lateraler Abstand zwischen Referenzlinie und dem rechten Straßenrand im Frenet-Koordinatensystem
$\vec{D}_{\text{Ziel}}$	$[\text{m}, 1, \text{m}^{-1}, \text{m}^{-2}]$	Gewünschter Endzustand der Relativtrajektorien
ED	1	Eingriffsdominanz
ED <sup>CL</sup>	1	Von Eingriffsdominanzregelung geforderte Eingriffsdominanz
$e_\delta$	rad	Lenkwinkelfehler in Ritzelkoordinaten $\delta_{\text{H}}^*$
ED <sub>prop</sub>	1	Vom Stellgesetz berechnete Eingriffsdominanz

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$F_{x,ref}^{Neg}$	N	Vom Längsdynamikregler geforderte Reifenlängskräfte mit negativem Vorzeichen
$F_{x,ref}^{Pos}$	N	Vom Längsdynamikregler geforderte Reifenlängskräfte mit positivem Vorzeichen
$F_{x,Safety}^{Neg}$	N	Vom Längsdynamikregler als Sicherheitsgrenze geforderte Reifenlängskräfte mit negativem Vorzeichen
$F_{x,Trainer}^{Neg}$	N	Vom Längsdynamikregler empfohlene Reifenlängskräfte mit negativem Vorzeichen
$F_{x,Trainer}^{Pos}$	N	Vom Längsdynamikregler als Sicherheitsgrenze maximal erlaubte Reifenlängskräfte mit positivem Vorzeichen
$F_y$	N	Querkraft
$F_{yh}$	N	Reifenquerkräfte der Hinterräder
$F_{yv}$	N	Reifenquerkräfte der Vorderräder
$F_{yv,ref}$	N	Vom Bahnfolgeregler geforderte Querkraft der Vorderräder
$F_z$	N	Normalkraft
$F_{zh}$	N	Normalkraft auf der Hinterachse
$F_{zv}$	N	Normalkraft auf der Vorderachse
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$i_{EPS}$	rad/m	EPS-Getriebeübersetzung
$i_g$	rad/m	Lenkgetriebeübersetzung
$i_l$	rad/rad	Gesamtlenkübersetzung
$i_s$	m/rad	Lenkgestängeübersetzung
$J_{\text{Querplanung}}$	1	Kostenfunktional des Optimalsteuerproblems zur Bestimmung von Rückführtrajektorien
$J_{\text{Relativplanung}}$	1	Kostenfunktional des Optimalsteuerproblems zur Bestimmung von Relativtrajektorien
$k_{\text{dyn}}$	1	Linearer Gewichtungsfaktor auf die Trajektorienlänge zur Modifikation der Rückführungsdistanz
$k_{e\delta}$	1	P-Anteil der Lenkwinkelregelung
$k_{e\delta}^{ED}$	1	Variierbare P-Verstärkung der Lenkwinkelregelung zur Anpassung der Eingriffsdominanz

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$k_{e\delta}^{\max}$	1	Maximale P-Verstärkung der Lenkwinkelregelung
$k_{e\delta}^{\min}$	1	Minimale P-Verstärkung der Lenkwinkelregelung
$k_{OL,ED}$	1	Variierbare Verstärkung der Vorsteuerung zur Anpassung der Eingriffsdominanz
$k_s$	1	Gewichtungsfaktor auf die Trajektorienlänge zur Modifikation der Rückführungsdistanz
$k_x$	1/m	Gewichtungsfaktor auf die laterale Abweichung der Relativtrajektorien zum vorgegebenen Endzustand
$l_h$	m	Abstand vom Fahrzeugschwerpunkt zur Hinterachse
$l_v$	m	Abstand vom Fahrzeugschwerpunkt zur Vorderachse
$m$	kg	Fahrzeugmasse
$m_h$	kg	Anteilige Fahrzeugmasse auf der Hinterachse
$m_v$	kg	Anteilige Fahrzeugmasse auf der Vorderachse
$M_{ActiveReturn}$	Nm	Künstliches Reifenrückstellmoment von der Serienlenkung
$M_{Align}$	Nm	Am Vorderrad wirkendes, natürliches Reifenrückstellmoment
$M_{Align,ref}$	Nm	Vom Lenkwinkelregler kompensiertes Reifenrückstellmoment
$M_{Assist}$	Nm	Direkte Lenkunterstützung der Serienlenkung
$M_{LWR}$	Nm	Vom Lenkwinkelregler kommandiertes additives Lenkmoment
$M_{LWR}^{CL}$	Nm	Regelungsanteil des additiven Lenkmoments vom Lenkwinkelregler
$M_{LWR}^{OL}$	Nm	Vorsteuerungsanteil des additiven Lenkmoments vom Lenkwinkelregler
$M_{EPS}$	Nm	Auf die Zahnstange des Lenksystems wirkendes Moment des EPS-Motors
$M_{Ext}$	Nm	Von einer externen Steuereinheit additiv angefordertes Lenkmoment im Lenksystem
$M_H$	Nm	Tatsächliches Lenkmoment vom Fahrer
$M_{LF}$	Nm	Lenkmoment aller Lenkfunktionen der Serienlenkung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$M_{\text{Mentor}}$	Nm	Vom Mentorensystem kommandiertes additives Lenkmoment
$M_{\text{Mentor}}^{\text{CL}}$	Nm	Regelungsanteil des vom Mentorensystem gewünschten additiven Lenkmoments
$M_{\text{Mentor}}^{\text{CL,ED}}$	Nm	An Eingriffsdominanz angepasster Regelungsanteil des vom Mentorensystem gewünschten additiven Lenkmoments
$M_{\text{Mentor}}^{\text{norm}}$	Nm	Auf das Nennmoment vom Elektromotor normalisiertes additives Lenkmoment vom Mentorensystem
$M_{\text{Mentor}}^{\text{OL}}$	Nm	Vorsteuerungsanteil des vom Mentorensystem gewünschten additiven Lenkmoments
$M_{\text{Mentor}}^{\text{OL,ED}}$	Nm	An Eingriffsdominanz angepasster Vorsteuerungsanteil des vom Mentorensystem gewünschten additiven Lenkmoments
$M_{\text{Mentor}}^{\text{SAT,ED}}$	Nm	Variierbare Saturierung des Lenkmoments des Mentorensystems zur Anpassung der Eingriffsdominanz
$M_{\text{Mentor}}^{\text{SAT,max}}$	Nm	Obere Saturierungsgrenze von $M_{\text{Mentor}}^{\text{SAT,ED}}$
$M_{\text{Mentor}}^{\text{SAT,min}}$	Nm	Untere Saturierungsgrenze von $M_{\text{Mentor}}^{\text{SAT,ED}}$
$M_{\text{Tdyn}}$	Nm	Nicht gemessener, dynamischer Anteil im Lenkmoment vom Fahrer
$M_{\text{Tstat}}$	Nm	Gemessener, statischer Anteil im Lenkmoment vom Fahrer
$M_{\text{Tstat}}^{\text{norm}}$	Nm	Mit Messauflösung normalisiertes Lenkmoment vom Fahrer
$n_k$	m	Konstruktiver Reifennachlauf: Distanz zwischen Drehpunkt der Lenkachse und dem Reifenmittelpunkt
$n_r$	m	Pneumatischer Reifennachlauf: Distanz zwischen Reifenmittelpunkt und Angriffspunkt der Querkräfte
$n_v$	m	Vollständiger Reifennachlauf: Hebelarm der Reifenquerkräfte auf die Zahnstange der Lenkung
$\vec{n}_R$	m	Normalenvektor der Frenet-Koordinaten im ortsfesten Koordinatensystem
$N_{\text{Traj}}$	1	Gesamtanzahl generierter Relativtrajektorien

Symbol	Einheit	Beschreibung
$N_{\text{Traj,Fahrbar}}$	1	Anzahl Relativtrajektorien mit fahrbarem Kurven- und Geschwindigkeitsverlauf
PA	1	Planungsadaption
$s$	m	Bogenlänge, beziehungsweise Position entlang der Referenzlinie im Frenet-Koordinatensystem
$s_0$	m	Startposition eines Berechnungsintervalls auf der Referenzlinie
$\Delta s$	m	Abtastschrittweite der Geschwindigkeitsberechnung
$s_e$	m	Endposition eines Berechnungsintervalls auf der Referenzlinie
$s_{e,\text{opt}}$	m	Länge der rückführenden Relativtrajektorie
$S_{\text{Krit}}$	1	Situationskritikalität anhand des Verhältnisses von fahrbaren zu insgesamt betrachteten Trajektorien
$S_{\text{Krit}}^{\text{Aktivierung}}$	1	Situationskritikalitätswert als Aktivierungsschranke der Eingriffsdominanzregelung
$s_{\text{max}}$	m	Vollständige Länge der Referenzlinie im Frenet-Koordinatensystem
$\vec{t}_R$	m	Tangentialvektor der Frenet-Koordinaten im ortsfesten Koordinatensystem
$u_{\text{BP,Fahrer}}$	bar	Vom Fahrer erzeugter Bremsdruck
$u_{\text{BP,Mentor}}$	bar	An das Fahrzeug kommandierter Bremsdruck
$u_{\text{BP,Trainer}}$	bar	Dem Fahrer empfohlener Bremsdruck
$u_{\text{GP,Fahrer}}$	1	Vom Fahrer gewünschte Gaspedalstellung
$u_{\text{GP,Mentor}}$	1	An das Fahrzeug kommandierte Gaspedalstellung
$u_{\text{GP,Mischung}}$	1	Vom Regelfehler abhängige Mischung aus $u_{\text{GP,Fahrer}}$ und $u_{\text{GP,Trainer}}$ zur stufenlosen Entkopplung des Fahrers
$u_{\text{GP,Trainer}}$	1	Dem Fahrer empfohlene Gaspedalstellung
$v$	m/s	Absolute Geschwindigkeit im Fahrzeugschwerpunkt
$\vec{v}_{\text{cog}}$	m/s	Vektorielle Geschwindigkeit im Fahrzeugschwerpunkt
$\vec{v}_h$	m/s	Vektorielle Geschwindigkeit am Hinterrad des Einspurmodell
$\vec{v}_v$	m/s	Vektorielle Geschwindigkeit am Vorderrad des Einspurmodell

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$v_x$	m/s	X-Komponente der Fahrgeschwindigkeit
$\hat{v}_x$	m/s	Für die Relativtrajektorie berechnetes Geschwindigkeitsprofil
$v_{x,lim}$	m/s	Durch Motorleistung oder gewollte Einschränkung bestimmte Geschwindigkeitsgrenze
$v_{x,max}$	m/s	Durch Motorleistung und Querbeschleunigungspotential festgelegte Höchstgeschwindigkeit
$v_{x,max}^*$	m/s	Durch Querbeschleunigungspotential festgelegte Höchstgeschwindigkeit
$v_{x,Par0}$	m/s	Ohne Modifikationsparameter berechnetes Geschwindigkeitsprofil entlang der gegebenen Referenzlinie: entspricht dem maximalen Geschwindigkeitsprofil
$v_{x,ref}$	m/s	Referenzgeschwindigkeit entlang der gegebenen Referenzlinie
$v_{x,RI}$	m/s	Zwischenergebnis der Rückwärtsintegration bei Berechnung der Referenzgeschwindigkeit
$v_{x,Safety}$	m/s	Geschwindigkeitsprofil, das während eines Fahrertrainings nicht überschritten werden darf
$v_{x,Trainer}$	m/s	Dem Fahrer empfohlenes Geschwindigkeitsprofil entlang einer gegebenen Referenzlinie
$v_{x,VI}$	m/s	Zwischenergebnis der Vorwärtsintegration bei Berechnung der Referenzgeschwindigkeit
$v_y$	m/s	Y-Komponente der Fahrgeschwindigkeit
$v_z$	m/s	Z-Komponente der Fahrgeschwindigkeit
$X$	m	x-Koordinate im horizontalen Fahrzeugkoordinatensystem
$x_E$	m	x-Koordinate im ortsfesten Koordinatensystem
$x_V$	m	x-Koordinate im Fahrzeugkoordinatensystem
$Y$	m	y-Koordinate im horizontalen Fahrzeugkoordinatensystem
$y_E$	m	y-Koordinate im ortsfesten Koordinatensystem
$y_V$	m	y-Koordinate im Fahrzeugkoordinatensystem
$y_{zst}$	m	Zahnstangenposition im Lenksystem

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$Z$	m	$z$ -Koordinate im horizontalen Fahrzeugkoordinatensystem
$\vec{z}_e$	m	Zielmannigfaltigkeit im Endzustand zur Berechnung von Relativtrajektorien
$z_E$	m	$z$ -Koordinate im ortsfesten Koordinatensystem
$z_V$	m	$z$ -Koordinate im Fahrzeugkoordinatensystem