

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Hendrik Oschlies

Komfortorientierte Regelung für die automatisierte Fahrzeugquerführung

AutoUni – Schriftenreihe

Band 136

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>

Hendrik Oschlies

Komfortorientierte Regelung für die automatisierte Fahrzeugquerführung

 Springer

Hendrik Oschlies
AutoUni
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2018

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

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-25234-2 ISBN 978-3-658-25235-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25235-9>

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner dreijährigen Tätigkeit als Doktorand in der Fahrwerksentwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Herrn Jun. Prof. Dr.-Ing. Stephan Schmidt gilt mein besonderer Dank für die wissenschaftliche Betreuung sowie für die wertvollen Anregungen während der Erstellung dieser Arbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Köster für die Übernahme des Korreferates und Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Arndt Lüder für die Übernahme des Vorsitzenden bei dem Promotionsverfahren.

Für die Möglichkeit der Anfertigung dieser Arbeit und die hervorragenden Randbedingungen gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Volker Buchmann, Herrn Dr.-Ing. Arnd Hagerodt sowie Herrn Dr.-Ing. Michael Rohlf.

Dir, Falko, danke ich in besonderer Weise für die Betreuung, beginnend als Masterand bis hin zur Promotion, die vielen fachlichen Diskussionen, die Unterstützung bei der Erstellung von Veröffentlichungen sowie für die Durchsicht der vorliegenden Arbeit.

Auch dir, Thomas, danke ich in besonderer Weise für die langjährige Zusammenarbeit, die zahlreichen fachlichen Diskussionen während der letzten drei Jahre sowie für das Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank insbesondere Dipl.-Ing. Sebastian Hamel und Dr.-Ing. Thomas Eigel, für die sehr gute Unterstützung des Promotionsvorhabens. Während der letzten drei Jahre haben mich auch zahlreiche Studenten mit ihren Arbeiten unterstützt.

Vielen Dank an Lukas, Kevin, Jannes und Pia.

Ganz besonders danke ich auch meinen Eltern, Peter und Sigrid, die mich in jeglicher Hinsicht während des Studiums und der Promotion unterstützt haben, die mir als ruhige, interessierte Gesprächspartner und in schwierigen Zeiten mit ihrer Lebenserfahrung zur Seite standen.

Die Kraft und den Willen diese Arbeit jeden Tag aufs Neue voran zu bringen sowie erfolgreich zu beenden, gab und gibt mir meine Frau Isabel. Ohne ihr Verständnis für den Verzicht auf viele gemeinsame Stunden und ihrer andauernden Unterstützung sowie der stetigen Gläubigkeit an mich, wäre diese Arbeit nicht entstanden. Dafür danke ich dir, Isabel, aus ganzem Herzen!

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVII
Symbolverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Serien-Spurhaltesysteme	5
2.2 Regelsysteme für Fahrerassistenzsysteme	9
2.2.1 Ansätze basierend auf PID-Reglern	9
2.2.2 Ansätze basierend auf Zustandsreglern	10
2.2.3 Ansätze basierend auf modellprädiktiver Regelung	10
2.3 Benchmarkuntersuchungen	11
3 Theoretische Grundlagen	15
3.1 Objektivierungsmethodik	15
3.1.1 Statistische Datenaufbereitung	15
3.1.2 Korrelationsanalyse	17
3.1.3 Regressionsanalyse	18
3.2 Regelungstechnische Grundlagen	20
3.2.1 Konventionelle Regelungsstrategien	21
3.2.2 Zustandsregelung	23
3.2.3 Modellprädiktive Regelung	25
3.2.4 Künstliche Intelligenz	29
4 Konzeptbeschreibung	33
4.1 Methodisches Vorgehen	33
4.2 Virtuelle Applikation einer assistierten Querführung	35
5 Untersuchung zum Nutzererleben bei einer assistierten Querführung	37
5.1 Erhebung objektiver Daten	37
5.1.1 Versuchsträger	37
5.1.2 Versuchsequipment	38
5.1.3 Reglerapplikation	40
5.1.4 Versuchsstrecke	44
5.2 Erhebung subjektiver Daten	45
5.2.1 Randbedingungen und Gültigkeit	45
5.2.2 Fragebogendesign und Bewertungskriterien	45

5.2.3	Versuchsdurchführung	47
5.2.4	Probandenauswahl	47
6	Analyse des bevorzugten assistierten Fahrstils	49
6.1	Ergebnisse der Probandenstudie	49
6.1.1	Auswertung des soziodemographischen Fragebogens	49
6.1.2	Auswertung des Paarvergleiches	51
6.2	Definition von Kennparametern	53
6.2.1	Allgemeine Kennparameter	55
6.2.2	Kennparameter zur Spurmittenabweichung	55
6.3	Objektivierung des Nutzererlebens bei einer assistierten Querführung	58
6.3.1	Darstellung der Subjektivnoten	58
6.3.2	Ergebnisse der Korrelationsanalyse	59
6.3.3	Ergebnisse der Faktorenanalyse	59
6.3.4	Darstellung der Objektivnotenmodelle	61
7	Entwicklung einer assistierten Querführung	65
7.1	Konzept	65
7.1.1	Fahrzeugmodell	65
7.1.2	Kinematik zwischen Fahrzeug und Fahrbahn	68
7.1.3	Drallsatz zur Berechnung des Reglermomentes	69
7.2	Umsetzung der MPC-Regelung	70
7.2.1	Darstellung des Prozessmodells in Zustandsraumdarstellung	70
7.2.2	Herleitung und Darstellung der Zielfunktion	72
7.2.3	Umsetzung der MPC	77
7.3	Identifikation der Modellparameter	77
8	Nutzung virtueller Methoden zur Funktionsentwicklung	79
8.1	Einführung in die virtuellen Methoden	79
8.2	Aufbau einer Simulationsumgebung	80
8.2.1	Konzept	80
8.2.2	Kameramodell	82
8.2.3	Fahrzeugmodell	83
8.2.4	Validierung der Simulationsumgebung	85
8.3	Methoden zur Reglerapplikation	85
8.3.1	Wahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus	86
8.3.2	Fahrmanöver	87
8.3.3	Zielfunktion	88
8.3.4	Rechenzeitoptimierung	88
8.4	Adaptive Regelungsverfahren	90
8.4.1	Identifikation der Modellparameter mittels RLS-Algorithmus	90
8.4.2	Identifikation der Modellparameter mittels künstlicher Intelligenz	92
9	Diskussion der Ergebnisse	97
9.1	Fahrmanöver und Strecken	97

9.2	Ergebnisse der Reglerapplikation	97
9.3	Ergebnisse der Regleradaption	98
9.3.1	Adaption mittels RLS-Algorithmus	99
9.3.2	Adaption durch Nutzung eines künstlichen neuronalen Netzes	100
9.4	Fazit	103
10	Zusammenfassung und Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	109
	Veröffentlichungen	117
	Anhang	119
A.1	Fragebogen der durchgeführten Probandenstudie	119
A.2	Auswertung des soziodemographischen Teils des Fragebogens	134
A.3	Auflistung der berechneten Kennparameter	143
A.4	Auswertung der Bewertungskriterien	147
A.5	Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern	152
A.6	Korrelation zwischen den Bewertungen und den Faktoren	160
A.7	Validierung der erstellten Simulationsumgebung	163
A.8	Darstellung der Adaption von Modellparametern	166

Abbildungsverzeichnis

1.1	Motivation für die virtuelle Applikation einer assistierten Funktion	2
2.1	Erklärung eines Spurhalteassistenten	6
2.2	SAE Level	9
3.1	Normierung der Subjektivnoten	16
3.2	Grundstruktur einer Regelung	20
3.3	Darstellung einer parallelen PID-Struktur	22
3.4	Regelkreis bestehend aus einer Vorsteuerung und einer Regelung	23
3.5	Blockschaltbild vom Zustandsraummodell	24
3.6	Darstellung eines Zustandsreglers	25
3.7	Prinzip einer modellprädiktiven Regelung	27
3.8	KNN für das Lernen von PID-Reglerparametern	30
4.1	Methodik am Beispiel einer Querführungsassistenz zur virtuellen Applikation	34
5.1	Spurinformationen der Kamera	38
5.2	Messtechnikaufbau im Versuchsträger	39
5.3	Physikalische Größen bei einer Wettbewerbsanalyse	41
5.4	Ergebnis der WBA-Analyse	42
5.5	Reglervarianten für die Versuchsstrecke im PG Ehra-Lessien	43
5.6	Reglervarianten für die Versuchsstrecke auf der Bundesautobahn (BAB) A39	44
5.7	Teststrecken	44
6.1	Altersverteilung der Probanden	50
6.2	Erfahrung im Umgang mit FAS bei Nutzung	51
6.3	Befindlichkeit der Probanden im PG Ehra-Lessien zu Beginn des Versuches	52
6.4	Anzahl der Probanden, die eine jeweilige Variante im Paarvergleich auf dem Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien bevorzugen	53
6.5	Anzahl der Probanden, die eine jeweilige Variante im Paarvergleich auf dem Streckenabschnitt auf der BAB A39 bevorzugen	54
6.6	Darstellung eines absoluten und relativen Signales am Beispiel der Spurmittenabweichung	54
6.7	Median absoluter Amplitudenwerte, bezogen auf den Median	57
6.8	TLC-Ereignis	57
6.9	Bewertungskriterium Fahrstil auf dem Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	59
7.1	Darstellung der relevanten Größen bei einem ESM	66
7.2	Kinematik zwischen Fahrzeug und Fahrbahn	68

7.3	Blockschaltbild der Umsetzung des MPC im Fahrzeug	77
7.4	Systemidentifikation mittels einer sprungförmigen Anregung	78
7.5	Systemidentifikation mit gemessener und approximierter Sprungantwort	78
8.1	V-Modell nach ISO-Norm 2206	80
8.2	Konzept der Simulationsumgebung für eine assistierte Querführung	81
8.3	Ermittlung der Schnittpunkte an der Hinterachse in der Simulationsumgebung	83
8.4	Vergleich des gemessenen und berechneten Gierwinkelfehlers	84
8.5	Darstellung des HSW-Modells zur Simulation des Lenkradwinkels auf Basis des Soll-Momentes für die Teststrecke im PG Ehra-Lessien	85
8.6	Darstellung des HSW-Modells zur Simulation des Lenkradwinkels auf Basis des Soll-Momentes für die Teststrecke auf der BAB A39	86
8.7	Laufzeitvergleich zwischen PSO und DE	87
8.8	Vergleich der Rechenzeiten verschiedener Varianten für die Simulation	89
8.9	Erweiterung des MPC um ein RLS zur Adaption der Modellparameter	92
8.10	Erweiterung des MPC um ein KNN zur Adaption der Modellparameter	93
8.11	Aufbau der Messtechnik im Versuchsträger	94
8.12	Darstellung der Frobeniusnorm während der Adaption von Modellparametern	95
9.1	Darstellung der Adaption von Modellparameter mit dem RLS-Verfahren	100
9.2	Darstellung der Adaption von Modellparameter mit dem KNN-Verfahren	102
A.1	Verteilung des Führerscheinbesitzes	134
A.2	Durchschnittliche gefahrene Kilometer im Jahr	134
A.3	Bevorzugte Reisegeschwindigkeit auf Autobahnen	135
A.4	Streckenverteilung zwischen Autobahn, Landstraße und Stadtverkehr	135
A.5	Erfahrung im Umgang mit FAS bei Nutzung insgesamt	136
A.6	Vorerfahrung FAS	136
A.7	Charakter der Fahrweise	137
A.8	Technische Affinität	137
A.9	Befindlichkeit der Probanden im PG Ehra-Lessien zu Beginn des Versuches	138
A.10	Befindlichkeit der Probanden im PG Ehra-Lessien während des Versuches	138
A.11	Befindlichkeit der Probanden im PG Ehra-Lessien während des Versuches	139
A.12	Befindlichkeit der Probanden im PG Ehra-Lessien während des Versuches	139
A.13	Befindlichkeit der Probanden im PG Ehra-Lessien am Ende des Versuches	140
A.14	Befindlichkeit der Probanden auf der BAB A39 zu Beginn des Versuches	140
A.15	Befindlichkeit der Probanden auf der BAB A39 während des Versuches	141
A.16	Befindlichkeit der Probanden auf der BAB A39 während des Versuches	141
A.17	Befindlichkeit der Probanden auf der BAB A39 während des Versuches	142
A.18	Befindlichkeit der Probanden auf der BAB A39 am Ende des Versuches	142
A.19	PG Ehra-Lessien: Bewertungskriterium Dynamik	147
A.20	PG Ehra-Lessien: Bewertungskriterium Spurführung	147
A.21	PG Ehra-Lessien: Bewertungskriterium Komfort	147

A.22 PG Ehra-Lessien: Bewertungskriterium Fahrstil	148
A.23 PG Ehra-Lessien: Bewertungskriterium Nachvollziehbarkeit	148
A.24 PG Ehra-Lessien: Bewertungskriterium Sicherheit	148
A.25 PG Ehra-Lessien: Bewertungskriterium Attraktivität	149
A.26 BAB A39: Bewertungskriterium Dynamik	149
A.27 BAB A39: Bewertungskriterium Spurführung	149
A.28 BAB A39: Bewertungskriterium Komfort	150
A.29 BAB A39: Bewertungskriterium Fahrstil	150
A.30 BAB A39: Bewertungskriterium Nachvollziehbarkeit	150
A.31 BAB A39: Bewertungskriterium Sicherheit	151
A.32 BAB A39: Bewertungskriterium Attraktivität	151
A.33 Darstellung des HSW-Modells zur Simulation der Gierrate auf Basis des Lenkradwinkels für die Teststrecke im PG Ehra-Lessien	163
A.34 Darstellung des HSW-Modells zur Simulation der Querbeschleunigung auf Basis des Lenkradwinkels für die Teststrecke im PG Ehra-Lessien	163
A.35 Darstellung des HSW-Modells zur Simulation des Schwimmwinkels auf Basis des Lenkradwinkels für die Teststrecke im PG Ehra-Lessien	164
A.36 Darstellung des HSW-Modells zur Simulation der Gierrate auf Basis des Lenkradwinkels für die Teststrecke auf der BAB A39	164
A.37 Darstellung des HSW-Modells zur Simulation der Querbeschleunigung auf Basis des Lenkradwinkels für die Teststrecke auf der BAB A39	165
A.38 Darstellung des HSW-Modells zur Simulation des Schwimmwinkels auf Basis des Lenkradwinkels für die Teststrecke auf der BAB A39	165
A.39 Darstellung der Adaption von Modellparameter mit dem RLS-Verfahren .	166
A.40 Darstellung der Adaption von Modellparameter mit dem KNN-Verfahren	167

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht Serien-Spurhaltesysteme	7
2.2	Kriterien für die Bewertung eines aktiven Spurhalteassistenten	13
3.1	Vorteile und Nachteile MPC	29
3.2	Vorteile und Nachteile KNN	31
5.1	Messgenauigkeit der ADMA-G	40
5.2	ATZ-Skala	46
6.1	Kennparameter zur Spurmittenabweichung	56
6.2	Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Gierrate für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	60
6.3	Korrelation zwischen den Faktoren und dem Bewertungskriterium Fahrstil	60
6.4	Objektivnotenmodelle für die Strecke im PG Ehra-Lessien unter Angabe der Gültigkeitsbereiche für die Kennparameter	62
6.5	Objektivnotenmodelle für die Strecke auf der BAB A39 unter Angabe der Gültigkeitsbereiche für die Kennparameter	63
9.1	Noten der Variante 1 für den Streckenabschnitt im PG Ehra	98
9.2	Noten der Variante 1 für den Streckenabschnitt auf der BAB A39	98
9.3	Noten der Variante 2 für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	99
9.4	Noten der Variante 2 für den Streckenabschnitt auf der BAB A39	101
9.5	Noten der Variante 3 für den Streckenabschnitt im PG Ehra	101
9.6	Noten der Variante 3 für den Streckenabschnitt auf der BAB A39	103
A.1	Kennparameter zur Gierrate	143
A.2	Kennparameter zur Querbeschleunigung	143
A.3	Kennparameter zum Reglermoment	144
A.4	Kennparameter zum Lenkwinkel	145
A.5	Kennparameter zur Lenkwinkelgeschwindigkeit	145
A.6	Kennparameter zum Gierwinkelfehler	145
A.7	Kennparameter zum Querruck	146
A.8	Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Spurmittenabweichung für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	152
A.9	Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Querbeschleunigung für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	152
A.10	Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Reglermoment für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	152
A.11	Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Lenkwinkel für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	153

A.12 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Lenkwinkelgeschwindigkeit für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	153
A.13 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Gierwinkelfehler für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien . . .	153
A.14 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Querruck für den Streckenabschnitt im PG Ehra-Lessien	154
A.15 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Spurmittenabweichung für den Streckenabschnitt BAB A39	155
A.16 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Gierrate für den Streckenabschnitt BAB A39	156
A.17 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Querbeschleunigung für den Streckenabschnitt BAB A39	156
A.18 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Reglermoment für den Streckenabschnitt BAB A39	157
A.19 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Lenkwinkel für den Streckenabschnitt BAB A39	158
A.20 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zur Lenkwinkelgeschwindigkeit für den Streckenabschnitt BAB A39 . . .	158
A.21 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Gierwinkelfehler für den Streckenabschnitt BAB A39	158
A.22 Korrelation zwischen den Bewertungskriterien und den Kennparametern zum Querruck für den Streckenabschnitt BAB A39	159
A.23 Korrelation zwischen den Faktoren und dem Bewertungskriterium Dynamik	160
A.24 Korrelation zwischen den Faktoren und dem Bewertungskriterium Spurführung	160
A.25 Korrelation zwischen den Faktoren und dem Bewertungskriterium Fahrkomfort	161
A.26 Korrelation zwischen den Faktoren und dem Bewertungskriterium Nachvollziehbarkeit	161
A.27 Korrelation zwischen den Faktoren und dem Bewertungskriterium Sicherheit	162
A.28 Korrelation zwischen den Faktoren und dem Bewertungskriterium Attraktivität	162

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
BAB	Bundesautobahn
BK	Bewertungskriterium
CAN	Controller Area Network
DE	Differential Evolution
DGPS	Differential Global Positioning System
E-CAN	Extended-CAN
EPS	Electric Power Steering
ESM	Einspurmodell
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FIR	Finite Impulse Response
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphical User Interface
HiL	Hardware-in-the-Loop
HSW	Hammerstein-Wiener
IQA	Interquartilsabstand
KI	Künstliche Intelligenz
KNN	Künstliche Neuronale Netze
KP	Kennparameter
KS	Koordinatensystem
LAN	Local Area Network
LKW	Lastkraftwagen
LTI	Linear-Time-Invariant
LTV	Linear-Time-Variant

MFK	Multifunktionskamera
MiL	Model-in-the-Loop
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MPC	Model Predictive Control
PG	Prüfgelände
PID	Proportional-Integral-Differential
PSO	Particle Swarm Optimization
RCP	Rapid-Control-Prototyping
RLS	Recursive-Least-Square
SAE	Society of Automotive Engineers
SF-CAN	Sensorfusions-CAN
SiL	Software-in-the-Loop
SP	Schwerpunkt
TLC	Time-to-Line-Crossing
ViL	Vehicle-in-the-Loop
WBA	Wettbewerbsanalyse
WLAN	Wireless Local Area Network

Symbolverzeichnis

$a_{SP,y}$	$[m/s^2]$	Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt
A	$[-]$	Dynamikmatrix
A^2	$[m^2]$	Klothoidenparameter
$a_{SP,y}$	$[m/s^2]$	Querbeschleunigung des Schwerpunkts
b	$[-]$	Regressionskoeffizient
b	$[\frac{Ns}{m}]$	Dämpfungskonstante
B	$[-]$	Eingangsmatrix
C	$[-]$	Ausgangsmatrix
$c_{\alpha,h}, c_{\alpha,v}$	$[N/rad]$	Schräglaufsteifigkeit Hinter-/Vorderachse
d	$[-]$	Störgröße
D	$[-]$	Durchgangsmatrix
e	$[-]$	Regelabweichung
e_y	$[m]$	Querabweichung
e_ψ	$[rad]$	Gierwinkelfehler
E	$[-]$	Störmatrix
f	$[Hz]$	Frequenz
F_h, F_v	$[N]$	Reifenseitenkraft hinten/vorn
g	$[-]$	Gradientenmatrix
G	$[-]$	Anzahl der Generationen PSO
H	$[-]$	Hesse-Matrix
H_p	$[-]$	Prädiktionshorizont
H_u	$[-]$	Kontrollhorizont
I	$[-]$	Einheitsmatrix
i	$[-]$	Übersetzungsverhältnis
J	$[-]$	Gütefunktional
J_l	$[kg \cdot m^2]$	Lenkungsträgheit
J_z	$[kg \cdot m^2]$	Gierträgheitsmoment
k	$[-]$	Anzahl
k_{PT1}	$[-]$	Verstärkungsfaktor des PT1-Gliedes
$k_{PT1,\delta}$	$[-]$	Verstärkungsfaktor des PT1-Gliedes
K_p	$[-]$	Proportionale Verstärkung
l	$[m]$	Radstand
l_h, l_v	$[m]$	Abstand Schwerpunkt Hinter-/Vorderachse
$l(x, u)$	$[-]$	Integralkostenterm
L	$[m]$	Segmentlänge einer Klothoide
m	$[kg]$	Fahrzeugmasse
M_h	$[Nm]$	Fahrerhandmoment
M_l	$[Nm]$	Lenkmoment
M_r	$[Nm]$	Reglermoment
n	$[-]$	Anzahl

N	$[-]$	Anzahl der Partikel
q_0, q_1	$[m]$	Querabstand zur linken/ rechten Markierung
$Q_\psi, Q_y, Q_{\Delta\psi}, Q_\delta$	$[-]$	Gewichtungsfaktoren für Systemzustände
r_{xy}	$[-]$	Korrelationskoeffizient
R	$[-]$	Gewichtungsmatrix für Stellgrößen
R^2	$[-]$	Bestimmtheitsmaß
R^*	$[-]$	Bereinigtes Bestimmtheitsmaß
r	$[-]$	Solltrajektorie
S	$[-]$	Standardabweichung
t	$[s]$	Laufzeit
t_{sim}	$[s]$	Simulationszeit
Δt	$[s]$	PSD Vorausschau
Δu	$[-]$	Stellgrößenänderung
T_D	$[-]$	Vorhaltezeit
T_I	$[-]$	Nachstellzeit
T_{PT1}	$[-]$	Zeitkonstante des PT1-Gliedes
$T_{PT1,\delta}$	$[-]$	Zeitkonstante des PT1-Gliedes
T_S	$[s]$	Zykluszeit des MPC
$T_{sim,ges}$	$[s]$	Gesamtsimulationszeit
u	$[-]$	Stellgröße
\underline{u}	$[-]$	Unbeobachtbare Störgröße stochastischer Art
\underline{u}	$[-]$	Vektor der Stellgröße
u_0	$[-]$	Startwert der Stellgröße
v_h, v_v	$[m/s]$	Geschwindigkeit Hinterachse/Vorderachse
$v_{h,x}, v_{h,y}, v_{v,x}, v_{v,y}$	$[m/s]$	Hor./Ver. Komponenten d. Geschw.
v_{SP}, v_x, v_y	$[m/s]$	Geschwindigkeit des Schwerpunkts
V_x	$[-]$	Kostengewichtung
w	$[-]$	Führungsgröße
x	$[-]$	Zustandsgröße
x_k	$[-]$	Systemzustand zum Zeitpunkt t_k
$x_T^*(\tau, x_k)$	$[-]$	Prädizierter Zustand basierend auf x_k
\underline{x}	$[-]$	Zustandsvektor
$\dot{\underline{x}}$	$[-]$	Änderung des Zustandsvektors
\bar{x}	$[-]$	Mittelwert der Kennparameter
Δx	$[m]$	PSD Wegdifferenz
y	$[-]$	Ausgangsgröße
y	$[-]$	Regelgröße
$y(i)$	$[-]$	beobachtete Variablen
\bar{y}	$[-]$	Mittelwert der Subjektivnoten
Δy	$[m]$	Querablage
$\Delta y_l, \Delta y_r$	$[m]$	Seitenabstand links/rechts
\underline{y}	$[-]$	Vektor der Ausgangsgrößen
y, x	$[-]$	globales Koordinatensystem
y_F, x_F	$[-]$	Fahrzeugkoordinatensystem