

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Christopher Kober

Stochastische Verkehrsfluss-
simulation auf Basis von
Fahrerverhaltensmodellen
zur Absicherung
automatisierter
Fahrfunktionen



Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

Christopher Kober

Stochastische
Verkehrsflusssimulation
auf Basis von
Fahrerverhaltensmodellen
zur Absicherung
automatisierter
Fahrfunktionen

 Springer Vieweg

Christopher Kober
Lehrstuhl für Kraftfahrzeugmechatronik
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2018

D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-25250-2 ISBN 978-3-658-25251-9 (eBook)
<http://doi.org/10.1007/978-3-658-25251-9>

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

Springer Vieweg

© 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 Vieweg 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 Zeit als Doktorand im Fahr-simulator der Daimler AG in Sindelfingen. Mein Dank gilt meinem Doktorva-ter Prof. Reuss, durch dessen freundliche Art ich mich als Doktorand immer wertgeschätzt gefühlt habe. Ebenso möchte ich mich bei meinem Zweitberichter Prof. Friedrich bedanken, der mich in der Domäne der Verkehrsforschung fachlich begleitet hat.

Mein besonderer Dank gilt der gesamten Abteilung des Fahr-simulators der Daimler AG in Sindelfingen und dem Team Simulationssoftware im speziellen. Es war mir jeden Tag eine Freude, in diesem Umfeld arbeiten zu dürfen. Besonders hervorzuheben sind dabei mein Abteilungsleiter Dr. Hans-Peter Schöner, der mein Thema immer mit Begeisterung verfolgt hat, wichtige Impulse beitragen konnte und mir eine sehr umfangreiche Rückmeldung zur Ausarbeitung gegeben hat, und mein Teamleiter Hans Grezlikowski, durch dessen lange Erfahrung in der Welt der Fahr-simulation die Schwerpunkte meiner Arbeit sinnvoll gesetzt werden konnten. Ein spezieller Dank geht an meinen Kollegen Jupp Tscheak, dessen Hingabe für die Tätigkeit und dessen außerordentliche Entwurfs- und Programmierfähigkeiten die Umsetzung meiner Arbeit in dieser Qualität erst ermöglicht haben.

Zur erfolgreichen Durchführung der Fahr-simulatorstudien möchte ich mich bei Stephanie Preuß und Andrea Vogt sowie bei Martin Kehrer und Jürgen Pitz als Repräsentanten des FKFS-Teams bedanken. Auch die beiden Studenten Fabian Dablander und Julia Schöller haben zu dieser Arbeit wichtige Beiträge geliefert, wodurch ihnen mein Dank gebührt.

An diesem Punkt meiner akademischen Ausbildung möchte ich auch meinen Eltern Danke sagen und meiner Frau, deren Einsatz für unsere junge Familie mir jederzeit die notwendige Unterstützung lieferte.

Christopher Kober

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVII
Zusammenfassung.....	XIX
Abstract	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Anforderungen an die Simulation	2
2 Stand der Technik	5
2.1 Fahrermodellierung.....	5
2.2 Verkehrsflussmodelle	8
2.2.1 Vissim	10
2.2.2 SUMO	11
2.2.3 PELOPS	13
2.2.4 Yuhara & Tajima	13
2.2.5 Vires Virtual Test Drive.....	14
2.2.6 Weitere Simulationen.....	16
2.2.7 Kalibrierung von Verkehrssimulationen	17
2.3 Absicherung.....	19
2.4 Fahrerverhaltensmodellierung für Verkehrsteilnehmer	20
2.5 Simulation am Daimler-Fahrsimulator	23

3	Fahrerverhaltensmodell.....	27
3.1	Fahrerverhaltensframework	27
3.2	Fahrertyp	29
3.2.1	Literatur.....	29
3.2.2	Fahrertypisierung nach Hebenstreit	31
3.2.3	Typisierung in der Simulation.....	35
3.3	Strategie	37
3.3.1	Fahrzeugfolgemodell	38
3.3.2	Fahrstreifenwechselmodell	43
3.3.3	Rechtsüberholen.....	47
3.3.4	Geschwindigkeitsbeschränkungen	49
3.3.5	Weitere Funktionen.....	50
3.4	Fahrzeugführung.....	53
3.4.1	Fahrdynamikmodellierung	53
3.4.2	Spurhaltung.....	55
3.4.3	Fahrstreifenwechsel	58
3.5	Verkehrsregeln.....	60
3.6	Emotion.....	60
3.6.1	Angst.....	62
3.6.2	Wut.....	65
3.6.3	Lkw-Überholverhalten	66
3.7	Ablenkung.....	68
3.8	Extraktion von Parameterräumen.....	69
3.8.1	Wunschgeschwindigkeit	71
3.8.2	Folgeabstand	73
3.8.3	Fahrstreifenwechseldauer.....	75
3.8.4	Komfortable Beschleunigung.....	77

3.8.5	Komfortable Verzögerung	78
3.8.6	Spurhaltung	79
4	Verkehrsgenerierung	81
4.1	Fahrerparameter-Generator	82
4.1.1	Bestimmung der normierten Parametergruppenwerte.....	82
4.1.2	Bestimmung der Parameter	83
4.1.3	Beispiel	88
4.1.4	Lkw-Fahrer	90
4.2	Fahrer-Fahrzeug-Kombination	94
4.3	Konzept des dynamischen Streckenverkehrs	98
4.3.1	Fahrer-Fahrzeug-Erstellung	99
4.3.2	Aufsetzen der Fahrzeuge.....	101
4.3.3	Blocker-Fahrzeuge	105
5	Kalibrierung und Validierung	109
5.1	Vergleiche mit makroskopischen Daten	109
5.1.1	Geschwindigkeit.....	112
5.1.2	Fahrzeugverteilung.....	113
5.1.3	Lkw-Verteilung.....	114
5.1.4	Richtungsfahrbahnen mit zwei Fahrstreifen	115
5.2	Fundamentaldiagramm	117
5.3	Fahrerklassifizierung über maschinelles Lernen.....	119
5.4	Fahrsimulatorstudien.....	122
5.4.1	Versuchsaufbau.....	123
5.4.2	Quantitative Untersuchung.....	124
5.4.3	Qualitative Untersuchung	131

5.4.4	Visuelle Kalibrierung.....	135
5.5	Ergebnisse der Validierung.....	135
6	Diskussion und Ausblick.....	137
6.1	Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodell.....	137
6.1.1	Dynamisches Abstandsverhalten	137
6.1.2	Fahrerverhalten an Autobahnauffahrten.....	139
6.1.3	Maschinelles Lernen	143
6.2	Kalibrierung anhand makroskopischer Daten.....	143
6.3	Fehler und kritische Situationen	145
6.4	Stausituationen.....	146
6.5	Übertrag auf andere Verkehrsräume	147
6.5.1	Landstraßenverkehr.....	147
6.5.2	Innenstadtverkehr.....	148
6.5.3	Übertrag auf internationale Verkehrsräume	150
7	Fazit	151
	Literaturverzeichnis	153

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Fahraufgabe Dreieck	5
Abbildung 2.2:	Übersicht Verkehrssimulationsmodelle [32].....	9
Abbildung 2.3:	Schematische Darstellung der vier Grundblöcke von Vissim [35]	10
Abbildung 2.4:	Graphische Oberfläche von SUMO	12
Abbildung 2.5:	PELOPS-Struktur [12]	13
Abbildung 2.6:	Fahrzeugübergabe in der multi-resolution-simulation [32].....	16
Abbildung 2.7:	Geschwindigkeits-Dichte Relation von simulierten und Realdaten [54].....	18
Abbildung 2.8:	Absicherungsprozess des Pegasus-Projektes [56].....	19
Abbildung 2.9:	Daimler-Fahrsimulator [67]	24
Abbildung 2.10:	Beispiel zum Ablauf der Simulation	26
Abbildung 3.1:	Fahrerverhaltens-Framework	28
Abbildung 3.2:	Kreuzungsverhalten verschiedener Fahrergruppen [68].....	30
Abbildung 3.3:	Fahrertypen und deren Beschreibung [71].....	31
Abbildung 3.4:	Wahrnehmungsmodell nach Wiedemann [76].....	39
Abbildung 3.5:	Betrachtete Fahrzeuge beim Fahrstreifenwechsel nach links [40].....	43
Abbildung 3.6:	Wunschbeschleunigungen beim Rechtsüberholen	48
Abbildung 3.7:	Schematische Darstellung der Punkt-Schiene- Dynamik.....	54
Abbildung 3.8:	Schaubild zur Spurhaltung aus Daimler Fahrdaten.....	56
Abbildung 3.9:	Spurhaltefunktion eines ruhigen Fahrers	58

Abbildung 3.10:	Nachbildung eines Fahrstreifenwechsels mit der Sinoidenfunktion.....	59
Abbildung 3.11:	Entwicklung der Angst und deren Auslöser in einer Auffahrsituation	64
Abbildung 3.12:	Extraktion der Wunschgeschwindigkeit aus Fahrdaten [96].....	72
Abbildung 3.13:	Histogramm der freien Wunschgeschwindigkeit	73
Abbildung 3.14:	Histogramme des Folgeabstands.....	74
Abbildung 3.15:	Zeitliche Häufigkeit der Folgeabstände [97].....	75
Abbildung 3.16:	Definition eines Fahrstreifenwechsels innerhalb der Fahrdaten	76
Abbildung 3.17:	Verteilung der Fahrstreifenwechseldauer	77
Abbildung 3.18:	Verteilung der komfortablen Längsbeschleunigung und -verzögerung	79
Abbildung 3.19:	Beispielhafte Extraktion von Spurhalteparametern.....	80
Abbildung 4.1:	Schematischer Ablauf der Verkehrsgenerierung.....	81
Abbildung 4.2:	Vergleich Messdaten – Inverse Verteilungsfunktion bei freier Wunschgeschwindigkeit [96]	84
Abbildung 4.3:	Lineare Zuordnungsfunktion der Höflichkeit	86
Abbildung 4.4:	Verteilung der Fahrstreifenwechseldauer von Lkw [99].....	91
Abbildung 4.5:	Schematische Darstellung des Aufsetzprozesses [96] .	101
Abbildung 4.6:	Aufsetzalgorithmus	103
Abbildung 4.7:	Geschwindigkeits-Dichte-Diagramm gemessen (links) [29] und modelliert (rechts).....	107
Abbildung 5.1:	Fluss-Dichte-Diagramm simuliert (links) und aus Messungen (rechts) [29].....	118
Abbildung 5.2:	Geschwindigkeit und Zeit pro Fahrstreifen für sechs Fahrertypen [104].....	120

Abbildung 5.3:	Ähnlichkeit der Fahrertypen aus „multidimensional scaling“ Verfahren [104].....	121
Abbildung 5.4:	Auffahrsituation in der ersten Studie	125
Abbildung 5.5:	Fahrstreifenwechselsituation in der zweiten Studie	126
Abbildung 5.6:	Überholsituation in der zweiten Studie	127
Abbildung 5.7:	Ergebnisse der quantitativen Untersuchung der ersten (links [104]) und zweiten Studie (rechts)	128
Abbildung 5.8:	Begründung der Entscheidung Computer vs. Mensch der zweiten Studie	129
Abbildung 5.9:	Realismusbewertung der zweiten Studie	130
Abbildung 5.10:	Von Probanden genannte Attribute der Verkehrssituationen der ersten (oben [104]) und zweiten Studie (unten)	132
Abbildung 6.1:	Konzept zum Fahrerverhalten an Autobahnauffahrten [116].....	140
Abbildung 6.2:	Lückenwahl beim Auffahrvorgang [116].....	140
Abbildung 6.3:	Ergebnisse der Auffahrttests [116].....	142
Abbildung 6.4:	Mögliche kritische Fahrstreifenwechselsituation.....	145
Abbildung 6.5:	Schematische Darstellung der Aufsetz- und Abflussbereiche bei Innenstadtverkehr [124]	148

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Kategorisierung der Fahrermodelle nach [3]	6
Tabelle 2.2:	Motivation für Fahrstreifenwechsel chinesischer Autofahrer [58]	21
Tabelle 3.1:	Alter und Geschlecht der beobachteten Fahrer [73].....	32
Tabelle 3.2:	Objektive Fahrdaten der einzelnen Gruppen [73].....	35
Tabelle 3.3:	Ausprägung der Parametergruppen nach Fahrertypen	37
Tabelle 3.4:	Ausgewertete KNFE Fahrer	70
Tabelle 4.1:	Verteilungen aller Parameter	87
Tabelle 4.2:	Parametergruppenwerte eines sportlichen Fahrers.....	88
Tabelle 4.3:	Parameterwerte eines sportlichen Fahrers.....	89
Tabelle 4.4:	Lkw-Geschwindigkeiten auf zweistreifigen Autobahnen [100]	92
Tabelle 4.5:	Parameterverteilung für den Lkw-Fahrer.....	93
Tabelle 4.6:	Fahrertyp – Fahrzeugklassen Matrix.....	95
Tabelle 4.7:	Anteile der Fahrer-Fahrzeug Kombinationen am Gesamtverkehr	97
Tabelle 4.8:	Dichte und Blocker-Fahrzeug Einsatz	106
Tabelle 5.1:	Vergleich simulierter und gemessener Verkehrsdaten auf dreistreifigen Fahrbahnen (MW=Mittelwert)	111
Tabelle 5.2:	Vergleich simulierter und gemessener Verkehrsdaten auf zweistreifigen Fahrbahnen.....	115
Tabelle 5.3:	Probandenalter und Geschlecht.....	124

Abkürzungsverzeichnis

ACT-R	Adaptive Control of Thought-Rational
AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulation for Urban Networks
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CNN	Convolutional Neural Network
DCAITI	Daimler Center for Automotive Information Technology Innovations
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
HiL	Hardware-in-the-Loop
IDM	Intelligent Driver Model
Iterate	IT for Error Remediation And Trapping Emergencies
KNFE	Kundennahe Fahrerprobung
MOBIL	Minimizing Overall Braking Induced by Lane-Changes
Pegasus	Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen
PELOPS	Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung
SAE	Society of Automotive Engineers
SANTOS	Situations-angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung

SUMO	Simulation of Urban Mobility
TTC	Time to Collision
VDCOR	Virtual Driving Core
VTD	Virtual Test Drive

Zusammenfassung

Ziel der hier präsentierten Arbeit ist es, eine Verkehrsflusssimulation zu konzipieren und zu implementieren, die den deutschen Autobahnverkehr aus Sicht eines teilnehmenden Fahrzeugs realistisch abbildet. Die Simulation soll anschließend als neue Methode eingesetzt werden, um Absicherungs- und Reifegraduntersuchungen zu automatisierten Fahrfunktionen und Fahrerassistenzsystemen durchführen zu können.

Die Arbeit ist in drei Kernaspekte unterteilt. Der erste behandelt die Modellierung der Fahrer in der Verkehrsflusssimulation. Da die automatisierten Fahrfunktionen mit Umfeld-Sensoren arbeiten, die ebenfalls Teil eines Testlaufes sein können, muss die Translation der Fahrzeuge im Umfeld des beobachteten Fahrzeugs, und damit das Verhalten der Fahrer, exakt und realistisch ausgestaltet werden. Dazu wurde ein modulares Fahrerverhaltensmodell entwickelt, in dem die verschiedenen Funktionen eines menschlichen Fahrzeuglenkers nachgebildet werden. Das Fahrerverhaltensmodell nutzt erweiterte Modelle aus der Literatur zur Folgefahrt und zum Fahrstreifenwechsel, aber auch Neuentwicklungen, wie das Emotions- und das Fahrzeugführungsmodul. Die Parameterräume des Fahrerverhaltensmodells wurden für die, aus der Literatur entnommenen, Fahrerarten in statistischen Untersuchungen aus realen Fahrdaten extrahiert. Ein neu entwickelter Algorithmus ermöglicht es anschließend, die für eine zu simulierende Verkehrsszene benötigten unterschiedlichen Fahrer mit fahrertypabhängigen, stochastischen Parametersätzen zu erstellen. Zusätzlich wurde eine Methode zur Zuordnung von Fahrzeugen vorgestellt, die sowohl die Korrelationen des Fahrerartyps, als auch die statistischen Auftretenswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Die Generierung von Verkehrsfluss aus den einzelnen Fahrern ist der zweite Kernaspekt der Arbeit. Dazu wurde das Konzept des dynamischen Streckenverkehrs vorgestellt und umgesetzt. Dabei werden die Generierung beziehungsweise das Verschwinden von Fahrzeugen an einer vorderen und einer hinteren Grenze des Betrachtungsraumes der Simulation über komplexe Algorithmen modelliert, wodurch eine „Blase“ mit realistischem Verkehrsfluss um ein beobachtetes Fahrzeug herum entsteht.

Der dritte Kernaspekt behandelt die Kalibrierung und Validierung des Modells. Über die Daten von Autobahnzählstellen ließen sich Modellparameter zur Fahrstreifenverteilung von Pkw und Lkw kalibrieren. Gleichzeitig konnte damit das makroskopische Verhalten der Simulation validiert werden. Zur Validierung des individuellen Fahrerverhaltens und zur visuellen Überprüfung von Parametern wurden zwei Fahrsimulatorstudien durchgeführt. Die Probandenstudien ergaben eine realistische Bewertung der Simulation, wobei sich insbesondere die Vorteile einer fahrertypabhängigen Modellierung bestätigten.

Ein allgemeines Defizit der Simulation besteht noch in einer zu vorsichtigen Fahrweise, bedingt durch das defensive Folge- und Fahrstreifenwechselmodell, sowie in seltenen unrealistischen Verhaltensweisen. Beide Probleme können jedoch durch weitere dynamische Adaption von Fahrerparametern behandelt werden; Konzepte dazu werden aufgezeigt. Zusammengefasst kann mit der Simulation ein realistisch wirkender, stochastisch korrekter deutscher Autobahnverkehr generiert und für unterschiedliche Verkehrsdichten parametrisiert werden. Die vorliegende Arbeit kann als Grundlage dienen für eine Übertragung der Simulation auf Verkehrsräume in der Innenstadt und im internationalen Kontext, sowie für eine Erweiterung hin zur gezielten Erzeugung kritischer Verkehrssituationen.