

Sicherheitsfokussierte Adaption von Fahrdynamik und Fahrerassistenz

Bei der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Christoph Hildebrandt

aus: Mühlhausen / Thüringen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
Prof. Dr.-Phil. Mark Vollrath

2016

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 52

Christoph Hildebrandt

**Sicherheitsfokussierte Adaption
von Fahrdynamik und Fahrerassistenz**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5159-9

ISSN 1619-6325

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung „Grundentwurf softwarebasierte Funktionen Fahrdynamik“ der Fahrdynamik- und Fahrerassistenzentwicklung der BMW AG, welche für mich das ideale Umfeld zur Erstellung dieser Dissertation darstellte.

Meinen besonderen Dank möchte ich Prof. Dr. Ferit Küçükay, Direktor des Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig, für die Bereitschaft zur Betreuung meiner Arbeit aussprechen. Die Möglichkeiten zur selbstständigen Arbeit zusammen mit zahlreichen engagierten fachlichen Diskussionen und Impulsen haben maßgeblich zu dieser Dissertation beigetragen. Weiterhin bedanken möchte ich mich beim Direktor des Instituts für Ingenieurs- und Verkehrspsychologie, Prof. Dr. Mark Vollrath, für die Übernahme der Aufgabe des Koreferenten. Mein Dank gilt ebenfalls Prof. Dr. Jürgen Köhler für die Übernahme des Vorsitz der Prüfungskommission.

Weiterhin möchte ich an dieser Stelle dem Oberingenieur Dr. Roman Henze danken, der mich bei der Erstellung der Arbeit ebenfalls durch fachliche Impulse und viel Engagement unterstützte. Besonders hervorheben möchte ich auch Dr. Olivier Pion und Görkem Büyükyıldız, die mit viel persönlichem Einsatz den fachlichen Austausch und engen Kontakt zum Institut für Fahrzeugtechnik besonders angenehm gestalteten.

Ohne meinen fachlichen Betreuer und Mentor bei der BMW AG, Dr. Martin Sedlmayr, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Er investierte viel Zeit und Energie in die Betreuung der Arbeit und meiner Person und ich schätzte seine fachlich äußerst kompetente, ausnahmslos analytische, verbindliche sowie stets freundliche und angenehme Art sehr. Weiterhin hatte ich das Glück, die vorliegende Arbeit in einem sehr professionellen und hilfsbereiten Umfeld anfertigen zu dürfen. Zahlreiche Kollegen leisteten mit ihrer Unterstützung und dem hervorragenden Arbeitsklima im Team einen Beitrag zu dieser Arbeit. Weiterhin möchte ich hier noch den Kollegen danken, die im Rahmen von Abschlussarbeiten und Praktika zum Gelingen der Dissertation beitrugen.

Gesondert erwähnen möchte ich hier auch meine Freunde Tina Gaebler und Marian Schollmeyer, die meine Arbeit in Rekordzeit sprachlich korrigierten, ohne sich von grammatikalischen Besonderheiten abschrecken zu lassen.

Sehr dankbar bin ich für die Unterstützung meiner Freundin Julia Bernhardt. Du hast mir in genau den richtigen Momenten nicht nur den Fokus, sondern auch den Abstand zu dieser Arbeit ermöglicht. Ganz besonders möchte ich mich auch bei meinen Eltern Kathrin und Michael Hildebrandt bedanken. Ohne eure Unterstützung und Prägung wäre nicht nur die Dissertation, sondern mein gesamter beruflicher und auch persönlicher Werdegang undenkbar - danke.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	iii
1 Einleitung	1
1.1 Erlebbarer FAS und Fahrdynamik mit Serienstellhebeln	2
1.2 Integraler Ansatz für erlebbare Sicherheitsfunktionen	3
2 Interdisziplinäre Grundlagen	7
2.1 FAS als Grundlage situativer Adaptionen	7
2.1.1 Unfallforschung als Motivator von FAS	7
2.1.2 Betrachtung von FAS mit hohem Ausstattungsgrad in naher Zukunft .	14
2.1.3 Kurzvorstellung von FAS mit hohem Ausstattungsgrad in der Zukunft	15
2.2 Faktor Mensch bei der Unfallentstehung	19
2.2.1 Risikoverhalten	20
2.2.2 Rationale Verhaltens- und Entscheidungsmodelle	27
2.2.3 Die Rolle von Informationsfehlern im Unfallgeschehen	31
2.2.4 Zusammenfassung	35
2.3 Warnstrategien und Informationsdarbietung	36
2.3.1 Basisanforderungen an Informationselemente und Warnungen	36
2.3.2 Sinneskanäle zur Informationsvermittlung im Fahrzeug	37
2.3.3 Zusammenfassung	39
3 Auslegung und Entwicklung	41
3.1 Überblick entwickelter Funktionen	41
3.2 Kinästhetische Rückmeldung von Geschwindigkeitslimits	44
3.2.1 Anforderungen an aTSR	44
3.2.2 Umsetzung und Applikation von aTSR	46
3.3 Fahrstilanalyse	48
3.3.1 Generelle Ausprägung	48
3.3.2 Umsetzung und Applikation der FsA	50
3.4 Adaptive Forward Collision Warning	54

3.4.1	Ursprüngliche Ausprägung des betrachteten Auffahrwarners	54
3.4.2	Funktionale Umsetzung und Applikation	57
3.5	Untersteuerhilfe	58
3.5.1	Vorbetrachtungen von Rückmeldungsfunktionen bei Untersteuern	58
3.5.2	Anforderungen an die Untersteuerhilfe	60
3.5.3	Funktionale Umsetzung	61
4	Versuchsdesign und Validierungsmethodik	63
4.1	Applikation der kinästhetischen Geschwindigkeitsrückmeldung	63
4.1.1	Allgemeines Versuchsdesign	64
4.1.2	Auswertungsmethodik und -ziele	68
4.2	Wirksamkeit der kinästhetischen Geschwindigkeitsrückmeldung	71
4.2.1	Allgemeines Versuchsdesign	72
4.2.2	Auswahl der Kennparameter	73
4.2.3	Auswertungsmethodik und -ziele	74
4.3	Wirksamkeit der Fahrstilanalyse	76
4.3.1	Allgemeines Versuchsdesign	76
4.3.2	Auswahl der Kennparameter	78
4.3.3	Auswertungsmethodik und -ziele	80
4.4	Adaptive Forward Collision Warning	84
4.4.1	Allgemeines Versuchsdesign	84
4.4.2	Auswahl der Kennparameter	86
4.4.3	Auswertungsmethodik und -ziele	87
4.5	Untersteuerhilfe	88
4.5.1	Allgemeines Versuchsdesign	88
4.5.2	Auswahl der Kennparameter	90
4.5.3	Auswertungsmethodik und -ziele	92
5	Ergebnisse und Statistik der Validierung	95
5.1	Applikation der adaptive Traffic Sign Recognition	95
5.1.1	Wahrnehmungsleistung von Fahrern und Beifahrern	95
5.1.2	Zusammenfassung und Diskussion	99
5.2	Wirksamkeit der adaptive Traffic Sign Recognition	101
5.2.1	Statistische Betrachtungen	101
5.2.2	Zusammenfassung und Diskussion	105
5.3	Wirksamkeit der Fahrstilanalyse	106
5.3.1	Statistische Betrachtungen	106
5.3.2	Zusammenfassung und Diskussion	113

5.4	Adaptive Forward Collision Warning	115
5.4.1	Statistische Betrachtungen	115
5.4.2	Zusammenfassung und Diskussion	119
5.5	Untersteuerhilfe	121
5.5.1	Statistische Betrachtungen	121
5.5.2	Zusammenfassung und Diskussion	127
6	Zusammenfassung und Diskussion	131
6.1	Zusammenfassung der Aufgabenpakete und Ergebnisse	131
6.2	Diskussion und Abschluss	133
A	Fragebögenauszüge relevanter Fragestellungen	137
A.1	Fragebogenteil der Studie zur active Traffic Sign Recognition (aTSR)	138
A.2	Fragebogenteil der Studie zur Fahrstilanalyse (FsA)	139
A.3	Fragebogenteil der Studie zur adaptive Forward Collision Warning (aFCW)	140
A.4	Fragebogenteil der Studie zur Untersteuerhilfe (UnSH)	141
	Tabellenverzeichnis	143
	Abbildungsverzeichnis	144
	Literaturverzeichnis	149

Abkürzungen und Formelzeichen

Allgemeine Abkürzungen

ABS	Anti-Blockier-System
aFCW	adaptive Forward Collision Warning
aSSM	adaptive Simple Staircase Method
aTSR	active Traffic Sign Recognition
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BRZ	Bremsreaktionszeit
Destatis	Statistisches Bundesamt
DLC	Distance to line crossing
EKG	Elektrokardiogramm
EPS	Electric Power Steering
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
euroNCAP	European New Car Assessment Programme
FAS	Fahrer-Assistenz-Systeme
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
FCW	Forward Collision Warning
FsA	Fahrstilanalyse
FSI	Fahrstilidentifikator
GIDAS	German in Depth Accident Study
HRV	Herzratenvariabilität
IFH	Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig
ISA	Intelligent Speed Assist
JND	Just Noticable Difference
KP	Kennparameter
LCW	Lane Change Warning
LDW	Lane Departure Warning
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
RCP	Rapid Rontrol Prototyping

SSM	Simple Staircase Method
THW	Time Headway (Zeitlücke zum Vorderfahrzeug)
TLC	Time to line crossing
TSR	Traffic Sign Recognition
TTC	Time to collision
UDB	Unfalldatenbank der Versicherer
UDV	Unfallforschung der Versicherer
UnSH	Untersteuerhilfe

Indices

Δa	Beschleunigungsdifferenz
<i>Assist</i>	Assistenz (-funktion)
<i>AW</i>	Akutwarnung
<i>blink</i>	blinken / Blinkverhalten
<i>brems</i>	Bremse
<i>brz</i>	Bremsreaktionszeit
<i>calc</i>	Kalkulation / Berechnung
<i>ch</i>	charakteristische Größe bzw. Systemeigenschaft
<i>diff</i>	Differenz
<i>ego</i>	auf das Ego-Fahrzeug bezogen
<i>End</i>	Ende eines Ereignis / einer Berechnung
<i>Erw</i>	(durch den Fahrer) erwartet
<i>esm</i>	Einspurmodell
<i>Fa</i>	auf den Fahrer bezogen
<i>FP</i>	Fahrpedal
<i>FSI</i>	Fahrstilidentifikator
<i>Fz</i>	auf das Fahrzeug bezogen
<i>Fzg</i>	Fahrzeug
<i>ges</i>	gesamt
<i>H</i>	auf die Hand bezogen (Lenkung)
<i>k</i>	auf den aktuellen Zeit- oder Auswerteschritt bezogen
<i>L</i>	Lenkung
<i>legal</i>	gesetzlich zugelassen
<i>max</i>	Maximum oder Maximalwert
<i>min</i>	Minimum oder Mindestwert
<i>neg</i>	negativ

<i>neu</i>	neutral
<i>niedrig</i>	niedriger Bereich (der Geschwindigkeit oder Beschleunigung)
<i>nwg</i>	(durch den Fahrer) nicht wahrgenommen
<i>obj</i>	auf ein Objekt bzw. Konfliktobjekt bezogen
<i>Phase</i>	Phase oder Phasendifferenz
<i>pos</i>	positiv
<i>rel</i>	relativ (oft zwischen Konfliktobjekt und Ego-Fahrzeug)
<i>res</i>	resultierend
<i>Segment</i>	auf ein Segment bezogen
<i>Serie</i>	Bezug auf Serienumsetzung (ohne Adaption)
<i>Spurbg</i>	Spurbegrenzung
<i>Start</i>	Beginn eines Ereignis / einer Berechnung
<i>Stopp</i>	Ende eines Ereignis / einer Berechnung
<i>sys</i>	auf den Fahrer bezogen
<i>tol</i>	Toleranz
<i>va</i>	Vorderachse
<i>vx</i>	Geschwindigkeit oder Geschwindigkeitsverhalten
<i>wg</i>	(durch den Fahrer) wahrgenommen
<i>x</i>	x-Richtung bzw. Längsrichtung
<i>y</i>	y-Richtung bzw. Querrichtung
<i>Zusatz</i>	zusätzlich

Lateinische Formelzeichen

<i>a</i>	Beschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
<i>B</i>	subjektive Bewertung im Rahmen einer Probandenstudie	–
<i>b</i>	Bewertung durch die Fahrstilanalyse	–
<i>b</i>	Breite eines Bereiches verschiedener Größen	–
<i>D</i>	Verzögerung / Beschleunigung mit negativem Vorzeichen	$\frac{m}{s^2}$
<i>F</i>	Kraft	<i>N</i>
<i>FPR</i>	False Positive Rate - Anteil der positiv bestätigten Placeboeingriffe	–
<i>i</i>	Übersetzung	–
<i>M</i>	Moment	<i>Nm</i>
<i>n</i>	Anzahl	–
<i>n</i>	Nachlauf	<i>m</i>
<i>p</i>	Signifikanzwert	–
<i>R</i>	Detektionsrate / Recognition rate	–

r	Korrelationskoeffizient	—
RDT	Reliable Detektion Threshold	$\frac{m}{s^2}$
$RMSSD$	Root Mean Square of the Successive Differences	ms
s	Strecke	m
s_x	Standardabweichung einer Verteilung x	—
T	Zeitdauer	s
t	Zeit	s
THW	Time Headway (Zeitlücke zum Vorderfahrzeug)	s
V	Verstärkungsfaktor	—
v	Geschwindigkeit	$\frac{km}{h}$

Griechische Formelzeichen

α	Schräglaufwinkel	°
α	Signifikanzniveau	—
β	Fahrpedalwinkel	°
δ	Lenkradwinkel	°
μ	Reibkoeffizient	—
τ	Totzeit	s

Kurzfassung

Diese Dissertation behandelt die Adaption und Erweiterung bestehender Fahrerassistenzsysteme (FAS) auf Basis der in der Europäischen Union in Serie verfügbaren Sensorik und Aktorik. Durch die Verwendung etablierter Systeme können entwickelte Funktionsmehrerungen schnell eine hohe Marktdurchdringung erreichen, was den Effekt auf die Verkehrssicherheit verstärkt. Dies ist vorteilhaft gegenüber FAS-Einführung mit zusätzlichem Sensor- bzw. Aktorbedarf.

Die zentrale Methodik dieser Arbeit ist der „integrale Ansatz“: Innerhalb dieser Modellvorstellung unterstützen FAS und intelligente Fahrdynamikregelsysteme den Fahrer mittels zweier Wirkmechanismen. Zum einen wird durch situativ stärkere Unterstützung des Fahrers in Sondersituationen eine bessere Fahrerleistung innerhalb der betrachteten kritischen Situation erreicht. Zum anderen wird durch die entwickelten Funktionen eine zusätzliche Erlebbarkeit der FAS auch in unkritischen und alltäglichen Fahrsituationen mit dem Ziel der Stärkung einer defensiven Fahrweise verfolgt. Die Anzahl möglicher Adaptionsszenarien im 3F-Parameterraum (Fahrer, Fahrzeug, Fahrumgebung) bedingt eine Auswahl umzusetzender Funktionen.

Beide Mechanismen des Konzepts werden exemplarisch an je zwei konkreten Beispielen vorgestellt und die Wirksamkeit der entwickelten Funktionen überprüft. Zur Auswahl der umgesetzten Funktionen werden aktuelle Studien verschiedener Unfallstatistiken herangezogen. Die betrachteten Studien werden hinsichtlich der häufigsten Unfallursachen aufgrund menschlichen Fehlverhaltens analysiert, um das Potential der Adaption auf verschiedene Verkehrssituationen abzuschätzen. Die jeweils relevanten verkehrspsychologischen Modelle werden in den Kontext der betrachteten Situationen gesetzt und Anforderungen an die entwickelten Funktionen abgeleitet. Im Ergebnis wurden folgende Funktionen umgesetzt: eine haptische Rückmeldung von Übertretungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, eine sicherheitsfokussierte Fahrtilanalyse, die Adaption des Auffahrwarnsystems an Witterungsbedingungen und eine Erweiterung des Stabilitätsprogramms zur Deeskalation kritischer Untersteuersituationen.

Die Funktionen werden an verschiedenen Kennparametern (KP) ausgelegt und mit diesen im Anschluss in Probandenstudien auf Wirksamkeit geprüft. Die KP richten sich nach dem für die jeweilige Funktion zutreffenden Wirkprinzip und beschreiben daher Veränderungen des sicherheitsfokussierten Fahrstils oder der situativen Fahrerhandlung über Reaktionszeiten oder Amplitudenwerte innerhalb der betrachteten Situationen. Um neben der objektiven Wirksamkeit auch die Akzeptanz der entwickelten Funktionen zu beleuchten, wird die subjektive Bewertung ebenfalls erfasst. Innerhalb der Arbeit werden die Versuchsdesigns der fünf durchgeführten Studien mit einem Gesamtumfang von mehr als 300 Probanden bei einer Gesamtfahrleistung von über 47.000 km beleuchtet und die Ergebnisse analysiert. Dabei konnte im Rahmen der jeweiligen Versuchsbedingungen die objektive Wirkung der Funktionen auf die jeweiligen KP nachgewiesen werden. Die in kritischen Sondersituationen eingreifenden Funktionen wurden durchgängig subjektiv entweder nicht wahrgenommen oder positiv beurteilt, wohingegen die den Fahrstil betreffenden, erlebbaren Funktionen für einen kleinen Teil der Probanden konfigurierbar gestaltet werden müssen.

Abstract

This dissertation examines the adaptation and expansion of existing driver assistance systems (DAS) based upon the sensor and actuator technology available as standard in the European Union. By using established systems, increments in functionality that are developed can quickly achieve high market penetration, boosting the effect on road safety. This is of advantage vis-à-vis DAS that require supplementary sensors or actuators.

The core methodology followed by this paper is the 'integral approach'. Within this model, DAS and intelligent control systems for driving dynamics support the driver by means of two mechanisms of action. Firstly, improved driver performance is achieved within the critical situation examined by extending enhanced situational support to the driver in exceptional situations. And secondly the functions developed also permit perception of the DAS in non-critical and everyday driving situations, the aim being to reinforce a defensive driving style. The number of possible adaptation scenarios within the parameters of the '3D' formula (Driver, vehicle Driven, Driving environment) requires that the functions to be implemented are selected.

Both concept mechanisms are presented by way of citing two specific examples, and the effectiveness of the functions developed is examined. Current studies of various accident statistics are drawn upon to select the functions implemented. The studies examined are analysed in terms of the most frequent causes of accident arising from human error in order to evaluate the potential of the adaptation respective to various traffic situations. The traffic-specific psychological models respectively valid are considered in the context of the situations examined, and specifications are derived respective to the functions developed. Ultimately, the following functions were implemented: haptic feedback pertaining to instances of speeding, a safety-focused analysis of the driving style, the adaptation of the Forward Collision Warning system to weather conditions and an expansion of the stability range to de-escalate critical understeering situations. The functions are designed in accordance with various identifying parameters (IP) and are subsequently examined for effectiveness conjunct with these in the course of studies involving test subjects.

The IP are aligned with the operating principle appropriate to the respective function and therefore describe changes in the safety-focused driving style or the situational driver actions by way of response times or amplitude values within the situation examined. In order to examine the acceptance of the functions developed, over and above their objective effectiveness, subjective evaluation is also recorded. The paper examines the test designs of the five studies carried out, encompassing over 300 test subjects, with a total mileage of more than 47,000 km, and analyses the results. This permitted the objective effect of the functions on the respective IP was demonstrated within the parameters of the respective test conditions. The functions, which intervene when critical, exceptional situations arise, consistently either remained unperceived or were positively regarded, while the perceptible functions relating to driving style had to be designed to be configurable for a small portion of the test subjects.