

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Nr. 1249

Dipl.-Ing. Carlo Ackermann,
Kelkheim

Neue Ansätze für Fahrerassistenzsysteme mit Regelung der Längs- und Querdynamik

Berichte aus dem

Institut für
Automatisierungstechnik
und Mechatronik
der TU Darmstadt



Neue Ansätze für Fahrerassistenzsysteme mit Regelung der Längs- und Querdynamik

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Carlo Ackermann
geboren am 18. März 1985 in Kronberg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Rolf Isermann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Tag der Einreichung: 18. September 2015

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Januar 2016



D 17

Darmstädter Dissertationen

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Carlo Ackermann,
Kelkheim

Nr. 1249

Neue Ansätze für
Fahrerassistenzsysteme
mit Regelung der Längs-
und Querdynamik

Berichte aus dem

Institut für
Automatisierungstechnik
und Mechatronik
der TU Darmstadt



Ackermann, Carlo

Neue Ansätze für Fahrerassistenzsysteme mit Regelung der Längs- und Querdynamik

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 1249. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

156 Seiten, 98 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-18-524908-2, ISSN 0178-9546,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Fahrerassistenzsysteme – Kollisionsvermeidung – Unfallvermeidung – Notbremsen – Notausweichen – Stabilitätskontrolle – Modellbildung – Sensorik – Parameterschätzung – Zustandsschätzung

In dieser Arbeit werden Ansätze zur Unfallvermeidung vorgestellt, die Eingriffe in die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs nutzen. Betrachtet werden dabei Unfälle, die durch zu hohe Geschwindigkeit verursacht werden. Zum einen sind dies Auffahrunfälle und zum anderen zu schnelles Fahren in Kurven. In beiden Fällen werden hochdynamische Manöver zur Unfallvermeidung benötigt. Daher sind genaue Kenntnisse über das Fahrzeug und dessen Zustände nötig. Hierfür werden Parameter- und Zustandsschätzverfahren genutzt. Um Auffahrunfälle zu vermeiden, werden drei verschiedene Verfahren gezeigt, die Brems- oder Ausweichmanöver zur Kollisionsvermeidung nutzen. Für ein einzelnes Fahrzeug, welches mit unangepasster Geschwindigkeit in eine Kurve fährt, werden zwei Unfallvermeidungsstrategien gezeigt, welche das Fahrzeug durch geeignete längsdynamische Eingriffe in einen sicheren Fahrzustand zu überführen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 17

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-524908-2

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik und beschäftigt sich mit Fahrerassistenzsystemen zur Unfallvermeidung.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter der Forschungsgruppe Regelungstechnik und Prozessautomatisierung Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann, der mir die Möglichkeit zur Promotion gab. Seine Herangehensweise an wissenschaftliche Problemstellungen hat meine Arbeitsweise am Institut geprägt, und seine weitreichenden Kenntnisse, insbesondere im Bereich der Automobilindustrie, haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates und das Interesse an meiner Arbeit.

Maßgeblich zum Erfolg beigetragen hat auch das hervorragende Umfeld am Institut. Neben dem Fachgebietsleiter Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski möchte ich hier unsere Sekretärinnen Ilse Brauer, Brigitte Hoppe und Corina Fischer hervorheben, auf deren Engagement ich jederzeit zählen konnte und die mich in vielen Belangen unterstützt haben. Außerdem danke ich Alfred Gross für die Bereitstellung der IT-Infrastruktur und die Unterstützung bei technischen Fragen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Kollegen am Institut für den freundschaftlichen Austausch, die fachlichen Diskussionen und die gemeinsamen Instituts- und Konferenzreisen. Dadurch wurde das Institut mehr als nur ein Arbeitsplatz. Hervorheben möchte ich hier meine beiden Fahrdynamik-Kollegen Dr.-Ing. Markus Bauer und Jakob Bechtloff.

Danken möchte ich auch meiner Familie, die mich fortwährend in allen Belangen unterstützt hat. Ohne diese Unterstützung wäre diese Arbeit sicher nicht entstanden.

Ein weiterer Dank gilt meinen tollen Freunden, die für den nötigen Ausgleich während Studium und Promotion sorgten.

Schließlich möchte ich meiner Freundin für die Unterstützung, Motivation und Liebe danken.

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen	VIII
Kurzfassung	XI
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Stand der Technik	3
2.1 Kategorisierung von Fahrerassistenzsystemen	3
2.2 Assistenzsysteme zur Stabilisierung und Führung	4
2.2.1 Electronic Stability Control	4
2.2.2 Assistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung	5
3 Modellbildung	9
3.1 Koordinatensysteme	9
3.1.1 Definition der Koordinatensysteme	9
3.1.2 Rotatorische Bewegungsgrößen	10
3.1.3 Transformationen	11
3.2 Reifen	11
3.2.1 Grundlagen	12
3.2.2 Modellierung	13
3.3 Längskräfte	15
3.3.1 Luftwiderstand	16
3.3.2 Radwiderstand	17
3.3.3 Bremskraft	17
3.3.4 Antriebskraft	18
3.3.5 Steigungswiderstand	19
3.4 Zweispurmodell	20
3.5 Lineares Einspurmodell	22
3.6 Nichtlineares Einspurmodell	26
3.7 Wankmodell	27
3.8 Zusammenfassung	28
4 Sensorik	29
4.1 Seriensensorik	29
4.1.1 Beschleunigungssensoren	29
4.1.2 Drehratensensoren	29
4.1.3 Lenkradwinkelsensor	30
4.1.4 Drehzahlsensoren	30

4.1.5	Einfederungssensoren	30
4.2	Umgebungssensorik	30
4.2.1	Sensoraufbau	31
4.2.2	Einführung der Objekte	32
4.2.3	Objektklassifizierung	32
4.3	Zusätzliche Sensorik (Versuchsfahrzeug)	34
4.3.1	Correxit-Sensor	34
4.3.2	Inertiales Messsystem (IMU)	34
4.3.3	Drei-Antennen-GPS-System	34
4.4	Zusammenfassung	35
5	Parameterschätzung für längs- und querdynamische Modelle	36
5.1	Masseschätzung	36
5.1.1	Konzept	36
5.1.2	Ergebnisse	39
5.2	Schwerpunktschätzung	40
5.2.1	Position des Schwerpunktes in Längsrichtung	40
5.2.2	Höhe des Schwerpunktes	43
5.3	Schätzung Schräglaufsteifigkeiten	45
5.3.1	Direkte Schätzung der Schräglaufsteifigkeit	45
5.3.2	Indirekte Schätzung mit bezogener Schräglaufsteifigkeit	47
5.4	Zusammenfassung	48
6	Zustandsschätzung	50
6.1	Schätzung der Aufstandskräfte	50
6.1.1	Schätzung der Querlastverschiebung	51
6.1.2	Schätzung der Radlasten bei Längs- und Querbeschleunigung	52
6.1.3	Ergebnisse	54
6.2	Schätzung der Querkräfte und des Schwimmwinkels	54
6.2.1	Ergebnisse	58
6.3	Schätzung der Übergrundgeschwindigkeit	58
6.3.1	Ergebnisse	60
6.4	Schätzung des Reifenschlupfes	61
6.4.1	Längsschlupf	61
6.4.2	Querschlupf	62
6.5	Zusammenfassung	62
7	Unfallvermeidung bei Hindernissen	64
7.1	Automatisches Bremsen oder Ausweichen	64
7.1.1	Konzept	65
7.1.2	Bremsregelung	72
7.1.3	Trajektorienplanung	72
7.1.4	Querregelung	77

7.1.5	Ergebnisse	78
7.1.6	Fazit	82
7.2	Kombination aus Bremsen und Ausweichen	83
7.2.1	Querregelung	84
7.2.2	Existierende Methoden für die Längsregelung	85
7.2.3	Längsregelung über die Beschleunigung	86
7.2.4	Längsregelung über den Schlupf	88
7.2.5	Vergleich der beiden Verfahren	90
7.2.6	Vergleich für unterschiedliche Geschwindigkeiten	92
7.2.7	Fazit	93
7.3	Nur Bremsen mit der Möglichkeit zum Ausweichen durch den Fahrer	93
7.3.1	Konzept	93
7.3.2	Bremsregelung	96
7.3.3	Manövererkennung	99
7.3.4	Querregelung	101
7.3.5	Fazit	103
7.4	Zusammenfassung	104
8	Unfallvermeidung in Grenzsituationen	105
8.1	Kurveneinfahrunterstützung	105
8.1.1	Einführende Überlegungen	105
8.1.2	Bestimmung der Regelgröße	107
8.1.3	Reglerstruktur	107
8.1.4	Ergebnisse	109
8.2	Stabilitätskontrolle durch Umfeldsensoren	112
8.2.1	Herkömmliches ESC	112
8.2.2	ESC mit Umfeldsensoren	114
8.3	Zusammenfassung	120
9	Zusammenfassung und Ausblick	121
A	Methoden der Parameterschätzung	123
B	Grundlagen des Kalman-Filters	127
C	Identifizierung des Wankverhaltens	129
D	Ermittlung einer Federkennlinie	133
	Literaturverzeichnis	135

Symbole und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_X	m/s^2	Längsbeschleunigung
a_Y	m/s^2	Querschleunigung
b_Y	m/s^3	Querruck
b	m	Spurbreite
B	m	Fahrstreifenbreite
c	N/rad	Drehfedersteifigkeit
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
c_α	N/rad	Schräglaufsteifigkeit
d	Ns/m	Dämpfung
F_X	N	Längskraft
F_Y	N	Querkraft
F_Z	N	Vertikalkraft
F_D	N	Antriebskraft
F_B	N	Bremskraft
F_Λ	N	Luftwiderstand
F_R	N	Rollwiderstand
F_C	N	Steigungswiderstand
h	m	Höhe des Schwerpunktes
i_S	-	Lenkübersetzung
J_X	kgm^2	Trägheitsmoment um die Wankachse
J_Z	kgm^2	Trägheitsmoment um die Gierachse
k	N/m	Federsteifigkeit
k_R	-	Reibkraftkoeffizient
k_B	N/bar	Bremskraftkoeffizient
l	m	Radstand
m	kg	Masse
r_{dyn}	m	Dynamischer Rollradius
S_X	-	Längsschlupf
S_Y	-	Querschlupf
Δs	m	Einfederung
v	m/s	Geschwindigkeit
v_X	m/s	Längsgeschwindigkeit
v_Y	m/s	Quergeschwindigkeit

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	rad / -	Schräglaufwinkel / Gaspedalstellung
β	rad / -	Schwimmwinkel / Bremspedalstellung
δ_f	rad	Mittlerer vorderer Lenkwinkel
δ	rad	Lenkradwinkel
ϵ	rad	Steigung
η	rad	Neigung
θ	rad	Nickwinkel
$\dot{\theta}$	rad/s	Nickrate
κ	1/m	Krümmung
μ	-	Kraftschlussbeiwert
σ	m	Einlauflänge
φ	rad	Wankwinkel
ψ	rad	Gierwinkel
$\dot{\psi}$	rad/s	Gierrate
ω	rad/s	Radwinkelgeschwindigkeit

Indizes

Index	Bedeutung
B	Bremssystem
f	vorne
l	links
r	hinten bzw. rechts
T	Reifenfestes Achsensystem
X	Längsrichtung
Y	Querrichtung
Z	Vertikalrichtung

Matrizen

Symbol	Bedeutung
A	Modellmatrix
H	Ausgangsmatrix
P	Kovarianzmatrix
Q	Modellunsicherheit
R	Messunsicherheit

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
FAS	Fahrerassistenzsystem
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ASR	Antischlupfregelung
ESC	Electronic Stability Control
LDW	Lane-Departure-Warning
LKS	Lane-Keeping-Support
LKW	Lastkraftwagen
LPB	Letztmöglicher Bremszeitpunkt (<i>Last Point to Brake</i>)
LPS	Letztmöglicher Ausweichzeitpunkt (<i>Last Point to Steer</i>)
PKW	Personenkraftwagen
TTB	Zeit bis zum LPB (<i>Time to Brake</i>)
TTC	Zeit bis zur Kollision (<i>Time to Collision</i>)
TTS	Zeit bis zum LPS (<i>Time to Steer</i>)

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Ansätze zur Unfallvermeidung vorgestellt, die Eingriffe in die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs nutzen. Betrachtet werden dabei Unfälle, die durch zu hohe Geschwindigkeit verursacht werden. Zum einen sind dies Auffahrunfälle und zum anderen zu schnelles Fahren in Kurven. In beiden Fällen werden hochdynamische Manöver in Längs- und Querrichtung zur Unfallvermeidung benötigt.

Durch die hohe Dynamik der Eingriffe sind genaue Kenntnisse über das Fahrzeug und dessen Zustände nötig. Daher werden verschiedene Fahrzeug- und Reifenmodelle vorgestellt und mit Parameter- und Zustandsschätzverfahren kombiniert, um detailliert Informationen über den aktuellen Fahrzustand zu erhalten. Ebenfalls eingegangen wird auf die benötigte Sensorik, welche die Eingangsdaten für die Schätzverfahren liefert. Neben der Seriensensorik wird eine Umfeldsensorik bestehend aus Kamera und Radar vorausgesetzt.

Um Auffahrunfälle, verursacht z.B. durch plötzlich auftauchende Hindernisse oder Fahren mit zu geringem Abstand zu vermeiden, werden drei verschiedene Verfahren gezeigt. Im ersten Verfahren wird entweder ein Brems- oder Ausweichmanöver zur Kollisionsvermeidung genutzt. Die Entscheidung wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit von eigenem, vorausfahrendem und umliegenden Fahrzeugen getroffen. In einem zweiten Schritt wird das Verfahren erweitert und ermöglicht einen kombinierten Ausweich- und Bremseneingriff. Damit ist es möglich, die Kollision zu einem noch späteren Zeitpunkt zu vermeiden. Da ein automatisches Ausweichmanöver problematisch im Hinblick auf seitlich fahrende Fahrzeuge ist, wird in einem dritten Ansatz gezeigt, wie die Kollision durch einen reinen Bremseneingriff vermieden werden kann, wobei dem Fahrer jederzeit die Möglichkeit gegeben ist, selbst durch ein Ausweichen zu reagieren.

Für ein einzelnes Fahrzeug, welches mit unangepasster Geschwindigkeit in eine Kurve fährt, werden zwei Unfallvermeidungsstrategien gezeigt. Zunächst wird versucht, die Geschwindigkeit bereits vor der Kurve anzupassen. Ist der Straßenverlauf bekannt, lässt sich eine Grenzgeschwindigkeit bestimmen, mit der die Kurve noch fahrbar ist, ohne ein instabiles Fahrverhalten zu provozieren. Mit einem geeigneten Bremseneingriff kann die Eigengeschwindigkeit so angepasst werden, dass sie zu Beginn der Kurve der Grenzgeschwindigkeit entspricht. Ist bereits ein instabiles Fahrverhalten entstanden, hat die Rückerlangung der Stabilität höchste Priorität. Unter Einbeziehung der Umfeldsensorik werden radindividuelle Bremsungen genutzt, um dem Fahrzeug eine zusätzliche Gierate aufzuprägen und in einen stabilen Zustand zu überführen. Dieses Verfahren erweitert das bereits weit verbreitete ESC, ermöglicht jedoch gezieltere Eingriffe.

