

Daniel Heinrich

Modellierung des Fahrerverhaltens zur Ermittlung von Bauteilbelastungen im Fahrzeugantriebsstrang

Modelling the driver's behavior to investigate the dynamic loads in the drivetrain.

Band 92

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Forschungsberichte



Daniel Heinrich

Modellierung des Fahrerverhaltens zur Ermittlung von Bauteilbelastungen im Fahrzeugantriebsstrang

Modelling the driver's behavior to investigate the dynamic loads on the drivetrain

Band 92

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ■ Institut für Produktentwicklung, 2016
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Modellierung des Fahrerverhaltens zur Ermittlung von Bauteilbelastungen im Fahrzeugantriebsstrang

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Daniel Heinrich
aus Kirchheim unter Teck

Tag der mündlichen Prüfung: 1. Februar 2016
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. B. Deml

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe¹ am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie und Monitoring von Lager- und Funktionsreibsystemen, die NVH mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und am Gesamtfahrzeug, die Mikrosystemtechnik mit dem Fokus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

¹ Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 92

In den letzten zwei Dekaden haben sich die Märkte, sowohl für Konsumgüter als auch für Investitionsgüter, sehr stark hin zu Käufermärkten verändert. Überall herrscht ein globaler Wettbewerb. Produkte zur Erfüllung von Kundenanforderungen sind im Überfluss am Markt vorhanden. Daraus leitet sich ein zunehmender Zwang zu stetiger Innovation ab. Produkte müssen permanent durch die Produktentwicklung weiterentwickelt und mit neuen Funktionalitäten versehen werden, um am Markt attraktiv zu bleiben. Ganz besonders gilt dies für den großen Bereich der Fahrzeugindustrie. Sowohl die Fahrzeughersteller als auch deren Zulieferer unterliegen einem ständigen Zwang zur Innovation. Charakteristische Merkmale in diesem Zusammenhang sind

- eine Steigerung der Leistungsdichte,
- eine Erhöhung der Funktionalität,
- die Integration von neuen Technologien unter dem Stichwort Mechatronisierung und Automatisierung sowie
- der Leichtbau als Mittel zur effizienteren Darstellung von Mobilitätsleistungen.

In diesem Kontext kommt natürlich auch der CO₂ Problematik, und damit den gesetzlichen Einflüssen, eine besondere Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund haben die Fahrzeughersteller eine Vielfalt neuer Antriebslösungen entwickelt. Die Herausforderung ist es nun, diese – unter den Randbedingungen der Komplexität, der Effizienz und Sicherheit – gezielt zu entwickeln. Dazu sind neue Methoden und Ansätze notwendig. Hierbei kommt insbesondere der Integration von Simulationsmethoden und deren Modellen mit der Entwicklung auf Basis physischer Teilsysteme und Komponenten eine besondere Bedeutung zu.

Im Konzept der Produktgenerationsentwicklung **PGE** nach ALBERS, welches die Produkte als Abfolge von immer sich erneuernden Produktgenerationen beschreibt, ergeben sich neue Möglichkeiten durch eine strukturierte Nutzung von Vorwissen aus vorhergehenden Produktgenerationen durch entsprechende Methoden. An diesem Methodensatz forscht die Gruppe um Albers seit mehr als zwei Jahrzehnten. Neue Ansätze zum Umgang mit Komplexität und Kompliziertheit werden entwickelt. Ein sehr wichtiges Element in dieser sog. „Karlsruher Schule“ ist der „IPEK-X-in-the-Loop“-Ansatz, bei dem eine Verschmelzung von physischer und virtueller Entwicklung und Validierung erfolgt. Für die Fahrzeugentwicklung bedeutet dies, dass mit diesen neuen Ansätzen insbesondere auch die Teilsysteme des Fahrzeuges im Kontext des Gesamtsystems Fahrzeug sowie des interagierenden Umgebungssystems Verkehr und Fahrer entwickelt werden können. Nur so kann

eine zuverlässige Entwicklung der immer komplexer werdenden Fahrzeuglösungen – ein Stichwort ist hier autonomes Fahren und dessen Absicherung - zukünftig überhaupt noch realisiert werden. Das IPEK-X-in-the-Loop-Konzept liefert hierfür durch eine konsequente Verknüpfung von virtuellen Modellen und physischen Modellen (Prototypsystemen) auch in Echtzeitlösungen das notwendige methodische Rüstzeug. Dabei kommt einem validen, aber auch effektivem Fahrermodell eine hohe Bedeutung zu. Das Fahrermodell wird im IPEK-X-in-the-Loop-Konzept integriert, um realistische Benutzungsprofile für die Fahrzeuge, sowohl auf simulativer als auch auf der gemischt simulativ-physischen Ebene zu realisieren. Fahrermodelle sind Gegenstand der Forschung seit vielen Jahren. Erste vereinfachte Fahrermodelle wurden auch am IPEK entwickelt und werden genutzt. Hier neue Ergänzungen zu schaffen und eine Methodik zu definieren, mit der Fahrermodelle gezielt und maßgeschneidert entwickelt werden können, ist eine Herausforderung, der sich Herr Dr.-Ing. Daniel Heinrich in seiner Dissertation stellt und die er überzeugend löst. Die Arbeit liefert einen wichtigen Beitrag zum „IPEK-X-in-the-loop-Konzept“ und zu neuen Ansätzen für eine moderne Fahrzeugentwicklung in der Praxis.

Februar, 2016

Albert Albers

Kurzfassung

Das Verhalten des Fahrers hat einen großen Einfluss auf die Belastung der einzelnen Fahrzeugkomponenten. Dabei ist dem Fahrer dieser Einfluss meist nicht bewusst - ein besonders "schonend" anfahrender Fahrer weist beispielsweise eine lange Schleifphase der Kupplung auf und erzeugt so einen deutlich höheren Verschleiß als ein eher ruppig anfahrender Fahrer. Um diese Effekte abzubilden, bietet sich der Aufbau von Fahrermodellen an. Über diese können die Wechselwirkungen zwischen Fahrerverhalten und Bauteilbelastung schon zu einem frühen Zeitpunkt in der Produktentwicklung berücksichtigt werden.

Die vorliegende Arbeit erarbeitet Ansätze zur Modellierung des Fahrers, um durch geeignet aufgebaute Fahrermodelle eine Modellierung des menschlichen Verhaltens in Wechselwirkung mit dem technischen System zu erreichen. Als Kern der Arbeit werden mehrere methodische Werkzeuge entwickelt und vorgestellt, die den Aufbau von Fahrermodellen ermöglichen und unterstützen. Diese Methoden bestehen aus:

- Der Trennung zwischen Gesamtfahrt und einzelnen Manövern
- Aufteilung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung
- Beschreibung der Handlungsausführung als Simulationsmodell unter Berücksichtigung verschiedener möglicher Modelltypen

Zur Validierung dieser Werkzeuge werden Daten zum Fahrerverhalten benötigt. Hierzu wird eine umfangreiche Studie zum Fahrerverhalten mit ca. 35.000 km erfasster Fahrtstrecke für insgesamt 34 Fahrer durchgeführt und vorgestellt. Auf Basis der vorliegenden Messdaten werden verschiedene Werkzeuge zur Klassierung und Bewertung des Fahrstils und der vorliegenden Fahrtdaten erarbeitet. Eine weitergehende Analyse des Fahrerverhaltens im Hinblick auf die Belastung einzelner Komponenten des Fahrzeugantriebsstrangs erfolgt durch den exemplarischen Aufbau von Fahrermodellen mit der entwickelten Methodik und die Implementierung der entwickelten Modelle in Mehrkörpersimulationsumgebungen, so dass diese im Rahmen der Produktentwicklung genutzt werden können.

Abstract

The driver's behavior in a vehicle has a high influence on the loads and wear of the drivetrain's components. Often the driver is not aware of this influence: A very "soft" launch of the vehicle for example leads to a large amount of slipping in the clutch and thus causes higher clutch wear than a driver with a rapid launch behavior does. To model these effects, driver models may be used. They allow the consideration of interactions between the driver's behavior and the drivetrain component's loads at early stages of product development.

The solution presented in this thesis offers an approach to modeling the driver. These driver models can be used to understand and predict human behavior in interaction of the vehicle's parameters. This solution consists of several tools as a method to support the creation of driver models:

- Separation of the overall task driving into separate maneuvers
- Separating the driver behavior into a function of the driver's goals and an action model
- Creating the action model from a set of different model types

To build driver models, data on real drivers is required. A study with 35 000 km of recorded driving for overall 34 drivers is presented. Based on this data, different tools for evaluating and classifying the driver's behavior are developed. A further analysis of the driver's behavior regarding the loads and wear of drivetrain components is performed by using the developed method to build individual driver models. Subsequently, the driver models developed are integrated into multi-body simulation tools in a way suited for the requirements of product-development related tasks.

Danksagung

Diese Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeit bei der Firma LuK GmbH & Co. KG in Bühl im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit dem Institut für Produktentwicklung in Karlsruhe (IPEK). Sie wäre ohne die große Unterstützung verschiedener Beteiligter nicht möglich gewesen, denen ich zu außerordentlichem Dank verpflichtet bin.

Meinem Doktorvater Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers möchte ich sehr herzlich für die Leitung und seinen eigenen Einsatz zur Unterstützung des Forschungsprojektes danken. Der Kontakt zu ihm besteht Ende des Vordiploms in meinem Studium in Karlsruhe und ich bin ihm für die kontinuierliche Förderung und den regen Austausch, durch die ich viel gelernt habe, sehr dankbar.

Frau Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml möchte ich für die Übernahme des Korreferats und das damit verbundene Engagement danken. Wir standen bereits zu einem frühen Zeitpunkt meiner Arbeit in Kontakt und ich habe mich sehr über das entgegengebrachte Interesse und die Bereitschaft zu Diskussionen gefreut.

Herrn Dr. Ad Kooy danke ich für die sehr intensive fachliche Betreuung im Rahmen meiner Forschungstätigkeit bei LuK. Ich war bei ihm jederzeit willkommen und habe von seinen Anregungen immer wieder profitiert. Seine Hinweise und die gemeinsam geführten Diskussionen haben in hohem Maß zur Fokussierung meiner Arbeit beigetragen und die aus seiner Anregung hervorgegangenen Fahrermodellierungsprojekte haben mir enorm geholfen, die Brücke zwischen universitärer Forschung und industrieller Anwendung zu schlagen.

Mein Dank gilt auch den vielen Beteiligten, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben. Besonders zu nennen sind in diesem Zusammenhang:

Bei LuK in Bühl: Timo Schmidt, Andreas Stuffer, Christian Fechler, Christian Bahrmann, Daniel Fuderer, Dimitri Sieber, Thomas Winkler, Björn Fischer und Michael Schwarzer.

An IPEK und KIT: Friedrich Brezger, Simon Boog, Martin Geier, Katharina Bause, Rolf Hettel und Tobias Heine.

Im privaten Umfeld: Normann Kurvers, Kerstin Konnerth und Wanja Ochs.

Genauso danke ich auch den vielen weiteren Kollegen und Freunden, die mich mit einzelnen Fahrtmessungen und dem Korrekturlesen der verschiedenen Entwurfsfassungen unterstützt haben.

Zu guter Letzt gilt mein Dank auch meiner Familie für die in vielfacher Form gezeigte Unterstützung und Liebe.

Danke.

Bühl, den 11. März 2016

Daniel Heinrich

„If you asked me to describe the rising philosophy of the day, I'd say it is data-ism. We now have the ability to gather huge amounts of data. This ability seems to carry with it certain cultural assumptions — that everything that can be measured should be measured; that data is a transparent and reliable lens that allows us to filter out emotionalism and ideology; that data will help us do remarkable things — like foretell the future.“

David Brooks, New York Times, 5. Feb. 2013

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1	Grundlagen aus Neurowissenschaften und Hirnforschung	5
2.1.1	Beschreibung des Gehirns als neuronales System	6
2.1.2	Modelle des menschlichen Gehirns	10
2.1.3	Zusammenfassung und Diskussion	15
2.2	Modellierung von Fahrerverhalten.....	16
2.2.1	Beschreibende Fahrermodelle.....	18
2.2.2	Statistische Modellierung.....	20
2.2.3	Reglermodelle.....	24
2.2.4	Motivationsgetriebene Fahrermodelle.....	25
2.2.5	Kognitive Fahrermodelle.....	28
2.2.6	Wahrnehmung und Komfortbewertung des Fahrers	29
2.3	Entwicklungsmethodik und Bauteilvalidierung.....	33
2.3.1	Das integrierten Produktentstehungsmodell iPeM.....	33
2.3.2	Das X-in-the-Loop-Framework zur Bauteilvalidierung	36
3	Motivation und Zielsetzung	39
3.1	Motivation	39
3.2	Zielsetzung	40
4	Beschreibung der Vorgehensweise	43
5	Herleitung eines Metamodells zur Fahrermodellierung	45
5.1	Begrenzung des Modellumfangs auf relevante Manöver	46
5.2	Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung 50	
5.3	Wahl eines geeigneten Modelltyps.....	53
5.4	Unbestimmtheit der menschlichen Handlung aus Simulationssicht	55
5.5	Zusammenfassung der verschiedenen Modellierungsansätze.....	57
6	Statistische Analyse von im Feld gemessenem Fahrerverhalten	59
6.1	Messtechnik und Umfang der erhobenen Daten	60
6.2	Auswertung der erhobenen Fahrtdaten.....	64
6.2.1	Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverteilungen	65
6.2.2	Vergleich der Fahrtdaten mit Fahr- und Prüfzyklen	70
6.2.3	Ableitung von Kennwerten zur Längsbeschleunigung	72
6.2.4	Häufigkeit von Stopp- und Anfahrvorgängen	76
6.2.5	Abhängigkeit des Fahrtverhaltens von Fahrzeug und Beladung	78

6.2.6	Vergleich verschiedener Fahrer auf identischen Strecken.....	82
6.2.7	Auswertung von Gangwahl und Schaltwechselln	86
6.3	Zusammenfassung.....	94
7	Aufbau von Fahrermodellen.....	95
7.1	Aufbau eines Fahrermodells für Beschleunigungsvorgänge	95
7.1.1	Auswahl und Abgrenzung des zu betrachtenden Manövers	96
7.1.2	Auswertung von gemessenen Beschleunigungsvorgängen	96
7.1.3	Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung	101
7.1.4	Wahl von geeigneten Teilmodellen für die Handlungsausführung	102
7.1.5	Aufbau und Implementierung des Beschleunigungsmodells	103
7.1.6	Validierung des Modells.....	108
7.1.7	Zusammenfassung und Diskussion	112
7.2	Modellierung des Fahrerverhaltens für gesamte Fahrten.....	114
7.2.1	Trennung von Fahrerwunsch und Handlungsausführung	115
7.2.2	Implementierung der Handlungsausführung als Zustandsautomat.....	117
7.2.3	Aufbau des Fahrermodells.....	119
7.2.4	Implementierung von Fahrer- und Fahrzeugmodell	123
7.2.5	Validierung des Fahrermodells	125
7.2.6	Diskussion der Ergebnisse	128
8	Ermittlung von Bauteillastkollektiven über Fahrersimulation	130
8.1	Implementierung von Fahrermodellen in Mehrkörpersimulationen.....	131
8.2	Ermittlung von Lastkollektiven für einzelne Fahrmanöver	135
8.3	Bestimmung von Lastkollektiven für Gesamtfahrtsimulationen	140
8.4	Erweiterung des Fahrermodells auf allgemeine Fahrtstrecken	149
8.5	Diskussion der Ergebnisse.....	155
9	Zusammenfassung und Ausblick	157
9.1	Zusammenfassung.....	157
9.2	Einordnung und Diskussion der Ergebnisse.....	157
9.3	Ausblick.....	161
10	Literaturverzeichnis	164
Anhang	173
	Anhang A: Verwendete Programmpakete und PC-Leistungsdaten	173
	Anhang B: Verwendung von Open-Streetmap-Kartendaten	175
	Anhang C: Programmstruktur und Auswerteroutinen für die Fahrtdatenbank.....	177
	Anhang D: Dokumentation der entwickelten Fahrermodelle	179

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Beschreibung
CAN	Controller Area Network
DGL	Differentialgleichung
DLL	Dynamic Link Library (dynamische Programmbibliothek unter Microsoft Windows)
IPEK	Institut für Produktentwicklung Karlsruhe
iPeM	integriertes Produktentstehungsmodell
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
NVH	Noise Vibration Harshness
OBD	On Board Diagnose
OGP	Orientierungsgeschwindigkeitsprofil
PEP	Produktentstehungsprozess
TD	Torsionsschwingungsdämpfer
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
ZMS	Zweimassenschwungrad

1 Einleitung

Ingenieure sind ausgehend von ihrer Ausbildung und Tätigkeit mit der Funktion und Beschreibung technischer Systeme vertraut. Die betrachteten Systeme weisen meist ein deterministisches, regelmäßiges Verhalten auf. Zur Beschreibung des Verhaltens existiert dabei eine Fülle verschiedener mathematischer Methoden, die beispielsweise die Berechnung von Bewegungsgleichungen und Bauteilspannungen in der technischen Mechanik ermöglichen.

Gleichzeitig werden die entwickelten Systeme von Menschen bedient und genutzt. Die Nutzung durch den Menschen muss beim Entwurf technischer Systeme berücksichtigt werden, auch wenn sie nicht durch die gleichen eindeutig mathematisch erfassbaren Gesetzmäßigkeiten bestimmbar ist, die zur Modellierung des Systems selbst verwendet werden (siehe Abbildung 1).

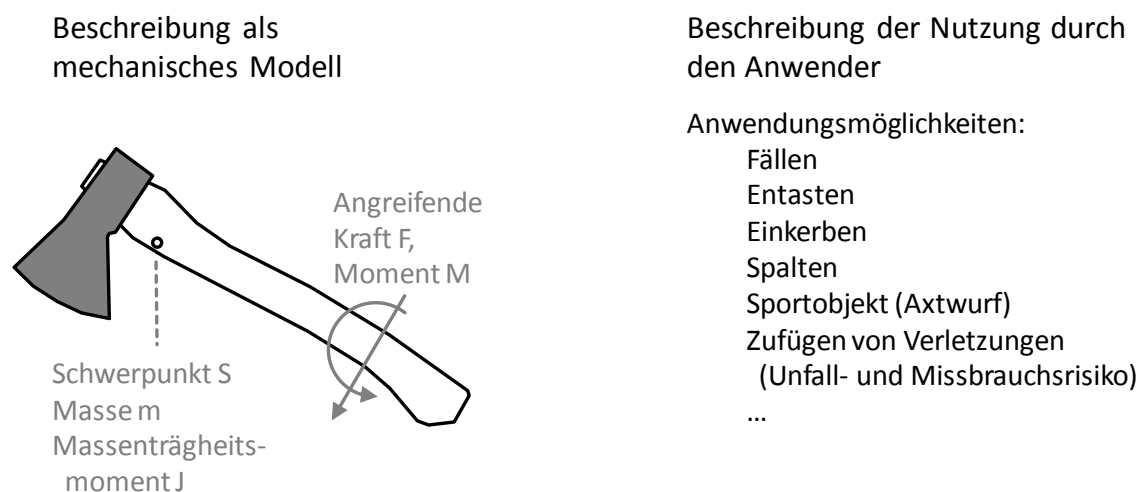


Abbildung 1: Betrachtung eines technischen Produkts als mechanisches Modell und in den Nutzungsmöglichkeiten durch den Anwender am Beispiel einer Axt

Für technische Produkte ergibt sich somit nicht nur die Frage nach geeigneten Modellen zur Beschreibung des Verhaltens des entwickelten Systems. Ebenso wichtig ist die Frage nach der Nutzung des Produkts durch den Menschen, da dieser in der Art und Gestaltung seiner Nutzung einen enormen Einfluss auf die Belastung und damit auch die Lebensdauer des jeweiligen technischen Produkts hat.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Beschreibung und Modellierung der Nutzung durch den Menschen am Beispiel des Fahrzeugantriebsstrangs. Die Belastung von Komponenten in Fahrzeugantriebsstrang ist stark von der Fahrweise

und den einzelnen Handlungen des jeweiligen Fahrers abhängig. Der hohe Einfluss des Fahrers auf die Belastung von Bauteilkomponenten bedeutet auch, dass diese Zusammenhänge zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in der Produktentwicklung untersucht werden müssen. Zu diesem Zeitpunkt steht jedoch kein physisches System für geeignete Untersuchungen zur Verfügung, die auch enormen Zeitaufwand benötigen. Als Alternative zur Abbildung des Fahrereinflusses über reale Fahrer bietet sich die *Simulation des Fahrerverhaltens* als Werkzeug zum besseren Verständnis und zur frühzeitigen Bewertung des Fahrereinflusses auf die Bauteilbelastungen an.

In der vorliegenden Arbeit werden am Beispiel der Belastung von Bauteilkomponenten im Fahrzeugantriebsstrang verschiedene Modelle entwickelt, die das menschliche Nutzungsverhalten in Dynamiksimulationen abbilden. Diese Modelle ermöglichen die Berücksichtigung des Fahrereinflusses auf die Belastung von Antriebsstrangkomponenten zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung sowie die simulative Bewertung der Bauteilbelastung über die komplette Bauteillebensdauer, auch wenn das aus Zeit- oder Kostengründen in einer physischen Erprobung nur eingeschränkt möglich ist.

Zur Bearbeitung der beschriebenen Zielstellung sind verschiedene Schritte notwendig:

In Kapitel 2 werden zunächst die im gegebenen Rahmen relevanten Grundlagen behandelt. Diese bestehen aus einem kurzen Überblick über den Forschungsstand zu Neurowissenschaften und Hirnforschung (Kapitel 2.1), dem Stand der Forschung im Bereich Fahrermodellierung (Kapitel 2.2) und einem kurzen Überblick zur Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses und der Validierung von Fahrzeug- und Antriebsstrangkomponenten, um eine Einordnung von Fahrermodellen in diesen Kontext zu ermöglichen (Kapitel 2.3).

Im Anschluss wird die betrachtete Zielstellung konkretisiert und in einzelne Forschungsfragen und -hypothesen aufgegliedert (Kapitel 3). Auf dieser Basis ergibt sich das weitere Vorgehen der Forschungsarbeit, das in Kapitel 4 beschrieben wird.

Der gewählte Lösungsweg gliedert sich dabei in unterschiedliche Themenbereiche, die gleichberechtigt nebeneinander stehen. In Kapitel 5 wird eine allgemeine Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen hergeleitet und diskutiert, die mit drei unterschiedlichen Ansätzen die Synthese von Fahrermodellen unterstützt. Geeignete Messdaten zur Beschreibung des Fahrerverhaltens und zur Validierung von Fahrermodellen werden mit der in Kapitel 6 beschriebenen Analyse von im Feld gemessenem Fahrerverhalten

bereitgestellt. Der Aufbau von Fahrermodellen wird in Kapitel 7 hinsichtlich der Anwendung der entwickelten Methodik beschrieben. Die Anwendung der entwickelten Fahrermodelle zur Modellierung von Bauteilbelastungen und der Ermittlung von geeigneten Lastkollektiven wird anschließend in Kapitel 8 behandelt.

Die Gliederung der Kapitel in diese Kategorien wird in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

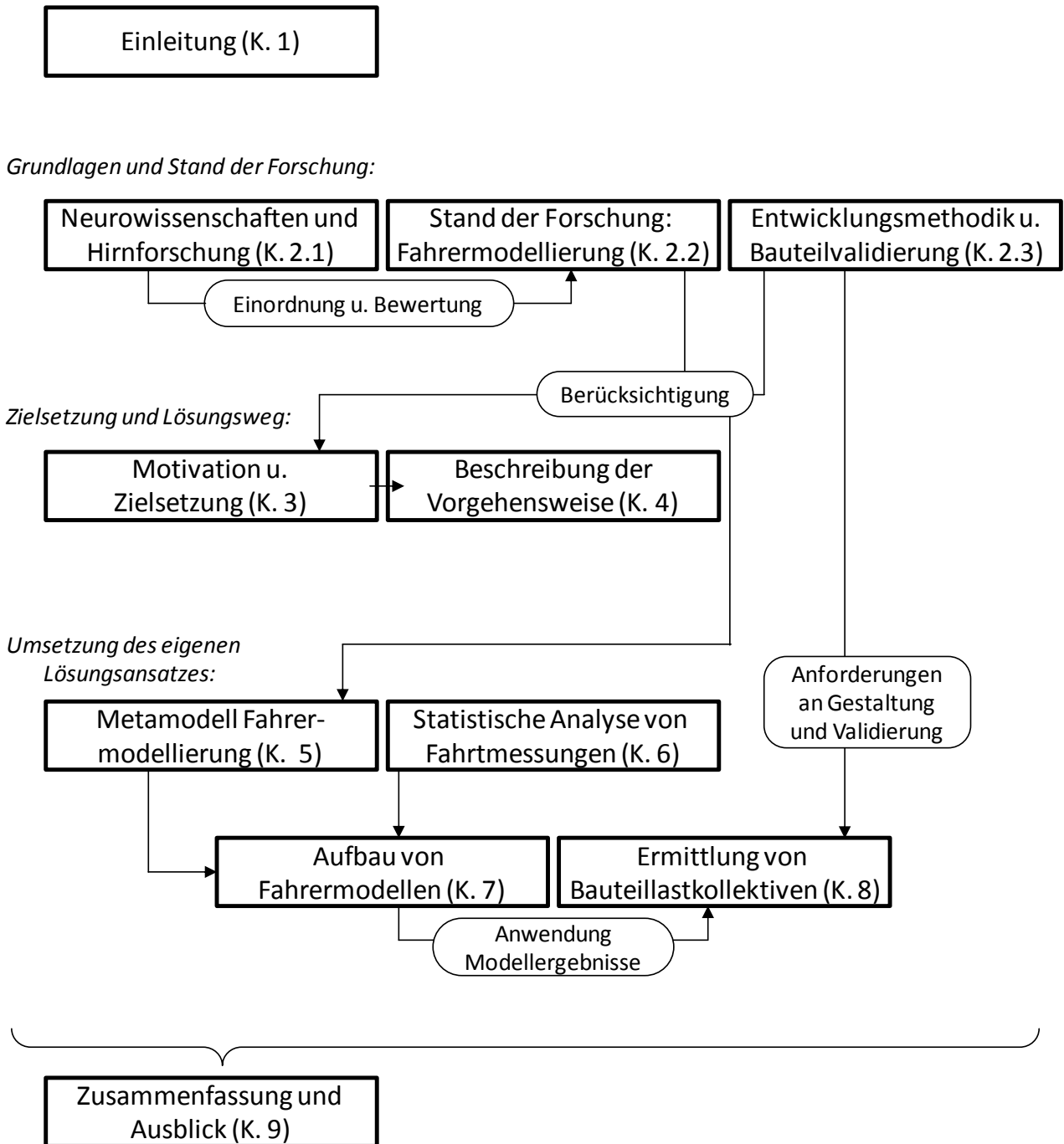


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Fahrerverhaltens auf die Bauteilbelastungen im Fahrzeugantriebsstrang. Für diese Zielstellung sind neben den technischen Grundlagen auch Ergebnisse aus Neurowissenschaften und Hirnforschung relevant, die im Rahmen der Modellbildung berücksichtigt werden. Die Aufbereitung und Anwendung der Forschungsergebnisse hierzu ist ein grundlegender Teil der erbrachten Leistung, wobei – der Zielsetzung entsprechend – oftmals stark vereinfachende Abbildungen der Ergebnisse gefunden werden.

In diesem Kapitel werden die für die Arbeit relevanten Grundlagen aus Hirnforschung und Neurologie (Kapitel 2.1), der aktuelle Stand der Forschung zu Fahrermodellierung (Kapitel 2.2) sowie relevante Grundlagen zu Entwicklungsmethodik und Produktvalidierung (Kapitel 2.3) in kurzer Form aufbereitet und zusammengefasst.

2.1 Grundlagen aus Neurowissenschaften und Hirnforschung

Die Forschung liefert heute ein vielschichtiges und komplexes Bild zur Funktion des menschlichen Gehirns. Dieses Wissen hat sich hauptsächlich in den letzten Jahrzehnten – ungefähr seit den 1950er-Jahren – entwickelt und wächst rasant.¹

Gleichzeitig kann festgehalten werden, dass Forschung und Technik heute nicht in der Lage sind, die vollständige Funktion des menschlichen Gehirns (oder auch nur des Gehirns eines einfacheren Säugetiers) mit all seinen Facetten zum Beispiel in einem Simulationsmodell nachzubilden. Der Hirnforscher Christof Koch weist beispielsweise in einem Vortrag im Jahr 2011 darauf hin, dass selbst für den Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* mit 302 Nervenzellen heute kein eindeutiges Modell existiert, das die verschiedenen Vorgänge und Prozesse der Nerven- und Zellstruktur vollständig beschreibt².

Die Zielsetzung der Beschreibungen des menschlichen Verhaltens zur Anwendung bei der Produktentwicklung im PKW-Antriebsstrang ist ein Anwendungsziel, das verhältnismäßig weit von den Grundlagenfragen der heutigen Gehirnforschung entfernt ist. Um eine praxisnahe, dem Anwendungszweck entsprechende

¹ Vergleiche O'Shea 2006.

² Koch 2011

Modellierung zu finden, werden stark vereinfachte Modellstrukturen aufgebaut, für die die aktuellen Grundlagenerkenntnisse aber wichtige „Leitplanken“ sind, die bei der Modellbildung berücksichtigt werden müssen. Dabei kann die gefundene Darstellung nicht mehr als ein kurzes „Kratzen an der Oberfläche“ der insgesamt sehr vielschichtigen und komplexen Materie sein – für detailliertere Darstellungen sei auf die Fachliteratur verwiesen¹. Beschreibungen aus den Neurowissenschaften mit medizinischem und diagnostischem Hintergrund, wie die Zuordnung von Funktionen zu einzelnen Gehirnregionen und der Aufbau des Gehirns, werden in der hier gegebenen Darstellung bewusst ausgeklammert.

Der Überblick folgt einer Bottom-Up-Betrachtung ausgehend von der Funktion einzelner Neuronen bis hin zum kompletten Gehirn.

2.1.1 Beschreibung des Gehirns als neuronales System

Die Weitergabe und Verarbeitung von Signalen im Gehirn erfolgt über Nervenzellen (Neuronen). Bei der Überschreitung eines Schwellenreizes, der sich aus der gewichteten Summe des durch Rezeptoren empfangenen Signals ergibt, sendet das Neuron selbst einen Impuls aus (Siehe Abbildung 3). Dieser Vorgang wird im Allgemeinen als *Feuern des Neurons* bezeichnet.

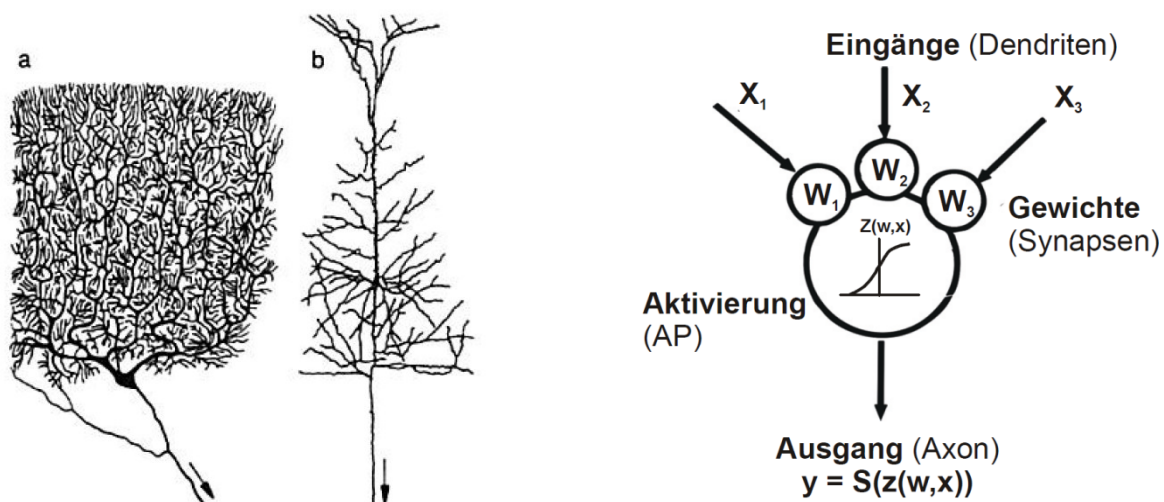


Abbildung 3: Abbildung von zwei Neuronen und mathematisches Modell eines Neurons¹

¹ Ein kompakter Überblick über den aktuellen Stand der Forschung ist beispielsweise in O’Shea 2006 gegeben.

Die Funktion und der Aufbau der einzelnen Neuronen sind bei allen Lebewesen ähnlich. An einfachen Versuchstieren gewonnene Erkenntnisse lassen sich oftmals auch auf die Neuronen im menschlichen Gehirn übertragen.² Beispielwerte für die Anzahl von Neuronen für verschiedene Lebewesen werden in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Anzahl der Neuronen für verschiedene Lebewesen³

Tierart	Ungefähre Anzahl Neuronen
Nematoden-Würmer	300
Schnecken	20 000
Honigbiene	1 000 000
Maus	70 000 000
Mensch	86 000 000 000

Im Gehirn und Nervensystem sind Neuronen miteinander verbunden und formen so neuronale Netze. Diese Strukturen ermöglichen grundsätzlich die vielseitige Verarbeitung von Informationen. Beispielsweise führt DÖRNER auf, dass alle grundlegenden Operationen der Informatik auch in der Form von künstlichen neuronalen Netzen dargestellt werden können⁴. Somit liefert die Verkettung von Neuronen einen Erklärungsansatz, wie die Abfolge von Handlungsabläufen bis hin zu komplexen Handlungsmustern entstehen kann.

DÖRNER führt als Beispiel für die Verkettung von Handlungsmustern eine Grabwespe an, die durch etwa 700 000 Neuronen zu verschiedenen Handlungen befähigt ist, beispielsweise dem Suchen von Nahrung in kreisförmigen Bewegungen um ihren Bau herum, dem Rücktransport gefundener Nahrung auf möglichst direktem Weg und dem Aufgraben der Bauöffnung, falls dort die gefundene Nahrung nicht herein passt (siehe Abbildung 4). Diese Handlungsmechanismen können als einfache Programme aufgefasst werden, die über die Verkettung von Neuronen entstehen. Beschreibend können die „neuronalen Programme“ in einer formalisierten Bedingungssprache, als sogenannte Produktionen, dokumentiert werden⁵. Diese

¹ Abbildungen links aus O’Shea 2006, math. Modell (rechts) aus Albrecht 2005.

² O’Shea 2006.

³ Die Werte für die verschiedenen Tierarten entstammen aus O’Shea 2006. Der Wert für den Menschen stammt aus Herculano-Houzel 2009 und wird in anderen Veröffentlichungen oftmals etwas zu hoch auf 10^{11} Neuronen angegeben.

⁴ Vergleiche Dörner 1999.

⁵ Siehe Michon 1985 sowie Irmscher 2001.

Beschreibung setzt somit über der Ebene einzelner Neuronen an und betrachtet nicht mehr die einzelnen Neuronen, sondern vielmehr die sich durch die Verkettung ergebenden Handlungsmuster.

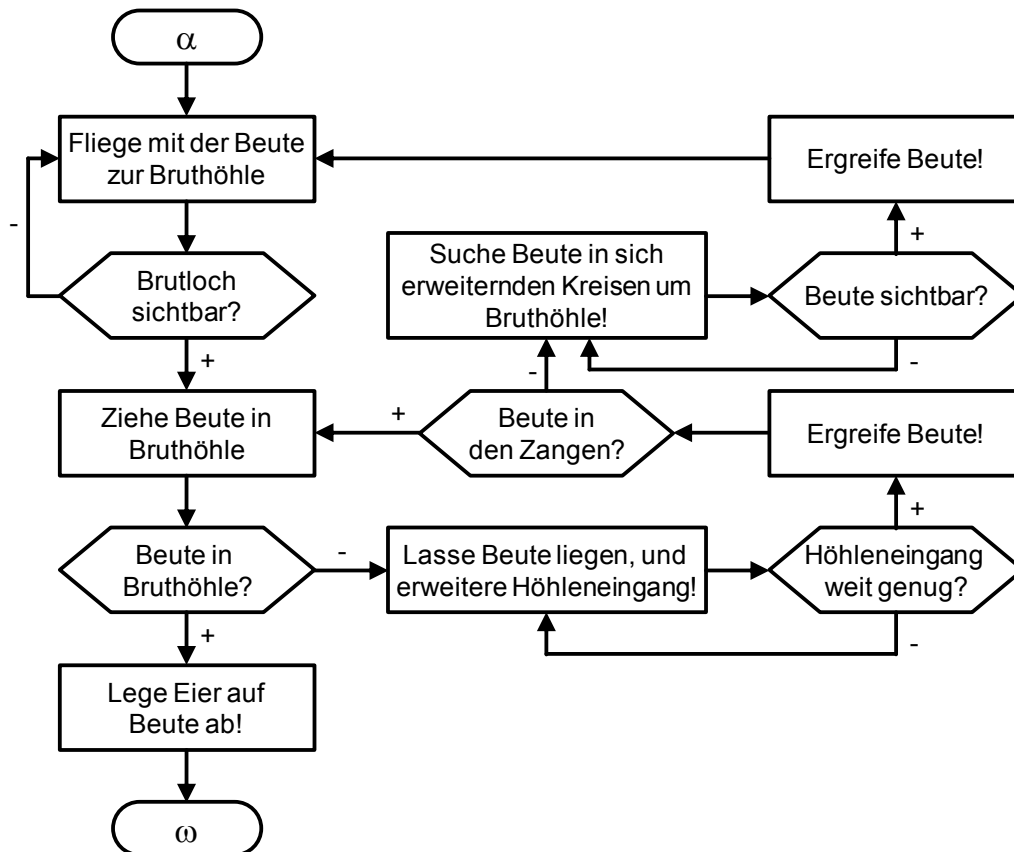


Abbildung 4: Handlungsschema einer Grabwespe beim Transport von Beute¹. Die Wespe folgt dabei dem beschriebenen Handlungsprogramm. Dabei wird das beschriebene Programm laut DÖRNER stur befolgt – durch Manipulation des Brutlochs und manuelles Verschieben der Beute kann die Grabwespe unbegrenzt lang in den Schleifen des Handlungsschemas gehalten werden.²

Neben der in Regeln fassbaren Ausführung von Handlungsabläufen sind in den neuronalen Strukturen Mechanismen zur Anpassung der Handlungsabläufe vorhanden. Diese Anpassungen finden über verschiedene Mechanismen des Lernens und der Reaktion auf sich ändernde Umweltbedingungen statt.

Die Vorgänge der Anpassung wurden ursprünglich in der Behaviorismus-Forschung experimentell als Black-Box-Modell beschrieben und können im Zuge neuerer

¹ Nach Dörner 1999.

² Siehe Dörner 1999.

Forschung auf die Funktionsweise des neuronalen Netzes zurückgeführt werden. Am Beispiel der Meeresschnecke *Aplysia Californica* wurden in den 1960er-Jahren die neuronalen Prozesse der Gewöhnung und Sensitivierung untersucht.¹ Neuere Forschung beschäftigt sich auch mit klassischer Konditionierung bei der *Aplysia*.² Im Allgemeinen wird aufgrund der Ähnlichkeit der Neuronen im Nervensystem von einer Übertragbarkeit der Mechanismen auf den Menschen ausgegangen³.

Besonders herausgestellt werden können im Bereich der Verhaltensanpassung die Prozesse:⁴

- Gewöhnung (Habituation)
Wiederkehrende Reize ohne Gefährdung werden mit der Zeit ignoriert (beim Menschen beispielsweise das Ticken einer Uhr, das nach kurzer Zeit nicht mehr bewusst wahrgenommen wird).
- Sensitivierung
Die Reaktion wird bei wiederholten Reizen erhöht (beispielsweise ein juckendes Körperteil, das als immer unangenehmer empfunden wird, bis der Juckreiz schließlich nicht mehr auszuhalten ist).
- Konditionierung
Erlernen von Reiz-Reaktions-Mustern. Es wird unterschieden zwischen durch äußere Reize ausgelöste Reaktionsmuster (klassische Konditionierung) und ursprünglich spontanem Verhalten, dass durch die Konditionierung angenommen wird (operante Konditionierung).

Auffällig ist bei den beschriebenen Verhaltensmustern, dass die Prozesse der Gewöhnung und Sensitivierung entgegengesetzt verlaufen. Es scheint eine Bedenklichkeitsschwelle im Nervensystem zu geben, unter der Signale als Gewöhnung vernachlässigt werden und über der eine Sensitivierung einsetzt, die die Reaktion auf das Signal verstärkt. Diese Schwelle ist individuell von Mensch zu Mensch unterschiedlich (beispielsweise bei der Wahrnehmung von Schmatz- oder Quietschgeräuschen).

Ähnlich zeigen sich auch beim PKW bei Merkmalen der NVH (Noise Vibration Harshness) und des Komforts Unterschiede in der subjektiven Bewertung durch verschiedene Nutzer⁵. Somit ermöglichen die Begriffe der *Gewöhnung* und

¹ O'Shea 2006.

² Siehe beispielsweise Brems 2002.

³ Vergleiche O'Shea 2006.

⁴ Eine ausführlichere Diskussion ist in O'Shea 2006 gegeben.

⁵ Vergleiche beispielsweise Albers und Albrecht 2004

Sensitivierung einen Zugang zur Beschreibung der individuellen Unterschiede in der Wahrnehmung und Bewertung des technischen Systems PKW durch verschiedene Nutzer.

2.1.2 Modelle des menschlichen Gehirns

O'SHEA bezeichnet das menschliche Gehirn als „die komplexeste Struktur im gesamten uns bekannten Universum (aus Sicht des Gehirns)“.¹ Diese Aussage spiegelt sich auch darin wieder, dass nach dem heutigen Stand der Wissenschaft keine eindeutigen Modelle verfügbar sind, die das Verhalten des Gehirns in einer umfassenden Form modellieren. Die moderne Hirnforschung behilft sich mit der Analogiebildung und Übertragung von Erkenntnissen aus der Forschung mit einfacheren Lebewesen und der Zuordnung von Funktionen zu einzelnen Hirnarealen über verschiedene Messmethoden wie fMRT (funktionelle Magnetresonanztomografie) und EEG (Elektroenzephalographie).²

Parallel zu diesen Ansätzen sind im Rahmen der Forschung zu künstlicher Intelligenz seit den 1960er-Jahren verschiedene Modelle mit dem Ziel entstanden, die Funktion des Gehirns im Computer nachzubilden. Zu diesen Ansätzen wird im Folgenden ein Überblick gegeben.

Ein häufig verwendetes verhaltenspsychologisches Modell der menschlichen Handlungsstruktur ist die Unterteilung nach RASMUSSEN (siehe Abbildung 5) in fertigkeit-, regel- und wissensbasiertes Verhalten. Es wird an dieser Stelle verwendet, um einen Überblick über die Gültigkeitsbereiche verschiedener Gehirnmodelle zu geben.

RASMUSSEN selbst weist bei der Darstellung ausdrücklich darauf hin, dass es sich um eine vereinfachte Wiedergabe komplexer Prozesse handelt:

„Simplified illustration of the levels of performance of skilled human operators. Note that levels are not alternatives but interact in a way only rudimentarily represented in diagram.“³

Das Handlungsmodell ist in drei Ebenen unterteilt: Reflexe (sensomotorische Fertigkeiten), gelernte Handlungsabläufe (regelbasiertes Verhalten) und bewusste, kognitive Problemlöseprozesse (wissensbasiertes Verhalten). Über das Modul der

¹ O'Shea 2006.

² Siehe beispielsweise Welke 2010 für eine Anwendung im Bereich der Fahrermodellierung.

³ Rasmussen 1986.

Merkmalsbildung werden die drei Ebenen angesprochen, das Modell berücksichtigt dabei das parallele Ablaufen unterschiedlicher Prozesse im menschlichen Gehirn.

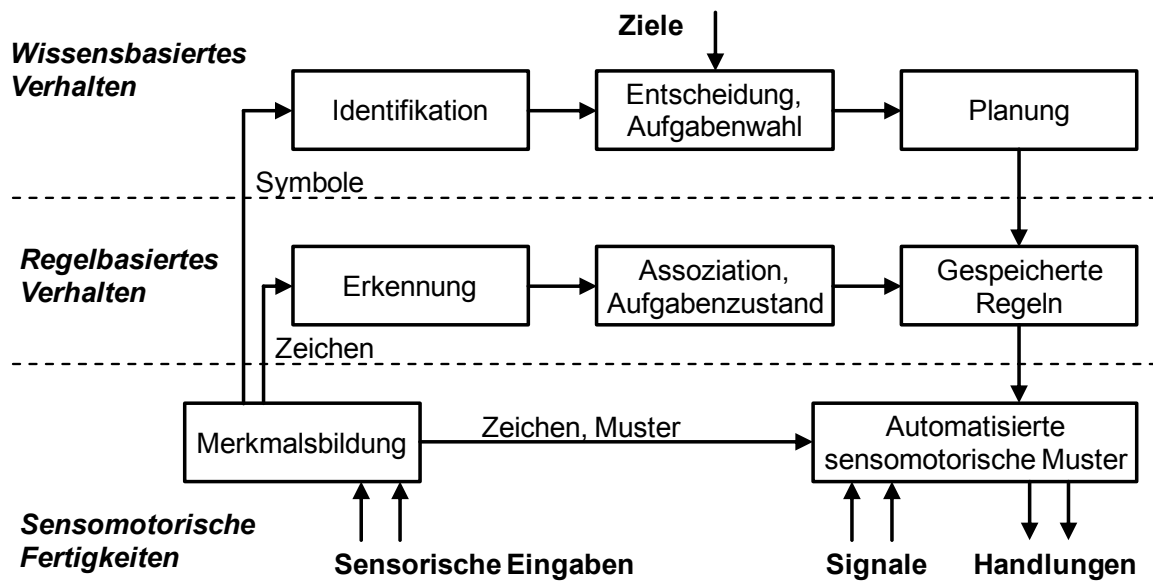


Abbildung 5: Handlungsmodell des Menschen nach Rasmussen¹

Die Erkenntnisse aus der Verhaltensforschung und den Neurowissenschaften (siehe Kapitel 2.1.1) bieten schlüssige Erklärungsmuster für die Bereiche der sensomotorischen Fähigkeiten und des regelbasierten Verhaltens. Gleichzeitig ermöglicht die komplexe Gehirnstruktur des Menschen und höher entwickelter Tiere vielfältige Verhaltensweisen und Phänomene, die über die bloße Reaktion auf Reize hinausgehen und die im Handlungsmodell nach Rasmussen als „wissensbasierte Fähigkeiten“ bezeichnet werden.

In der Forschung hat sich der Begriff der kognitiven Prozesse entwickelt, wobei es keinen allgemeinen Konsens zur Definition des Begriffs gibt. LEMKE listet als Beispiel für kognitive Prozesse im menschlichen Hirn „Planen, Schlussfolgern, Entscheiden, Fantasieren, Vorstellen, Wahrnehmen, Reflektieren, Denken, Lernen etc.“ auf². Dabei existieren im Bereich der Neurowissenschaften bislang keine umfassenden Theorien, die die kognitiven Hirnprozesse aus neuronaler Sicht zufriedenstellend erklären können.³ An ihre Stelle treten verschiedene Disziplinen aus Psychologie und

¹ Nach Rasmussen 1986. Übersetzung ins Deutsche nach Irmischer 2001.

² Lemke 2003.

³ Vergleiche O’Shea 2006.

Verhaltensforschung, die eine Erklärung menschlichen Handelns über eine Kombination von empirischen Befunden und analytischen Betrachtungen herleiten.

Im Folgenden werden die zentralen Modellannahmen zu kognitiven Modellarchitekturen gekürzt wiedergegeben.¹ IRMSCHER nennt als Grundstruktur für kognitive Modelle die drei Bestandteile Arbeitsspeicher, Langzeitspeicher und Interpretierer (siehe Abbildung 6).

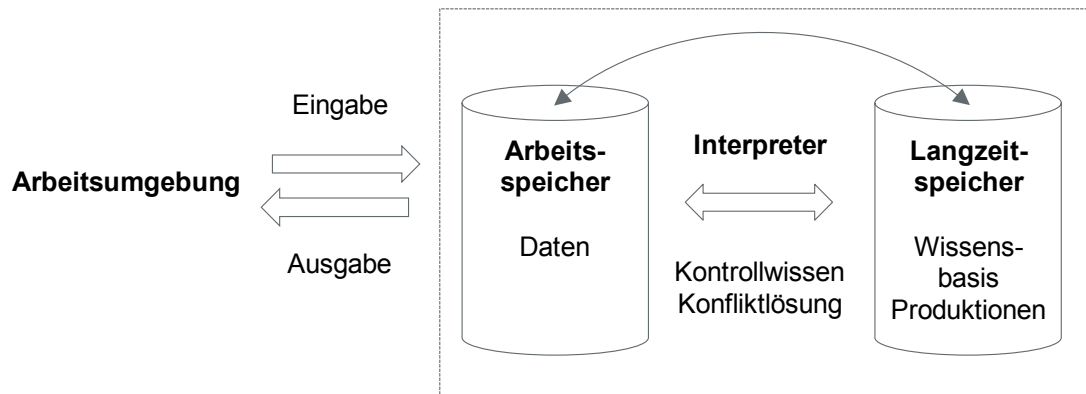


Abbildung 6: Schema kognitiver Modelle²

Der Arbeitsspeicher beinhaltet das Kurzzeitgedächtnis und damit auch die Repräsentation der Umwelt und des gerade durchgeführten Arbeitsschritts. Im Langzeitspeicher sind das explizite (deklarative) und implizite Wissen enthalten. Der Interpretierer führt einen Abgleich zwischen Arbeitsspeicher und Langzeitspeicher durch und wählt entsprechend einer geeigneten Handlungsregulation die nächsten auszuführenden Handlungsschritte.

Nach O'SHEA legen neuere Erkenntnisse der Neurowissenschaften nahe, dass die gleichen neuronalen Strukturen im Gehirn für Kurz- und Langzeitgedächtnis verantwortlich sind. Über eine Änderung der chemischen Bindungen ergibt sich ein Wechsel von Kurz- zu Langzeitgedächtnis, ohne dass dafür eine Übertragung der Informationen in einen anderen Bereich des Gehirns notwendig ist³.

Die einzelnen Elemente Arbeitsspeicher, Langzeitspeicher und Interpretierer werden im Folgenden kurz beschrieben und diskutiert.

¹ Eine ausführliche Diskussion findet sich in Irmscher 2001.

² Nach Irmscher 2001.

³ O'Shea 2006.

Arbeitsspeicher

Die menschliche Wahrnehmung ist auf eine begrenzte Menge an Informationen beschränkt, die über die eigenen Sinne geliefert wird. So liefert das Auge beispielsweise nur für etwa 2° Sichtwinkel ein scharfes Bild.¹ Die über die Sinne gegebene Wahrnehmung wird mit einem inneren Modell der Umgebung abgeglichen.

Widersprüchliche Informationen von verschiedenen Sinnen werden vom Gehirn im Allgemeinen unterdrückt. So wird beispielsweise das Hören gesprochener Worte bei Blickkontakt durch die gesehenen Lippenbewegungen unterstützt. Beim Zeigen von Videoaufnahmen redender Menschen, bei denen einzelne Worte in der Tonspur durch andere Worte ersetzt werden, wird dies vom Betrachter oftmals nicht wahrgenommen: Die als gesprochenes Wort wahrgenommene Information entsteht hier zum Teil aus den gesehenen Mundbewegungen, wobei die widersprüchlichen akustischen Signale vom Gehirn unterdrückt werden².

Der im kognitiven Modell als „Arbeitsspeicher“ bezeichnete Bereich enthält somit die aktuell im Gehirn vorhandene Repräsentation der Umwelt und des eigenen Körpers.

Langzeitspeicher

Die Lernforschung unterscheidet zwischen explizitem und implizitem Wissen³. Explizites Wissen ist verbalisierbar und wird somit oft auch als Faktenwissen oder deklaratives Wissen bezeichnet. Implizites Wissen bezeichnet erlernte Fähigkeiten des Menschen, die nicht in verbalisierter Form vorliegen.

Es können verschiedene Mechanismen zur Überführung von explizitem und implizitem Wissen ineinander nachgewiesen werden. Beispielsweise werden im Fall von Fahranfängern explizite Handlungsanweisungen des Fahrlehrers zum Anfahren und Schalten durch Wiederholung in gelernte, implizite Abläufe umgewandelt⁴.

Im Rahmen von kognitiven Architekturen wird implizites Wissen im Allgemeinen in Form von Produktionen angegeben, die als Handlungsprogramme zur Ausführung von Tätigkeiten zur Verfügung stehen und vom Interpretier aufgerufen werden können.

¹ Vergleiche Jürgensohn 1997, Seite 200

² Vergleiche O'Shea 2006.

³ Lemke 2003.

⁴ Vergleiche Michon 1985.

Interpreter

Der Interpreter ist für die Auswahl von Handlungsschritten unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen verantwortlich. Übliche Annahme ist eine Dauer von 50ms für jede einzelne auszuführende Produktion¹, was zu einer Berechnungsfrequenz von 20Hz für das Modell führt.

Bei der Wahl geeigneter Handlungsschritte wird auf eine Theorie der Handlungsregulation zurückgegriffen. Entsprechend dieser Theorie wählt der Interpreter die nächsten auszuführenden Schritte, die als Stapel an geplanten Handlungen abgelegt werden.

Der Forschungsbereich der Theorien zur Handlungsregulation beschreibt das Vorgehen des Menschen, mehrere mögliche Handlungen gegeneinander zu gewichten und so zu wählen, dass als Folge einzelner Handlungsschritte ein bestehendes Handlungsziel erreicht wird. Dabei fallen unter den Bereich der Handlungsregulation sowohl die Priorisierung von bekannten Handlungen bei begrenzten Ressourcen als auch die Beschreibung des Problemlösungsprozesses bei unbekanntem Lösungsweg. Als Beispiele werden an dieser Stelle das TOTE-Modell und die Effizienz-Divergenz nach OESTERREICH aufgeführt.²

Das TOTE-Modell (Test-Operate-Test-Exit) nach MILLER, GALANTER und PRIBRAM (1960) beschreibt den Problemlösungsprozess des Menschen als Aneinanderreihung von Handlungs- und Prüfphasen, die solange durchlaufen werden, bis der gewünschte Zielzustand erreicht ist (siehe Abbildung 7).

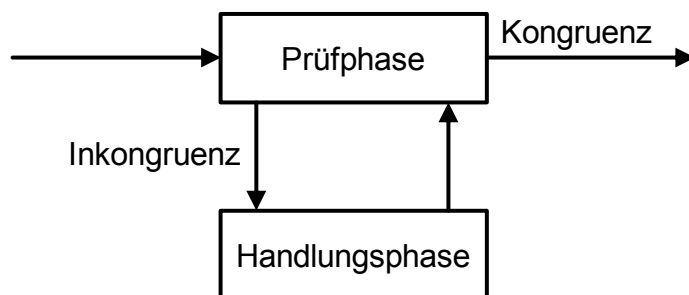


Abbildung 7: Schema des TOTE-Modell³

¹ Vergleiche Deml et al. 2008.

² Die hier gewählte Wiedergabe orientiert sich an der Darstellung aus Jürgensohn 1997.

³ Nach Jürgensohn 1997.

Bei komplexeren Problemlöseprozessen führt das TOTE-Modell oftmals zu einer sehr langsamen, da ungerichteten Lösungssuche. Erweiterte Modelle wie beispielsweise die Effizienz-Divergenz nach OESTERREICH (1981) ermöglichen eine Priorisierung von zu bewertenden Lösungspfaden. Die Priorisierung findet in diesem Fall über die Größe der Effizienz-Divergenz (ED) statt, die einen Wert für die Eignung einzelner Handlungsschritte zur Erreichung der Gesamtziele angibt. Handlungen mit ED nahe 1 sind bei der Problemlösung zu bevorzugen, da sie mit hoher Wahrscheinlichkeit Teil eines geeigneten Lösungswegs sind. Über die so vorgenommene Priorisierung ergibt sich eine Reduzierung des zu betrachtenden Handlungsraums.¹

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Modelle des menschlichen Gehirns geben eine grundlegende Vorstellung zur Struktur und Funktionsweise des menschlichen Denkens und Handelns wieder. Diese Modellvorstellungen ermöglichen vielfältige Anwendungen – von der Ableitung und Diskussion einfacherer Handlungsmodelle wie den in Kapitel 2.2 vorgestellten Fahrermodellen über die Implementierung der Modelle in numerischen Berechnungsumgebungen als kognitive Architektur bis hin zur Beschreibung und Diskussion des Menschen als handelndem Akteur in sozialen und technischen Umfeldern wie beispielsweise der Produktentwicklung².

2.1.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die vorangegangenen Ausführungen geben einen sehr kompakten Einblick in den Forschungsstand zur Funktion des menschlichen Gehirns.

Die Verarbeitung von Reizen findet demnach im Gehirn über Nervenzellen statt, die zu neuronalen Netzen verknüpft sind. Die neuronalen Netze ermöglichen die Handlung nach komplexen Verhaltensprogrammen, die Abfolgen von verschiedenen, aufeinander folgenden Handlungen koordinieren und auslösen (vergleiche Abbildung 4). Diese Strukturen und Handlungsabläufe sind dabei nicht starr vorgegeben, sondern flexibel – es erfolgt eine laufende Anpassung der Gehirnstrukturen (Neuroplastizität). Dabei gibt es verschiedene Muster von Anpassungen, die über die Struktur der einzelnen Neuronen erklärt werden können und die in der Verhaltensforschung genauer beschrieben werden.

¹ Siehe Jürgensohn 1997.

² Siehe beispielsweise Albers et al. 2012.

Die Fähigkeit des Menschen, auf sehr unterschiedliche Anforderungen und Reize in vielfältiger Weise zu reagieren, wird in Neurowissenschaften und Psychologie über kognitive Modelle des Gehirns näherungsweise abgebildet. Diese Modelle bilden das menschliche Gehirn als Struktur aus Arbeitsspeicher, Langzeitspeicher und Interpreter ab. Dies ermöglicht auch eine Beschreibung des Problemlöseprozesses des Menschen und kann somit zur Bewertung und Begründung geeigneter Methoden in der Produktentwicklung, beispielsweise der Problemlösemethodik SPALTEN nach ALBERS, herangezogen werden.¹

Die vorgestellten Grundlagen finden indirekt Anwendung beim Aufbau von Fahrermodellen und bilden einen Hintergrund an Wissen, der bei der Bewertung möglicher Modelltypen und verschiedener Herangehensweisen an eine Problemstellung berücksichtigt werden kann. Für den Aufbau von Fahrermodellen kann als Minimalkriterium gefordert werden, dass die Modelle nicht in direktem Widerspruch zu den vorhandenen Grundlagen aus Neurowissenschaften und Hirnforschung stehen dürfen.

2.2 Modellierung von Fahrerverhalten

Die Modellierung und Beschreibung des Fahrers ist in der Forschung historisch hauptsächlich mit dem Ziel der Unfallprävention und der Beurteilung von Verkehrsflüssen motiviert. Im Rahmen neuerer Forschung wurden weitere Untersuchungsziele hinzugefügt.

JÜRGENSOHN listet folgende Anwendungsbereiche für die Modellierung des Fahrerverhaltens auf:¹

- Fahrverhaltensoptimierung
- Verkehrsflusssimulation
- Verkehrsteilnehmer-Simulation in Fahrsimulatoren
- Verschleiß-, Emissions- und Lastuntersuchungen
- Auslegung und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen
- Sicherheitsforschung

Als benachbarte Forschungsfelder zur Modellierung des Autofahrers können zum einen die Modellierung des Verhaltens von Piloten und Fluglotsen genannt werden, zum anderen die Forschung auf dem Gebiet autonom fahrender Automobile. Ein

¹ Albers et al. 2005

Überblick zu den gebräuchlichsten Fahrermodellen wird unter anderem von MICHON und JÜRGENSOHN gegeben². MICHON führt eine zweidimensionale Unterteilung von Fahrermodellierungen ein, bei der er zwischen Modellen mit und ohne dynamischen Verknüpfungen sowie zwischen verhaltensorientierten und psychologisch motivierten Modellen unterscheidet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Unterteilung von Fahrermodellen nach MICHON³

	Taxonomisch	Funktional
Input-Output (Behaviorismus)	Aufgabenanalysen	mechanische Modelle adaptive Reglermodelle
Zustandsorientiert (Psychologisch)	Verhaltensmodelle	Motivationsmodelle kognitive Modelle

Modelle ohne dynamische Verknüpfungen (taxonomische oder beschreibende Modelle) sind reine Fakteninventare. Dementsprechend sind sie nicht für eine Umsetzung in einer dynamischen Simulation geeignet, stellen aber oftmals ein Fundament an Grundwissen für den Aufbau komplexerer Modelle mit dynamischen Funktionen bereit.

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wird eine Unterteilung von Fahrermodellen in

- beschreibende Fahrermodelle (taxonomische Modelle),
- statistische Modelle,
- Reglermodelle,
- Modelle der Fahrmotivation und
- kognitive Modelle

verwendet, die sich für den Anwendungsbereich von Verschleiß-, Emissions- und Lastuntersuchungen als geeignet erwiesen hat.⁴

¹ Jürgensohn 1997.

² Siehe Michon 1985 sowie Jürgensohn 1997.

³ Michon 1985.

⁴ Siehe auch Albers et al. 2013b.

2.2.1 Beschreibende Fahrermodelle

Taxonomische Fahrermodelle bilden das menschliche Verhalten in rein beschreibender Form ab. Sehr häufig referenziert ist in diesem Bereich das Modell der hierarchischen Struktur des Fahrerverhaltens. Es unterteilt die Tätigkeit des Fahrers in

- eine strategische Ebene, die die Planung beinhaltet (wie die Wahl einer passenden Route),
- eine Manöverebene, die die bewussten Entscheidungen des Fahrers im Straßenverkehr beinhaltet und
- eine Kontrollebene, die die automatischen Verhaltensmuster des Fahrers beinhaltet.

Das Modell geht ursprünglich auf Untersuchungen in der Luft- und Raumfahrttechnik zurück¹ und wird ab den 1970er-Jahren in verschiedenen Veröffentlichungen zur Fahrermodellierung berücksichtigt. Neuere Untersuchungen beziehen sich oftmals auf die Darstellung der Ebenenstruktur nach MICHON (siehe unten).

In einzelnen Fällen wird eine vierte Hierarchieebene hinzugefügt, die den Charakter und die Persönlichkeit des Fahrers beschreibt (siehe Abbildung 8). In manchen Veröffentlichungen werden auch Nebenaufgaben des Fahrers wie die Bedienung von Radio und Navigationssystem und die Unterhaltung mit Beifahrern in der Darstellung hinzugefügt.

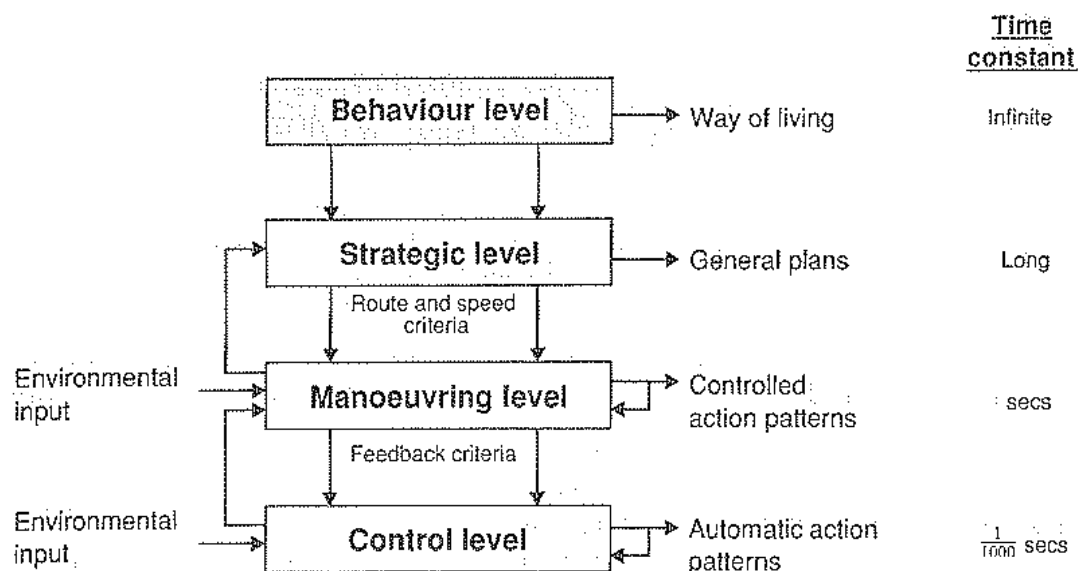


Abbildung 8: Hierarchische Struktur des Fahrerverhaltens²

¹ Vergleiche Jürgensohn 1997.

² Panou et al. 2007.

Eine ähnliche Unterteilung des menschlichen Verhaltens wurde von RASMUSSEN mit der Unterteilung in wissens-, regel- und fertigkeitsbasierte Fahreraufgaben vorgenommen (vergleiche Kapitel 2.1.2). Oftmals werden die drei Fahrerebenen von RASMUSSEN den drei Hierarchieebenen zugeordnet, in einigen Veröffentlichungen wird jedoch darauf hingewiesen, dass alle Kombinationen der jeweiligen Unterteilungen denkbar sind (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Beispiele für verschiedene Fahrertätigkeiten, unterteilt nach den verschiedenen Hierarchieebenen und der Fähigkeitsunterteilungen¹

	strategische Ebene	Manöverebene	Kontrollebene
Wissen	Navigation in unbekanntem Gebiet	Ausgleichen von Schleudern	Fahranfänger
Regel	Wahl zwischen bekannten Routen	Überholen anderer Fahrzeuge	Gewöhnung an ein unbekanntes Fzg.
Fertigkeit	Route für tägliches Pendeln	Überqueren einer bekannten Kreuzung	Steuern in Kurven

Neuere Modelle beziehen sich oftmals auf das Modell der hierarchischen Struktur des Fahrerverhaltens². Diese bietet einen Erklärungsansatz für verschiedene Unzulänglichkeiten von Fahrermodellen, die sich nur auf eine hierarchische Ebene beziehen³. Gleichermaßen wird in einzelnen Veröffentlichungen auf Schwächen der hierarchischen Unterteilung hingewiesen. Hauptsächlich richtet sich die Kritik gegen die von einzelnen Autoren vorgenommene scharfe Abgrenzung der Hierarchieebenen zueinander⁴.

Eine weitere Kategorie beschreibender Fahrermodelle sind Aufgabenanalysen, die die Fahrertätigkeiten in einzelne Teilaufgaben unterteilen und katalogisieren. Dabei beruhen die meisten neueren Untersuchungen auf der Aufgabenanalyse von MCKNIGHT und ADAMS (1970), die die Gesamtheit der Fahraufgabe in 45

¹ Nach Ranney 1994.

² Vergleiche Panou et al. 2007.

³ Vergleiche Ranney 1994.

⁴ Vergleiche Jürgensohn und Kupschik 2008.

Hauptaufgaben und insgesamt mehr als 1700 Teilaufgaben („subtasks“) aufgliedern konnte.¹

2.2.2 Statistische Modellierung

Mit statistischen Fahrermodellen ist die Herangehensweise bezeichnet, mit Hilfe von gemessenen Daten und statistischen Methoden Kennwerte zum Fahrerverhalten zu generieren. Dies umfasst zum einen die Unterteilung des Fahrerverhaltens in verschiedene Fahrertypen, zum anderen die statistische Modellbildung zur Abbildung des dynamischen Verhaltens des Fahrers.

Die klassische Unfallpsychologie unterteilt Fahrertypen nach ihrem Erfahrungsgrad in erfahrene und unerfahrene Fahrer und nach ihrem Fahrstil in vorsichtige und risikobereite Fahrer². Von DEML, FREYER und FÄRBER werden in einer Literaturstudie insgesamt 26 Veröffentlichungen zur Klassifizierung des Fahrstils aufgelistet, wobei im Allgemeinen eine Unterscheidung zwischen ruhigem, normalem und sportlichem Fahren vorgenommen wird. Im Rahmen einer eigenen Untersuchung stellen die Autoren eine Korrelation zwischen der subjektiven Bewertung des Fahrstils und gemessenen Längs- und Querbeschleunigungen bei den einzelnen Fahrern fest.³

ALBRECHT nimmt eine Unterteilung von Fahrern in gemütliche, normale und sportliche Fahrer anhand experimentell ermittelter Daten vor. Ausgehend von auf einer definierten Versuchsstrecke bei freier Fahrt gewonnenen Kennwerten zu Fahrgeschwindigkeit, Gaspedalstellung, Längs- und Querbeschleunigungen, Schaltanzahl und -dauer und mittlerer Motordrehzahl wird die Menge von 23 Probanden in drei etwa gleich große Gruppen unterteilt.⁴

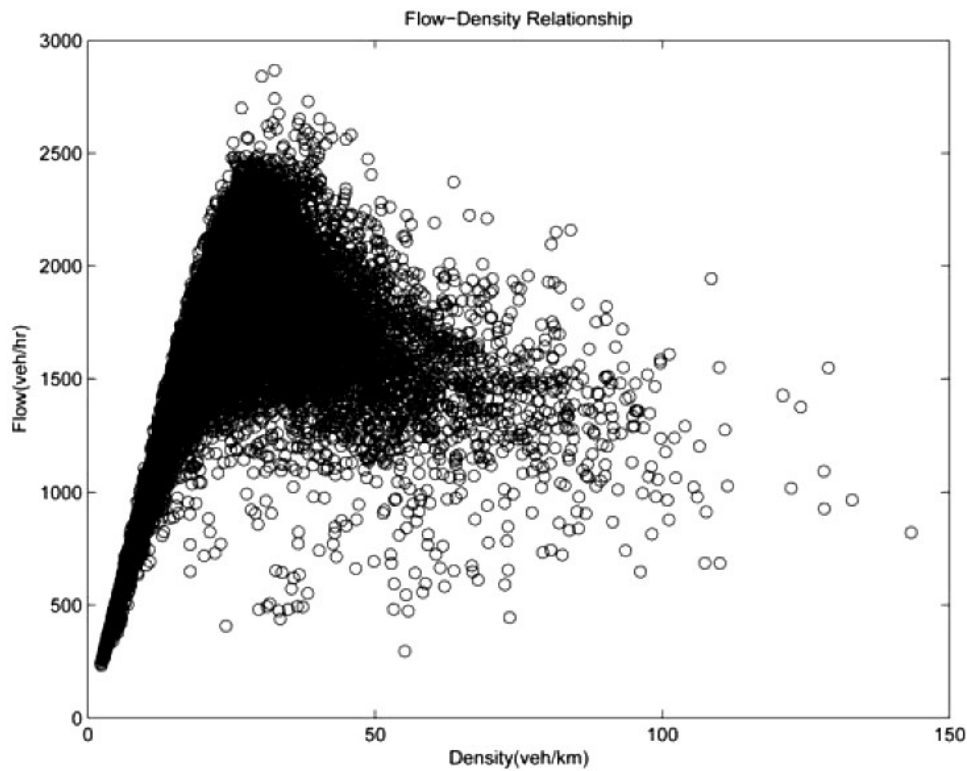
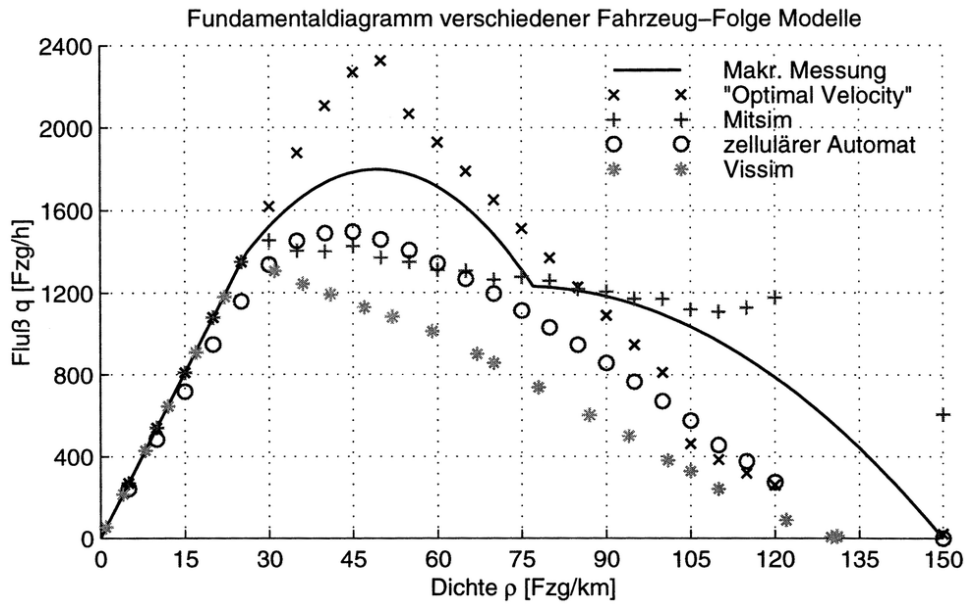
Ergänzend zur Unterteilung in Fahrertypen können über statistische Auswertungen grundsätzliche Gesetzmäßigkeiten des Verhaltens von Fahrer und Fahrzeug aufgezeigt werden. Als Beispiel kann das Fundamentaldiagramm genannt werden, das für einen bestimmten Ort einer Fahrstrecke einen Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge aufzeigt. Üblich ist beispielsweise die Darstellung der Flussrate (Fahrzeuge pro Stunde) in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte (Fahrzeuge pro Kilometer). Damit stellt es wichtige Kennwerte in der Verkehrsflussanalyse bereit (siehe Abbildung 9).

¹ Vergleiche Michon 1985.

² Vergleiche Fischer et al. 2009.

³ Deml et al. 2007.

⁴ Albrecht 2005.



Darstellung:
Verkehrsfluss
(y) über
Verkehrsdichte
(x)

Abbildung 9: Vergleich verschiedener Fahrerfolgemodelle im Fundamentaldiagramm (oben)¹ und gemessenes Fundamentaldiagramm (unten)². In der Darstellung kann jeweils unterschieden werden zwischen freiem Verkehr (ca. 0-40 Fzg/km), optimaler Streckenauslastung (40-80 Fzg/km) und stockendem Verkehr (>80 Fzg/km).

¹ Aus Bleile 1999.

² Aus Liebe et al. 2011.

Ausgehend von der Unterteilung verschiedener Fahrertypen kann eine weitergehende statistische Modellbildung erfolgen. Dabei wird das Fahrverhalten mehrerer Fahrer messtechnisch erfasst. Ausgehend von einzelnen Messungen wird über statistische Methoden das interessierende Fahrerverhalten inter- bzw. extrapoliert.

Ein Beispiel für eine statistische Fahrermodellbildung ist die 3F-Methode nach KÜÇÜKAY. Zur Bestimmung von Lastkollektiven für Getriebe und Fahrwerk werden Messungen mit verschiedenen Fahrern, Fahrtstrecken und Fahrzeugen durchgeführt (siehe Abbildung 10). Auf Basis der Messungen wird ein Fahrermodell aufgebaut, das das statistisch erfasste Fahrerverhalten in der Simulation reproduziert.¹

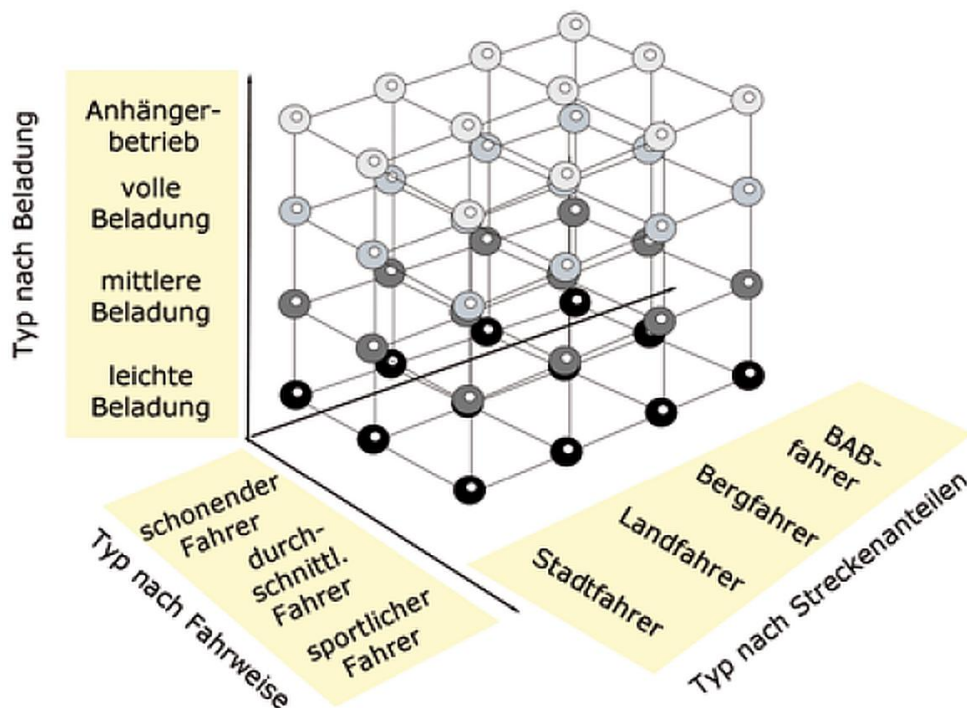


Abbildung 10: Parameterraum, der bei der 3F-Methode vermessen wird²

Das Fahrermodell in der 3F-Methode basiert dabei weitgehend auf den aus den Messdaten abgeleiteten statistischen Daten. Dabei wird die gefahrene Geschwindigkeit über ein sogenanntes Orientierungsgeschwindigkeitsprofil (OGP) abgebildet, das die konstant gefahrene Geschwindigkeit und Sprünge in dieser abbildet. Änderungen zwischen aktueller Geschwindigkeit und

¹ Vergleiche Müller-Kose 2002, Küçükay und Kassel 2007 sowie Janßen 2007.

² Aus Küçükay und Kassel 2007.

Orientierungsgeschwindigkeit werden über den Abruf einer aus den erfassten Messdaten erstellten Statistikdatenbank abgebildet (siehe Abbildung 11).

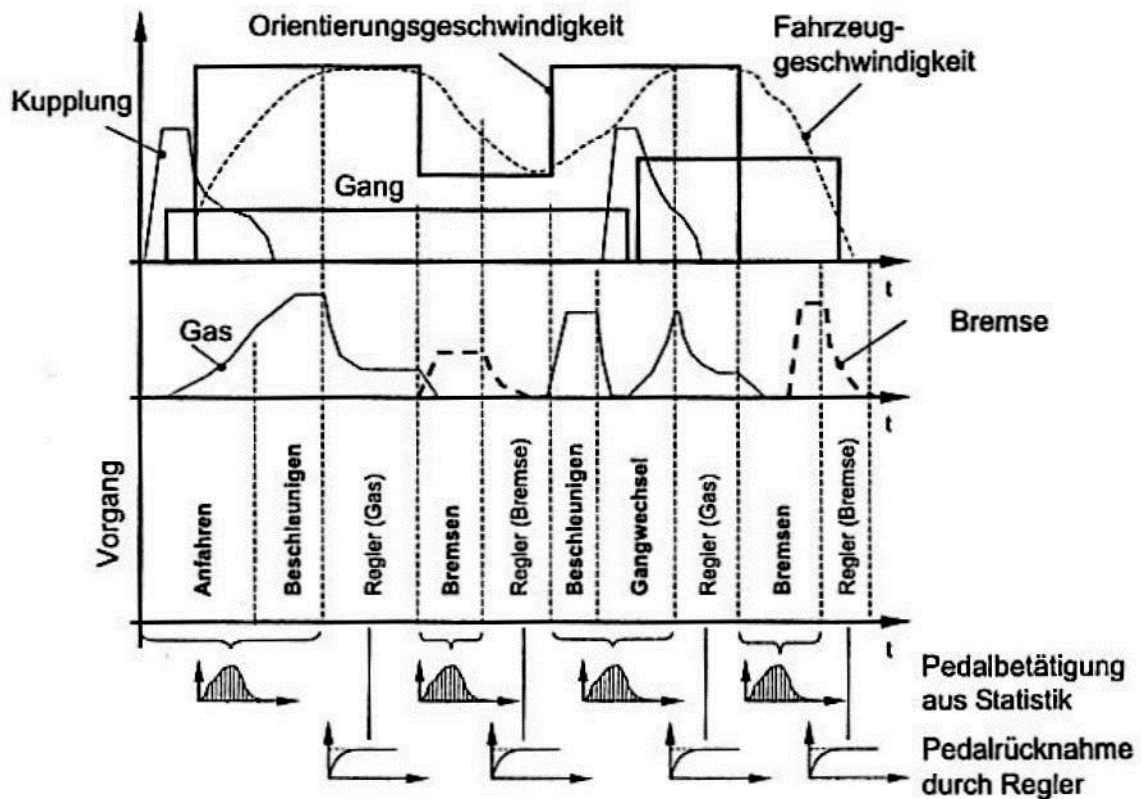


Abbildung 11: Beschreibung der Fahrermodellierung in der 3F-Methode über Orientierungsgeschwindigkeitsprofil und statistische Daten.¹

Die Stärke der statistischen Modellbildung liegt in der guten Abbildung eines einmal erfassten Parameterbereichs. Nur begrenzt möglich ist die Vorhersage des Fahrerverhaltens in nicht vermessenen Parameterbereichen (beispielsweise in der 3F-Methode die Extrapolation auf andere Fahrzeugklassen oder die Bewertung von Phänomenen, die nur begrenzt mit den statistischen Daten abbildbar sind wie beispielsweise seltene Missbrauchsmanöver²).

¹ Aus Müller-Kose 2002.

² Vergleiche Küçükay und Kassel 2007

2.2.3 Reglermodelle

Historisch haben sich Reglermodelle des Fahrers ausgehend von der Betrachtung des Fahrerverhaltens als mechanisches Modell entwickelt (erste Veröffentlichungen in den 1950er-Jahren modellieren das Verhalten mehrerer Fahrzeuge im Verbund analog zum Verhalten eines inkompressiblen Fluids, in dem sich Wellen ausbreiten).¹ Lineare Reglermodelle ermöglichen die Beschreibung der Quer- und Längsführung über vorhandene Methoden der Regelungstechnik.

Bezüglich der Querführung des Fahrzeugs kann gezeigt werden, dass die Betrachtung der Abweichung von der Sollspur nicht für eine stabile Regelung ausreicht. Verschiedene Untersuchungen zum Spurhalteverhalten von menschlichen Fahrern legen nahe, dass diese den Fahrkurs über einen Nah- und einen Fernpunkt regeln, die entlang der zu fahrenden Strecke platziert werden (siehe Abbildung 12).²

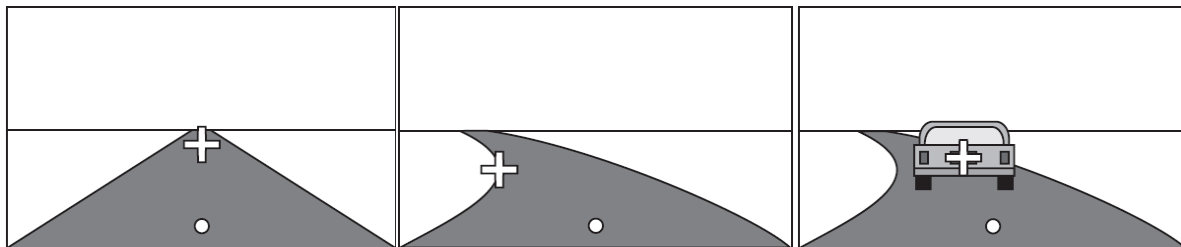


Abbildung 12: Illustration des Blickverhaltens mit Nahpunkt o und Fernpunkt +³

Dabei beziehen sich die gebräuchlichen Reglermodelle ausschließlich auf die untere hierarchische Ebene des Fahrerverhaltens, die dementsprechend auch oftmals als Stabilisierungsebene bezeichnet wird. Die übergeordnete Manöver- bzw. Bahnplanungsebene (vergleiche Abbildung 8) wird in einigen Ansätzen als Optimierungsproblem betrachtet und von der Regleraufgabe getrennt gelöst. Des Weiteren wird im Allgemeinen eine Trennung von Quer- und Längsführung des Fahrzeugs in separate Regelungssysteme vorgenommen.⁴

Neuere Regleransätze verwenden nichtlineare Regler, um die Beschränkungen der linearen Ansätze zu umgehen. Je nach Anwendungsbereich werden auch Fuzzy-Logic-Regler (beispielsweise in der Verkehrsflusssimulation PELOPS oder dem

¹ Vergleiche Michon 1985

² Siehe Plöchl und Edelmann 2007.

³ Aus Salvucci 2006.

⁴ Vergleiche Albers et al. 2013b.

IPG.Driver-Fahrermodell¹⁾) und neuronale Netze eingesetzt. Zusätzlich beinhalten viele Ansätze auch antizipatorische Regleranteile, die das vorausschauende Handeln des Menschen abbilden sollen. Jürgensohn liefert einen umfassenden Überblick über Vor- und Nachteile der einzelnen Modellierungsverfahren. Gleichzeitig weist der Autor auch auf Kritik an der Reglerannahme hin, die zu Widersprüchen insbesondere bezüglich des Handelns des Menschen in Grenzsituationen führt²⁾.

Die Stärke der Fahrermodellierung über ein Reglermodell liegt in der direkten Anwendbarkeit in dynamischen Simulationen im Zeitbereich und der Reproduzierbarkeit der generierten Ergebnisse. Somit ist über ein Reglermodell beispielsweise die Optimierung der Fahrdynamik auf ein durch einen Satz an Reglerparametern definiertes Fahrerverhalten möglich.³⁾

2.2.4 Motivationsgetriebene Fahrermodelle

Motivationsgetriebene Fahrermodelle arbeiten auf Basis von Annahmen über die Motivation des Fahrers. Konkreter nehmen Motivationsmodelle ein Schema an, nach dem der Fahrer seine Handlungen wählt.

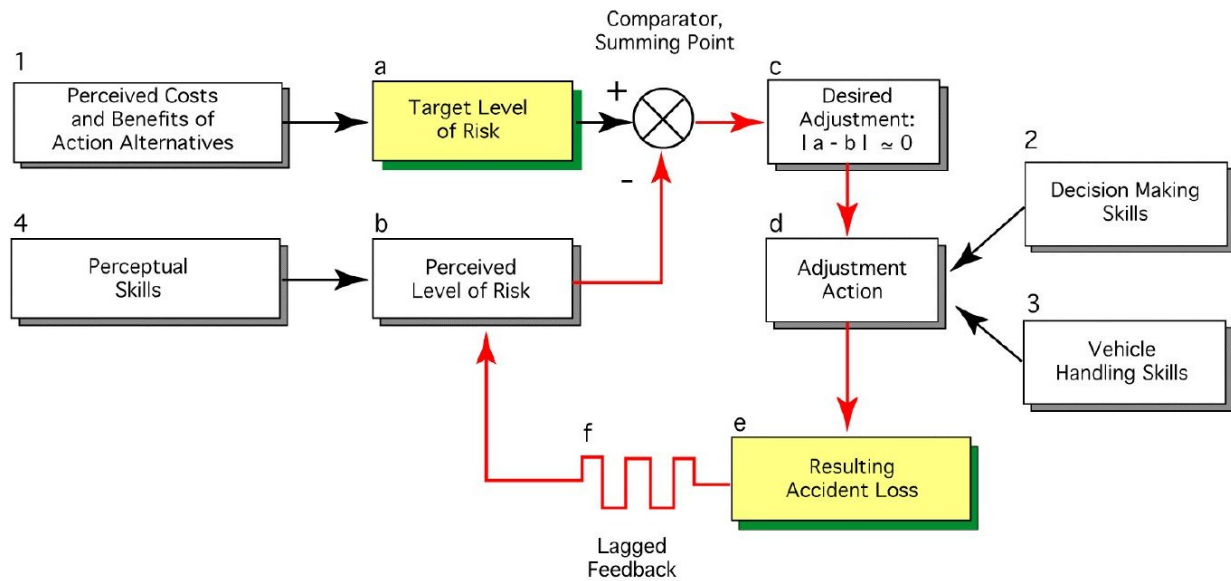
In der klassischen Forschung zur Unfallprävention finden sich verschiedene Motivationsmodelle, bekanntester Vertreter ist die Theorie der Risikokompensation nach WILDE. Die Theorie unterstellt, dass der Fahrer seine Geschwindigkeit so wählt, dass das subjektiv empfundene Risiko konstant bleibt. Bei dem Einbau zusätzlicher Sicherheitssysteme wird das subjektiv empfundene Risiko sinken und der Fahrer sein Fahrverhalten entsprechend dem Schema in Abbildung 13 anpassen, um das Risiko wieder auf den ursprünglichen Wert anzuheben.⁴⁾

¹⁾ Angaben aus Jürgensohn 1997, vergleiche auch Wurster & Schick 2010

²⁾ Jürgensohn 1997

³⁾ Siehe beispielsweise Fischer et al. 2009 für einen Vergleich verschiedener Fahrdynamikregelsysteme für einen als Reglermodell abgebildeten Fahrer beim doppelten Spurwechsel.

⁴⁾ Siehe Wilde 1982.

Abbildung 13: Diagramm der Risikokompensationstheorie nach WILDE¹

Ausgehend von den getroffenen Modellannahmen können weitergehende Aussagen abgeleitet werden. Im Bereich der Verkehrssicherheit ergeben sich so etwa Ansatzpunkte zur Reduzierung der Unfallrate. MICHON listet verschiedene Motivationsmodelle in diesem Anwendungsbereich auf und weist auf die schwierige Verifizierbarkeit der Modelle und Widersprüchlichkeit der Ergebnisse hin².

Als Untergruppe der motivationsgetriebenen Fahrermodelle existiert der Bereich optimaltheoretischer Modelle. Verschiedene Untersuchungen stützen die Annahme, dass Menschen bei häufig absolvierten Handlungen zeitoptimale Handlungsabläufe anwenden. JÜRGENSOHN nennt verschiedene Beispiele für dieses Verhalten, beispielsweise auch das Lenkverhalten von trainierten Testfahrern beim doppelten Spurwechsel nach DIN-ISO 3888-1 (siehe Abbildung 14).

Aus der Annahme geeigneter Optimierungskriterien, auf die der Mensch sein Handeln trainiert, können geeignete Parameter für Reglermodelle hergeleitet werden (beispielsweise im optimaltheoretischen Modell nach BARON, KLEINMANN und LEVISON 1970³). Auch kann über einen Optimierungsansatz direkt eine Modellierung des Fahrerverhaltens vorgenommen werden. So beschreibt BUTZ das Fahrerverhalten beim doppelten Spurwechsel über eine direkte Optimierung (siehe Abbildung 15)⁴.

¹ Aus Wilde 2007.

² Michon 1985.

³ Vergleiche hierzu Irmscher 2001

⁴ Butz 2005

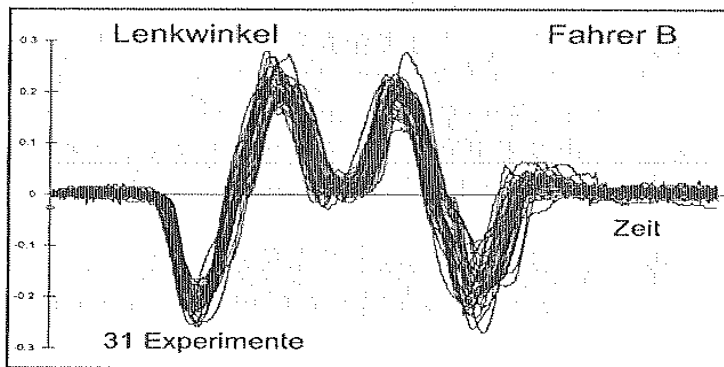
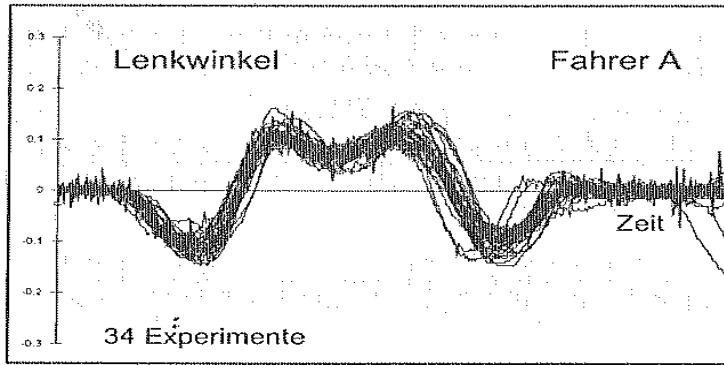


Abbildung 14: Mehrfach wiederholte Lenkwinkelverläufe zweier Testfahrer beim Closed-Loop-Test doppelter Spurwechsel ¹

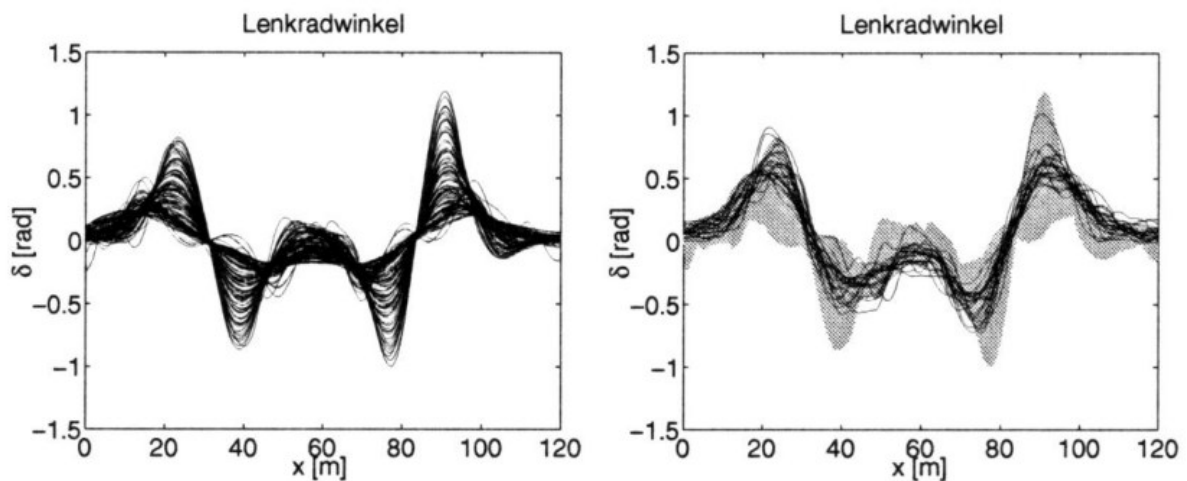


Abbildung 15: Vergleich zwischen dem nach verschiedenen Optimierungskriterien berechneten Lenkradwinkel (links) und dem gemessenen Lenkradwinkel (rechts) für mehrere Fahrer beim doppelten Spurwechsel ²

¹ Aus Jürgensohn 1997

² Aus Butz 2005.

2.2.5 Kognitive Fahrermodelle

MICHON schlägt als Lösungsansatz für verschiedene Probleme der verfügbaren Fahrermodelle eine kognitive Modellbildung für das Fahrerverhalten vor¹. Die kognitive Psychologie entstand in den 1960er-Jahren durch Fortschritte in der Informatik und Forschung zu künstlicher Intelligenz als Alternative zu behavioristischen Verhaltensmodellen und beschreibt die menschliche Handlung durch ein System von Arbeitsspeicher (Situationsbewusstsein und Kurzzeitgedächtnis), Langzeitspeicher (Wissen und Fähigkeiten) und Interpreter (Handlungswahl des Menschen, vergleiche zum Schema kognitiver Modelle Kapitel 2.1.2). IRMSCHER liefert eine Übersicht zur historischen Entwicklung und zu verschiedenen Modellierungsverfahren².

Zur kognitiven Modellierung von Fahrern sind verschiedene Umgebungen verfügbar, in der Fahrermodelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad implementiert wurden. Die Modelle sind auf einzelne Einsatzgebiete beschränkt, beispielsweise die Fahrt auf einer Autobahn mit mittlerer Verkehrsdichte bei ACT-R³. BERGER erstellt ein kognitives Fahrermodell für Schienenfahrzeuge und liefert dazu einen Vergleich der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Modellumgebungen (siehe Abbildung 16).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass aktuell kein Fahrermodell vorliegt, das ein umfassendes Spektrum verschiedener Fahrsituationen vom Rangieren über Bahnplanung an Ampeln und Kreuzungen bis hin zu Fahrt auf offener Strecke abdeckt. DILLMANN verweist in diesem Zusammenhang darauf, dass mit steigendem Funktionsumfang die Anzahl der zu integrierenden Programmroutinen exorbitant ansteigt. Demnach gehe der Trend in der aktuellen Forschung, beispielsweise beim aktuell stattfindenden Human Brain Project, allgemein zu einer Beschreibung des menschlichen Verhaltens durch die Modellierung von neuronalen Netzen (anstelle der in Kapitel 2.1.2 diskutierten Modellierung über Produktionen).⁴

¹ Michon 1985.

² Irmscher 2001.

³ Siehe Salvucci 2006.

⁴ Dillmann 2015.

Theorien	verifiziert?	als Fahrermodell umgesetzt?	echtzeitfähig?	Annahmen zur Absichtsregulation enthalten?
PSI	mittels Versuchspersonen	ja	nicht beschrieben	ja
ACT-R	mittels Versuchspersonen	ja	ja	ja, zielgerichtetes jedoch unmotiviertes Verhalten
SOAR 7	ja	ja	nein	ja, zielgerichtetes jedoch unmotiviertes Verhalten
ACME	ja, Versuchspersonen	ja	nein	nicht beschrieben
AMBR	ja	nicht bekannt, Umsetzung in Luftfahrt	ja	nicht bekannt
NEH	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt
Neuronale Netze (nN)	ja	ja	nicht bekannt	nein
mentales Referenzmodell (mR) nach JANHSEN	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht beschrieben	nicht beschrieben

Abbildung 16: Überblick über verschiedene kognitive Architekturen mit Fahrermodellen¹

2.2.6 Wahrnehmung und Komfortbewertung des Fahrers

Ergänzend wird im Folgenden ein Überblick über die Grundlagen zur menschlichen Wahrnehmung gegeben. Der Fahrer nutzt die über die Sinnesorgane aufgenommenen Informationen zur Bildung einer internen Repräsentation der Umgebung als *mentales Modell*. Dabei wird die Wahrnehmung der einzelnen Sinne zu einer „in sich konsistenten, internen Repräsentation des Fahrzeugs und der Umgebung“² verschmolzen.

Der Fähigkeit des Menschen, seine Umgebung wahrzunehmen, sind zwangsläufig Grenzen gesetzt. Verschiedene Grenzwerte für die Auflösung der menschlichen Wahrnehmung werden in der Literatur angegeben.

¹ Aus Berger 2007.

² Schreiner 1999.

MACADAM nennt verschiedene allgemeine Werte zur Auflösung der menschlichen Wahrnehmung: ¹

0.005 g lineare Beschleunigung	Vestibularapparat im Innenohr
0.1 °/s ² Drehbeschleunigung	Bogengänge im Vestibularapparat
5 mg (Messung über Von-Frey-Haar)	Taktil – weibliches Gesicht
355 mg (Messung über Von-Frey-Haar)	Taktil – männlicher Zeh
0.0002 Dyn/cm ²	Gehör
(0.63 Dyn/cm ² entspricht einem üblichen Gespräch)	

SCHREINER trägt verschiedene Ergebnisse zur Wahrnehmung als Fahrer zusammen. Im Vergleich zeigt sich, dass die Grenzwerte unter realen Fahrbedingungen deutlich über den von MACADAM angegebenen Grenzwerten liegen: ²

Beschleunigung: 0.01 bis 0.02 g	gemäß	BUBB,	1977
Längsgeschwindigkeit: auf ca. 10 km/h genau anhand der Wahrnehmung von Fahrzeug und Umgebung	gemäß	BUBB,	1977
Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug: bis 50m relativ genau, anschließend wird der Abstand oftmals überschätzt	gem.	GODTHELP,	1984

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Wahrnehmung von objektiven Kennwerten zu Fahrzeug und Umgebung durch den Fahrer starken Begrenzungen unterliegt. Es ist anzunehmen, dass der Fahrer sich dieser Einschränkung selbst bewusst ist und das eigene Fahrverhalten mehr an subjektiven Zielwerten als an objektiven Grenzen orientiert. Ergänzend zu den erfassten Grenzwerten wird die Wahrnehmung von Fahrzeug und Umgebung durch verschiedene Anzeigen am Fahrzeug unterstützt (Tachoanzeige, Kilometerzähler, Bremslichter am Vorderfahrzeug).

Die subjektive Bewertung durch den Fahrer steht in einer Beziehung zu den allgemeinen Fähigkeiten zur Wahrnehmung. In der Praxis der Automobilentwicklung wird dem Kundenurteil hinsichtlich Fahrverhaltens, das die Kundenakzeptanz eines Gesamtfahrzeugs und damit seine Marktchancen beeinflusst, ein hohes Gewicht eingeräumt. Eine Vorhersage des erwarteten Kundenurteils wird im Allgemeinen durch die Bewertung über professionelle Testfahrer vorgenommen, die die subjektive

¹ Auflistung aus MacAdam 2003.

² Werte aus Schreiner 1999 zusammengestellt.

Bewertung anhand von Notenskalen für verschiedene Kennwerte in den Bereichen „Komfort“, „Handling“ und „NVH“ abbilden.¹ Dabei kann bei der Bewertung von NVH (Noise, Vibration, Harshness) zwischen Komfort und Diskomfort getrennt werden, die nicht auf einer linearen Skala liegen, sondern als orthogonale Größen beschrieben werden (die Abwesenheit von Diskomfort führt beispielsweise nicht zwangsläufig zu Komfort).²

JÜRGENSOHN nennt als Beurteilungskriterien für den Fahrer sechs Bewertungsbereiche, die in die beiden Untergruppen „Motivationale Wertung“ (Erfüllungsspaß, subjektives Risiko und Anstrengung) und „Gütemerkmale“ (Handlungsfreiheit, Vorhersehbarkeit und Fehlertoleranz) unterteilt werden können³. Die Auflistung unterstreicht die Annahme, dass diese Bewertungskriterien gleichzeitig auch für die Wahl des eigenen Fahrbereichs durch den Fahrer herangezogen werden können. Das Kundenurteil durch den Fahrer kann als beobachtende Instanz begriffen werden, die das Closed-Loop-System Fahrer-Fahrzeug-Umgebung beobachtet. Der Fahrer ist somit gleichzeitig Teil des Regelkreises und bewertender Beobachter (dieser Dualismus gilt in schwächerem Maß auch für den Beifahrer).

Bei der Aufteilung des Fahrers in einen bewertenden und handelnden Fahrer gibt es eine Verknüpfung der beiden Bereiche (vergleiche „perception“ in Abbildung 17). So liegt die Annahme nahe, dass der Fahrer in seinem Fahrverhalten einen Betriebsbereich wählt (Handlung), den er in seiner subjektiven Bewertung als besonders angenehm empfindet (Bewertung). Die Schwierigkeit, diesen Bereich zu finden (Handlung) fließt auch in das subjektive Urteil (Bewertung) bei einem Fahrzeug ein. Das legt eine Abhängigkeit des Urteils von der vorangegangenen Erfahrung des Fahrers nahe – beispielsweise eine Unzufriedenheit über einen leicht abwürgbaren Benzinmotor durch einen Fahrer, der an Dieselfahrzeuge gewöhnt ist.

Die Verbindung von bewertendem und handelndem Fahrer zeigt die Möglichkeit auf, Forschungsergebnisse und Erkenntnisse zur Objektivierung des Komfortempfindens des Fahrers auch bei der Erarbeitung von Handlungsmodellen des Fahrers zu berücksichtigen. Eine direkte Übertragbarkeit ist jedoch nicht zwingend gegeben –

¹ Vergleiche Jürgensohn 1997 sowie Albers und Lerspalungsanti 2010

² Siehe Albers und Lerspalungsanti 2010

³ Jürgensohn 1997.

insbesondere ist die Übertragbarkeit von aus Open-Loop-Tests hergeleiteten Modellen auf das Fahrerverhalten im Closed-Loop kritisch zu hinterfragen.¹

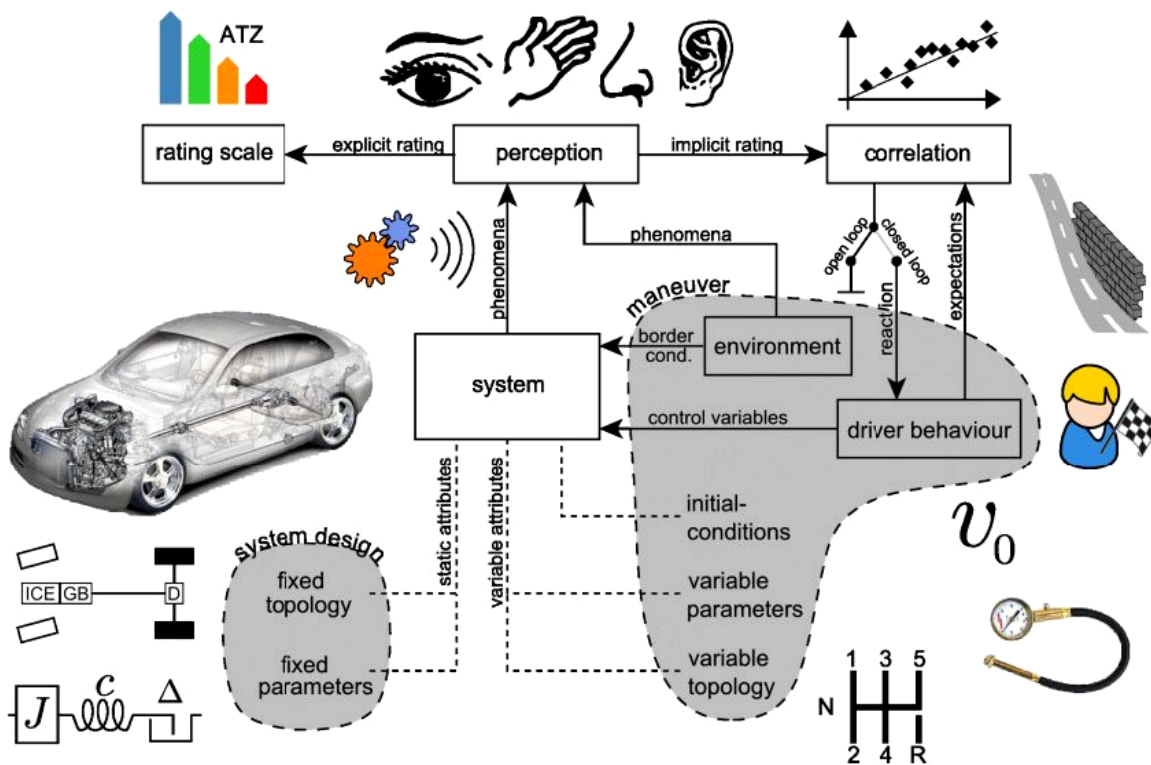


Abbildung 17: Fahrerverhalten innerhalb des Handlungsfelds „Manöver“²

¹ „Open loop“ und „Closed loop“ beziehen sich auf das System eines Regelkreises. „Open loop“ bezeichnet Manöver, bei denen der Fahrer rein steuernd handelt, „Closed loop“ bezeichnet einen geschlossenen Regelkreis, bei dem der Fahrer die Entwicklung des Zustands von Fahrzeug und Umgebung in seine Handlungen kontinuierlich einfließen lässt (siehe Abbildung 17)

² Aus Albers et al. 2010

2.3 Entwicklungsmethodik und Bauteilvalidierung

Die Zielsetzung in der vorliegenden Arbeit ist die Vorhersage des Fahrerverhaltens als Werkzeug innerhalb des Produktentstehungsprozesses von Fahrzeugantriebsstrangkomponenten. Die entwickelten Methoden orientieren sich darum an den Anforderungen und Prozessen innerhalb der Produktentwicklung und den Möglichkeiten und Erfordernissen bei der Bauteilerprobung als einem Teil der Validierung.

In der weiteren Arbeit werden die von ALBERS entwickelten Metamodelle iPeM (integriertes Produktentstehungsmodell) und XiL (X-in-the-Loop) zur Beschreibung der Produktentstehung und Validierung als Referenzrahmen herangezogen. Eigene Ergebnisse werden in diese Modelle eingeordnet und an ihnen diskutiert. Darum wird hier ein kurzer Überblick über die berücksichtigten Modelle gegeben.

2.3.1 Das integrierten Produktentstehungsmodell iPeM

Zur Abbildung des Produktentstehungsprozesses (PEP) sind verschiedene Modelle gebräuchlich. MEBOLDT und BRAUN diskutieren in diesem Zusammenhang: ¹

- VDI-Richtlinie 2221
- Stage-Gate-Model nach COOPER
- V-Modell der VDI-Richtlinie 2206
- Fuzzy-Stage-Gate-Ansatz nach COOPER
- Produktentstehung als Netzwerk verschiedener Zyklen nach Gausemeier
- Systems Engineering Ansatz nach ZÜST
- Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM) und Münchner Vorgehensmodell (MVM)

Eine ausführliche Diskussion der verschiedenen Modelle erfolgt beispielsweise durch BRAUN². Diese Arbeit bezieht sich auf das „*integrierte Produktentstehungsmodell*“ (iPeM) nach ALBERS³. Dieses beschreibt den Produktentstehungsprozess über die Wechselwirkungen im ZHO-Tripel Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem.

¹ Siehe Meboldt 2008 sowie Braun 2013.

² Braun 2013

³ Siehe Albers und Meboldt 2007 sowie Albers 2010,

Demnach besteht der PEP in dem Prozess, das Zielsystem, in dem die Menge aller Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt beschrieben sind, in ein Objektsystem zu überführen. Das Objektsystem beinhaltet die während der Entwicklung entstandenen Artefakte wie das entwickelte Produkt, erzeugte Berechnungsmodelle und Messdaten. Diese Überführung findet durch das Handlungssystem statt, das unter anderem die Produktentwickler in ihrem jeweiligen Umfeld beinhaltet.

Im iPeM wird der Produktentstehungsprozess in verschiedene Aktivitäten unterteilt (siehe Abbildung 18). Da jeder Produktentstehungsprozess einzigartig ist¹, handelt es sich bei der Liste verschiedener Aktivitäten nicht um eine vorgegebene Reihenfolge. Die Unbestimmtheit innerhalb der Produktentwicklung erfordert vielmehr ein zyklisches, iteratives Vorgehen, bei dem sich die einzelnen Aktivitäten der Produktentstehung als während der Produktentwicklung erfolgende, zueinander in Relation stehende Problemlösungsprozesse darstellen.

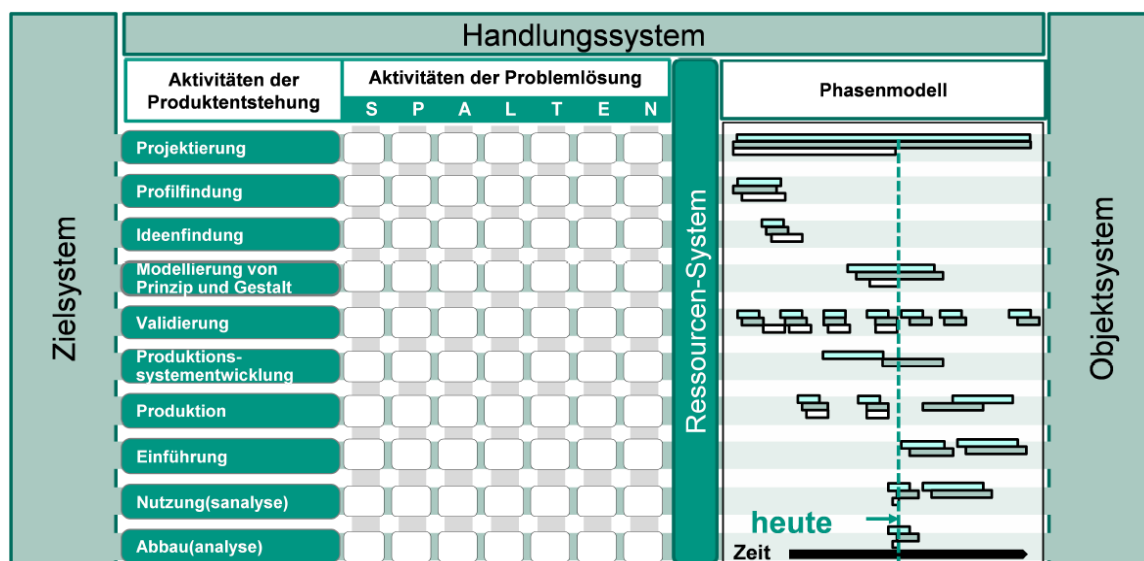


Abbildung 18: Visualisierung des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)². Das rechts dargestellte Phasenmodell zeigt anhand mehrerer, exemplarisch dargestellter Entwicklungsprozesse die Parallelität und Iteration der einzelnen Aktivitäten.

¹ Vergleiche Albers 2010

² Albers und Braun 2011.

Die während der einzelnen Aktivitäten der Produktentstehung ablaufenden Problemlösungsprozesse werden durch die SPALTEN-Methodik nach ALBERS abgebildet¹, einem Modell zur Beschreibung eines generalisierten Problemlösungsprozesses. Das Akronym SPALTEN steht für die einzelnen Schritte, die während des Problemlösungsprozesses durchlaufen werden (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Beschreibung der einzelnen Schritte der SPALTEN-Methodik²

SPALTEN-Methodik	Beschreibung
Situation analysieren	Sammlung geeigneter Daten zur Beschreibung der Situation.
Problem eingrenzen	Eingrenzung und Analyse der vorliegenden Daten, Beschreibung der Abweichung zwischen Zielzustand und aktueller Situation
Alternativen aufzeigen	Suche und Beschreibung möglicher Lösungen für das bestehende Problem
Lösung auswählen	Auswahl einer geeigneten Lösung aus den im vorherigen Schritt bestimmten Optionen
Tragweite analysieren	Analyse von Risiken und Chancen der gewählten Lösung
Einführen und umsetzen	Implementieren der gewählten Lösung
Nachbereiten und lernen	Aufnehmen der gesammelten Erfahrung entsprechend eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses

Dabei stellt SPALTEN einen fraktalen Prozess dar: Die einzelnen Schritte können jeweils wiederum als SPALTEN-Prozess beschrieben werden. Zusätzlich wird ein iteratives Vorgehen berücksichtigt, wobei nach jedem Schritt ein Informationscheck ausgeführt wird und einzelne Schritte mehrfach durchlaufen werden können oder je nach vorliegenden Informationen auch einzelne Schritte bei bestimmten Anwendungsfällen komplett entfallen.³

Der Fokus auf das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM in dieser Arbeit ist neben der direkten Einordnung der Zielsetzung in die Gesamtforschung am IPEK

¹ Vergleiche Albers 2010 sowie Albers et al 2005.

² Nach Albers et al 2005.

³ Vergleiche Albers et al 2005.

auch dadurch motiviert, dass das iPeM die Thematik der Validierung besonders berücksichtigt. Diese stellt nach ALBERS die zentrale Aktivität eines Produktentstehungsprozesses dar, woraus sich eine besondere Bedeutung innerhalb des iPeM ergibt¹. Somit stellt das iPeM einen geeigneten Referenzrahmen bereit, anhand dem die Wechselwirkungen zwischen dem gesamten Prozess der Produktentwicklung und dem Aufbau von Fahrermodellen diskutiert werden können (vergleiche beispielsweise Kapitel 8.5).

2.3.2 Das X-in-the-Loop-Framework zur Bauteilvalidierung

Die Auslegung und Erprobung von Komponenten in der Fahrzeugentwicklung findet klassisch über Methoden der virtuellen und physischen Erprobung statt (beispielsweise Auslegungsrechnungen, Simulationen, Prüfstands- und Fahrzeugtests). Ausgehend von der zunehmenden Systemkomplexität und den stetig verkürzten Entwicklungszeiten zielt das X-in-the-Loop-Framework (XiL) auf eine durchgehende Metamodellierung von Validierungsstrukturen unter Berücksichtigung der verschiedenen Validierungsmethoden ab.² Diese werden hier am Beispiel der Fahrzeugentwicklung diskutiert, sind in sinngemäßer Form aber auch auf andere Anwendungsbereiche übertragbar.³

ALBERS ET AL. leiten ausgehend von der aktuellen Praxis der Fahrzeug- und Antriebsstrangentwicklung verschiedene Anforderungen für das XiL-Framework her:⁴

- Berücksichtigung der Kopplung zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt
- Anpassung der verwendeten Teilmodelle an den jeweiligen Entwicklungsstand des Gesamtsystems Fahrzeug
- Verwendung einer offenen Architektur, die die Integration vorhandener Werkzeuge und Methoden ermöglicht
- Die Möglichkeit zur Betrachtung und Überwachung von sowohl physischen als auch virtuellen Systemteilen, die durchgehend gegeben sein muss.
- Verwendung einer klaren Struktur zur Klassierung und Einordnung vorliegender Ergebnisse, die so innerhalb der Entwicklungsumgebung verfügbar sein müssen.

¹ Albers 2010. Vergleiche hierzu auch die Darstellung des Phasenmodells in Abbildung 18.

² Vergleiche Albers und Düser 2008 sowie Albers et al. 2013a

³ Vergleiche Matthiesen et al. 2015 für eine Anwendung im Bereich handgeführter Geräte am Beispiel eines Akku-Kombihammers.

⁴ Albers et al. 2013a

- Beinhaltung geeigneter Methoden zur Optimierung des Gesamtsystems

Das XiL-Framework beschreibt die Validierungsumgebung durch die miteinander interagierenden Elemente „System in development“, „Restfahrzeug“, „Fahrer“ und „Umwelt“. In jedem der Bereiche werden physische oder virtuelle Modelle eingesetzt, die in der Validierung entweder offline (Model-in-the-Loop) oder online als Echtzeitsystem (Hardware-in-the-Loop) miteinander gekoppelt werden. Das jeweilige Validierungssystem ist somit über die Ausgestaltung der einzelnen Teilsysteme sowie die betrachteten Manöver und Testfälle beschrieben (siehe Abbildung 19).

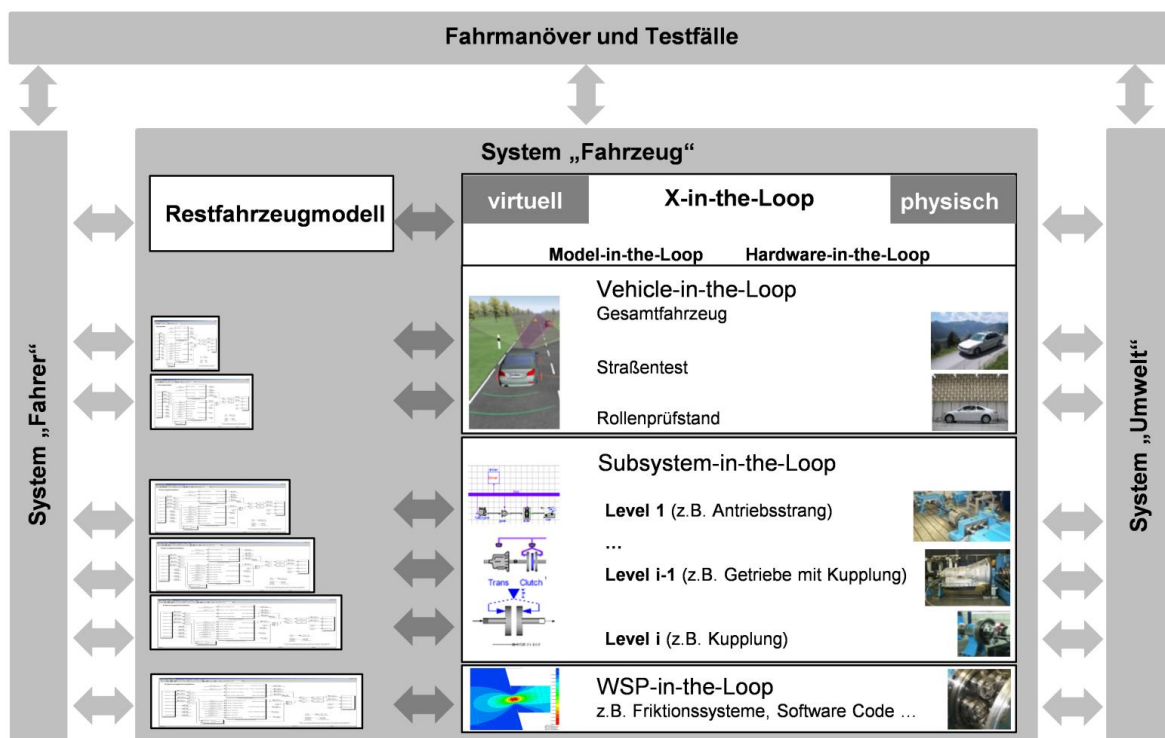


Abbildung 19: Darstellung des IPEK X-in-the-Loop-Frameworks¹

Die Struktur des XiL-Frameworks ermöglicht die Beschreibung von virtueller und physischer Erprobung für beliebige Detaillierungsgrade zwischen einzelnen Wirkflächenpaaren (WSP-in-the-Loop) über Komponenten und Antriebsstrangbestandteile bis hin zum Gesamtfahrzeug. Je nach zu untersuchender

¹ Aus Albers und Düser 2008

Fragestellung müssen geeignete Modellierungen zur Abbildung der einzelnen Systemteile gewählt werden. ¹

Die vorliegende Arbeit bezieht sich direkt auf das im XiL-Framework vorgesehene System „Fahrer“. Dieses steht in Wechselwirkungen zu den weiteren abzubildenden Modellanteilen System in development (zu betrachtendes Bauteil, für das Lastkollektive ermittelt werden sollen), Restfahrzeugmodell, Umwelt sowie den betrachteten Manövern und Testfällen.²

Die im Rahmen von Fragestellungen der Fahrermodellierung entstehenden Anforderungen lassen sich am XiL-Framework abbilden und diskutieren:

Die *Bestimmung und Analyse realen Fahrerhaltens* erfordert die Abbildung des Systems „Fahrer“ als realer, menschlicher Fahrer, während die weiteren Systembereiche „Fahrzeug“ und „Umwelt“ sowie die betrachteten Manöver und Testfälle je nach betrachteter Fragestellung entweder als physisches System oder über die virtuelle Umsetzung einzelner oder aller weiteren Systemteile umgesetzt werden können.

Die *Ermittlung von Bauteilbelastungen* erfolgt idealerweise über die Betrachtung einer großen Menge verschiedener Fahrer für nennenswerte Anteile der Gesamtfahrzeugnutzung, was die Durchführung einer rein virtuellen Erprobung nahelegt. Durch die Umsetzung als rein virtuelles System ist die Erprobung nicht an Abläufe in Echtzeit gebunden und kann bei geeignetem Modellaufbau stark beschleunigt ablaufen.

Die Bewertung der in einer Simulation ermittelten Bauteilbelastung und somit die Rückführung der rein virtuellen Berechnungsergebnisse (beispielsweise dynamische Momenten- oder Kraftverläufe) erfolgt über verschiedene Methoden der Betriebsfestigkeit. Über Verfahren wie die Klassierung von Belastungen nach dem Rainflow-Verfahren und den Abgleich mit vorliegenden Bauteil- oder Werkstoffwöhlerkurven wird die Ermittlung eines Schädigungskennwerts und die Ermittlung einer Betriebsdauer bis zum Bruch eines Bauteils für ein gegebenes Belastungsprofil ermöglicht.

¹ Siehe beispielsweise Albers et al. 2016 für verschiedene Anwendungsbeispiele zur Nutzung des XiL-Frameworks

² Grundsätzlich kann auch der Fahrer als zu untersuchendes Teilsystem angesehen werden (vergleiche Albers et al. 2013a). Zielt die Validierungsaktivität nicht auf die Entwicklung eines Teilsystems sondern auf die Gewinnung von Wissen ab ist der Begriff „System under Investigation“ zielführender (vergleiche Albers et al. 2016).

3 Motivation und Zielsetzung

3.1 Motivation

Bei der Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Haltbarkeit und Lebensdauer der Bauteile, die beispielsweise über die Vorgabe einer zu erreichenden Laufleistung abgebildet werden¹. Typische Werte in der Automobilindustrie sind hier Laufleistungen von 200 000 bis 350 000 km je nach Hersteller. Die Eignung des entwickelten Systems für die geforderte Laufleistung muss im Rahmen einer geeigneten Validierung abgeprüft werden. Diese Validierung von Antriebsstrangkomponenten wird über die Anwendung des X-in-the-Loop-Frameworks allgemein beschrieben und erfolgt sinnvollerweise unter Berücksichtigung des Gesamtsystems Fahrer, Fahrzeug und Umwelt (vergleiche Kapitel 2.3.2).

Die Abbildung des Fahrers als realer Mensch, der ein reales oder virtuelles Fahrzeug testet und in diesem Zusammenhang eine Bewertung der Bauteilfunktion und -belastung ermöglicht, führt jedoch zu verschiedenen Anforderungen an die Testumgebung – hier können die Vorlage physischer Prototypen bei einer realen Erprobung oder eines echtzeitfähigen Systems bei einem Driver-in-the-Loop-Ansatz genannt werden. Gerade bei der Betrachtung von Lastkollektiven und Bauteilbelastungen ist eine *Abbildung des Fahrers als Simulationsmodell (Fahrermodell)* wünschenswert, um die Begrenzungen der realen Testumgebung zu umgehen.

Um diesem Einsatzziel gerecht zu werden, muss ein Fahrermodell die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Anwendungsmöglichkeit in frühen Stadien der Produktentwicklung.
- Ausreichend gute Modellgüte bezüglich der Vorhersage des Fahrerverhaltens bezogen auf die für Bauteilschädigung relevanten Kenngrößen.
- Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Komponente, Gesamtsystem und Fahrer, insbesondere des Adaptionsverhaltens des Fahrers an das Fahrzeugverhalten.

Bisherige Ansätze werden diesen Anforderungen nur begrenzt gerecht. In der Praxis erfolgt die Auslegung von Bauteilen in vielen Fällen auf Basis von pauschalen Auslegungsrichtlinien ohne Berücksichtigung des Fahrereinflusses. In einzelnen Fällen werden über statistische Auswertemethoden auf Basis vorangegangener Messungen Lastkollektive generiert². Insgesamt kann jedoch festgehalten werden, dass die in der Literatur verfügbaren Fahrermodelle die oben genannten Anforderungen nicht erfüllen.

Mit dem aufgezeigten Bedarf an Simulationsmöglichkeiten zur Bauteilvalidierung, die für die Produktentwicklung von Antriebsstrangkomponenten auch das Fahrerverhalten beinhalten, ergibt sich die Zielsetzung dieser Arbeit, die im Folgenden ausführlicher behandelt wird. Dabei konzentriert sich diese Arbeit auf die Problematik der Ermittlung und Modellierung des Fahrerverhaltens hinsichtlich Bauteilbelastungen und Lastkollektive.

3.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die *Entwicklung von Methoden und Modellen, die das individuelle Verhalten des einzelnen Fahrers im Hinblick auf die Belastung von Antriebsstrang- und Fahrzeugkomponenten abbilden*. Die Zielsetzung wird in den folgend definierten Forschungsfragen sowie weiteren Betrachtungen ausformuliert und eingegrenzt.

Forschungsfragen

F1: Welche Modelle können zur Abbildung von Fahrerverhalten verwendet werden?

F2: Wie können geeignete Fahrermodelle aufgebaut und parametrisiert werden?

F3: Wie kann die Komplexität menschlichen Verhaltens und der Umfang der Fahrzeugnutzung in seiner Wirkung auf die Belastung von Antriebsstrangkomponenten abgebildet werden?

¹ Im Bereich von Automobilkomponenten wird die erreichbare Betriebsdauer oftmals als „Lebensdauer“ bezeichnet. Im Bereich von Gleit- und Wälzlagern ist stattdessen der Begriff der „Gebrauchsdauer“ als mögliche Laufleistung, die ein Lagertyp üblicherweise unter definierten Bedingungen erreicht, gebräuchlich.

² Vergleiche Küçükay und Kassel 2007

Im Zusammenhang mit den definierten Forschungsfragen und den in Kapitel 2 dargestellten Grundlagen ergeben sich verschiedene weiterführende Betrachtungen. Diese Forschungshypothesen bilden die Grundlage der folgenden Betrachtungen und der in dieser Arbeit verfolgten Lösungsansätze.

Forschungshypothesen

H1: Uneindeutigkeit der Modelle zur Abbildung menschlichen Verhaltens

Der heute verfügbare Wissensstand aus Neurowissenschaften, Hirnforschung und Psychologie liefert keine vollständige Beschreibung und umfassende Modellierung des menschlichen Verhaltens (vergleiche Kapitel 2.1). Somit muss ein entsprechendes Modell immer auf Annahmen und vereinfachten Beschreibungen beruhen, deren Validität nicht mathematisch bewiesen werden kann, sondern im Hinblick auf das zu untersuchende Verhalten bewertet werden muss. Daraus folgt auch, dass es kein einzelnes, durchgehend gültiges Fahrermodell geben kann, das zur Untersuchung beliebiger Fragestellungen herangezogen werden kann. Vielmehr sind der Fragestellung entsprechende Fahrermodelle aufzubauen, die weder in ihrer Herleitung eindeutig noch in ihrer Übertragbarkeit uneingeschränkt anwendbar sind.

H2: Betrachtung des Fahrers als nicht bewusst handelndem Akteur

Da das Fortschreiten von Schädigung einzelner Bauteile im Normalfall vom Fahrer nicht bewusst wahrgenommen wird und von ihm auch nicht gewollt ist, liegt der Fokus der Modellierung auf den antrainierten, automatisiert ablaufenden Fähigkeiten des Fahrers. Zur Bestimmung des Fahrerverhaltens ist die Methode der Befragung der Befragung von Fahrern zu ihren Handlungen somit nur sehr begrenzt geeignet, da der Fahrer sich selbst nicht der relevanten, unterbewusst ablaufenden Mechanismen bewusst ist.

H3: Varianz des Fahrerverhaltens

Bringt man einen Fahrer mehrfach in eine aus Sicht des Versuchsaufbaus absolut identische Situation, so wird er dennoch Abweichungen in seinem Verhalten zeigen. Genauso folgt aus H1 und H2, dass Fahrerverhalten nicht vollständig erklärbar und vorhersagbar ist in dem Sinne, dass ein Modell eine eindeutige, vollständig zutreffende Vorhersage der Handlung eines realen Fahrers in einer bestimmten Situation ermöglicht.

Aus beiden Betrachtungen folgt, dass eine vollständige Beschreibung des Fahrerverhaltens in singulären Situationen weder umsetzbar noch anzustreben ist. Stattdessen können Fahrermodelle über statistische Vergleiche von realem und simuliertem Verhalten bewertet werden.

Den Forschungsfragen folgend soll in dieser Arbeit eine Methodik zum Aufbau und zur Parametrisierung von Fahrermodellen entwickelt werden. Diese können jedoch weder in ihrer Herleitung (siehe Hypothese H1) noch hinsichtlich der Vorhersage von einzeln auftretendem Fahrerverhalten (H3) eindeutig sein und erfordern die Abbildung und Beschreibung unterbewusst ablaufender mentaler Prozesse und Mechanismen (H2), die somit auch nicht zwangsläufig über die Befragung realer Fahrer direkt ermittelt werden können.

Mögliche Lösungen können daran bewertet werden, ob sie im Rahmen praxisnaher Anwendungen und Problemstellungen geeignete Modelle zur Beschreibung der entsprechend auftretenden Bauteilbelastungen liefern. Ein weiteres Kriterium ist die Vereinbarkeit der Modelle mit den bekannten Grundlagen aus Hirnforschung und Neurowissenschaften erfolgen, zwischen denen sich kein direkter Widerspruch ergeben darf.

Angestrebt wird somit die Entwicklung einer Methodik zum Aufbau verschiedener Fahrermodelle. Einsatzziel der Methodik ist dabei die individuelle Entwicklung von Fahrermodellen je nach betrachteter Fragestellung (Aufbau des Fahrermodells in Abhängigkeit des jeweiligen Ziel- und Objektsystems).

Erforderlich ist im Rahmen dieser Zielsetzung auch:

- die Identifizierung verschiedener Fahrerkennwerte, die eine Bewertung des Fahrstils und die Einteilung in verschiedene Fahrertypen ermöglichen,
- der Aufbau eines Fahrermodells, das die Simulation von einzelnen Betriebspunkten und kompletten Fahrprofilen ermöglicht,
- die Entwicklung von Methoden, die Häufigkeitsverteilungen für verschiedene dynamische Kennwerte über die Menge aller Fahrer abbilden.

4 Beschreibung der Vorgehensweise

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zur Fahrermodellierung beruhen auf mehreren anwendungsbezogenen Forschungsprojekten, die sowohl im Industrieumfeld als auch im universitären Forschungsumfeld stattfanden. In den jeweiligen Projekten fand eine Modellierung von Fahrerverhalten zur Bewertung von Bauteilbelastungen oder zur Untersuchung weiterer entwicklungsrelevanter Phänomene statt.

Die gesammelten Erfahrungen flossen dabei in eine allgemeine Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen ein, die mit den einzelnen Projekten immer weiter verfeinert wurde. Gleichzeitig entstand eine Datenbank an Fahrtmessungen, die ebenfalls zur Ableitung von Hypothesen zum Fahrerverhalten und zur Validierung von Fahrermodellen genutzt werden kann. Das Vorgehen für die einzelnen Projekte ist in Abbildung 20 skizziert.

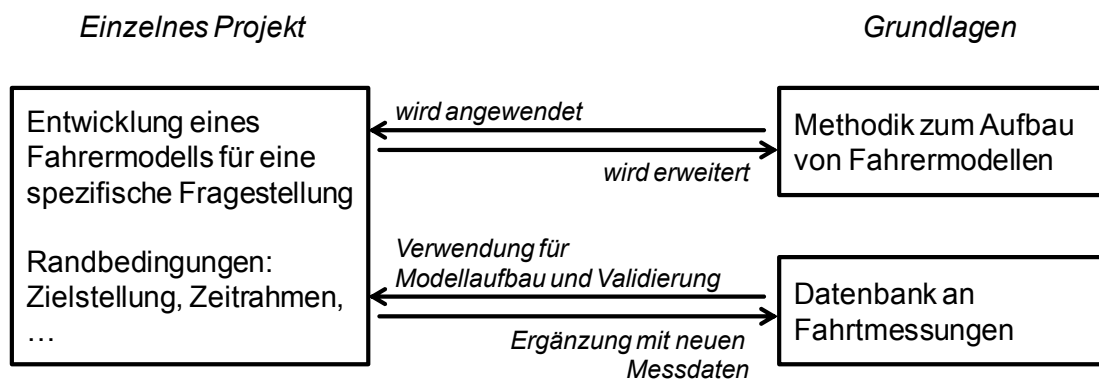


Abbildung 20: Vorgehen bei der Bearbeitung der einzelnen Projekte

Für die Aufbereitung und Diskussion der Ergebnisse ist eine chronologische, dem Vorgehen bei der Forschung folgende Darstellung der Ergebnisse nicht zielführend. Stattdessen erfolgt eine Sortierung nach den einzelnen Forschungsinhalten:

- Entwicklung einer Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen (Kapitel 5)
- Auswertung und Analyse von im Feld erhobenen Fahrdaten (Kapitel 6)
- exemplarischer Aufbau verschiedener Fahrermodelle (Kapitel 7)
- Anwendung der Fahrermodelle zur Ermittlung von Bauteillastkollektiven und Lebensdauerprognosen (Kapitel 8)

Die Kapitel stellen verschiedene Facetten der Aufgabe der Fahrermodellierung dar, die gleichermaßen für die betrachtete Zielstellung relevant sind. Die gewählte Darstellung ermöglicht weitgehend eine getrennte Betrachtung der einzelnen Kapitelinhalte.

5 Herleitung eines Metamodells zur Fahrermodellierung

Entsprechend der in Kapitel 3.2 aufgestellten Hypothesen zur Fahrermodellierung wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, einzelne Fahrermodelle je nach Bedarf entsprechend den jeweiligen Anforderungen der spezifischen Frage- oder Zielstellung aufzubauen.

Wegen der hohen Komplexität des menschlichen Verhaltens ist eine grundlegende Übertragbarkeit und Eignung eines Fahrermodells für unterschiedliche Fragestellungen nicht zu erwarten. Um dennoch eine zutreffende Beschreibung menschlichen Verhaltens in einer Simulation zu erhalten, wird eine *Beschränkung des Modells auf die für die Fragestellung notwendigen Anteile* verfolgt. Dieser Ansatz wird im Folgenden als *Minimalkriterium* bezeichnet.

Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass die aufgebauten Fahrermodelle so deutlich kompakter sind, da für ein bestimmtes Phänomen nicht benötigte Anteile nicht mitmodelliert werden müssen. Die Kompaktheit des Modells spricht auch für eine bessere Interpretierbarkeit und ein einfacheres Verständnis für den Anwender des Modells.

Gleichzeitig erfordert der Ansatz aber die Möglichkeit, Fahrermodelle bei Bedarf relativ schnell und entsprechend einer Fragestellung geeignet aufbauen zu können. Somit wird eine Art Methodensammlung zur Parametrisierung und zum Aufbau von Fahrermodellen benötigt, die im Folgenden als *Metamodell zur Fahrermodellierung* bezeichnet wird. Das entwickelte Metamodell beinhaltet mehrere Methoden und Herangehensweisen, die sich beim Aufbau von Fahrermodellen als zielführend erwiesen haben.

In diesem Kapitel werden verschiedene Aspekte des Modellaufbaus aus theoretischer und methodischer Sicht betrachtet. Die entwickelte Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen gliedert sich in die Punkte

- Begrenzung des Modellumfangs auf relevante Manöver (Kapitel 5.1)
- Aufteilung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung (Kapitel 5.2)
- Wahl eines geeigneten Modelltyps zur Abbildung der Handlungsausführung (Kapitel 5.3)

Ergänzt wird die Herleitung der einzelnen Punkte mit weiterführenden Betrachtungen und einer Zusammenfassung der entwickelten Methodik als Gesamtkonzept. Diese

Zusammenfassung erfolgt, indem die Synthese von Fahrermodellen als Problemlösungsprozess betrachtet wird und die einzelnen Methoden in die Form der SPALTEN-Methodik nach ALBERS eingebunden werden (siehe Kapitel 5.5).

5.1 Begrenzung des Modellumfangs auf relevante Manöver

Im Rahmen der Fahrermodellierung kann die Frage nach dem geeigneten Umfang des abzubildenden Fahrerverhaltens gestellt werden. Der Gültigkeitsbereich eines Fahrermodells muss so gewählt sein, dass das zu untersuchende Verhalten darin eingeschlossen ist, was jedoch nicht immer eine vollständige Betrachtung kompletter Fahrten erfordert. Im Folgenden wird der Ansatz diskutiert, die Bauteilschädigung nach den einzelnen Betriebsbereichen aufzuteilen und die Synthese von Fahrermodellen auf die für die Schädigung relevanten Anteile der Gesamttätigkeit Autofahren zu begrenzen.

Die Belastung und Schädigung von Antriebsstrangkomponenten findet im Lauf der Fahrzeuglebensdauer und den darin stattfindenden verschiedenen Fahrmanövern statt. Eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Befragung von Versuchingenieuren legt in der Erprobung von Bauteilkomponenten eine Unterteilung der Fahrzeugnutzung nahe in:

- | | |
|---|-----------------|
| a) normaler Fahrtbetrieb: | mehr als 90% |
| Fahrt bei geschlossener Kupplung im normalen Straßenbetrieb | der Zeit |
| b) regelmäßig wiederkehrende Sonderereignisse | |
| Anfahren, Schalten, Stopp | < 5% der Zeit |
| c) Mißbrauchssituationen | |
| Abwürgen des Motors, Abrutschen von den Pedalen | < 0.1% der Zeit |

Für Fahrzeuge mit manuellem Schaltgetriebe sind die Häufigkeit und Handlungsgrößen der Ereignisse aus Kategorie b und c in hohem Maß vom Fahrer abhängig. Im Gegensatz dazu ist bei automatisierten und hybriden Antriebssträngen der Ablauf dieser Ereignisse zu deutlich höherem Maß durch die Steuerung der Getriebeautomatik zu sehen. Gerade für Fahrzeuge mit manuellem Schaltgetriebe kann dem menschlichen Fahrer ein großer Einfluss auf die Belastung des Antriebsstrangs zugeschrieben werden. Als Beispiele können die Wahl der Schaltzeitpunkte (und somit des Drehzahlbereichs, in dem der Motor betrieben wird), Pedalwege beim Anfahren oder das intuitive Handeln bei Missbrauchssituationen genannt werden.

Auch aus Sicht der Arbeitsplanung kann die Gesamttätigkeit „Autofahren“ in eine Menge kleiner Teilaufgaben zerlegt werden, die der Fahrer je nach Erfordernis in unterschiedlichen Kombinationen ausführt. Eine Zerlegung ist bis auf die Ebene einzelner Fähigkeiten im Sinne neuronaler Programme denkbar. Die in der Literatur vielfältig referenzierte Aufgabenanalyse von MCKNIGHT und ADAMS (1970)¹, nimmt eine Zerlegung in 1700 einzelne Teilaufgaben im Sinne voneinander abgegrenzter Handlungseinheiten vor, die verschiedene Situationen im Straßenverkehr und teilweise auch fahrtnahen Tätigkeitsfeldern (wie Routenplanung und Fahrzeugpflege) abdecken.

Beschränkt sich die Betrachtung auf die für den Antriebstrang relevanten Betriebsbereiche, kann eine deutlich einfachere Unterteilung verschiedener Betriebsbereiche vorgenommen werden (siehe auch Abbildung 65 in Kapitel 7.2.1). Für die Auftrennung der Bereiche bietet sich das Konzept des *Manövers* an, das von ALBERS ET AL. im Rahmen der Entwicklung von Hybridfahrzeugen verwendet wird². Die Definition wird im Folgenden auf den Anwendungsbereich der Fahrermodellierung angewandt und diskutiert.

Definition Manöver:³

Ein Manöver ist ein wiederkehrender Vorgang innerhalb des Betriebs oder der Nutzung eines technischen Systems. Dabei ist das Manöver völlig beschrieben durch die Handlungen des Nutzers, den internen Zustand des Systems und die Umgebungsbedingungen.

Somit stellt das Manöver einen von anderen Manövern klar abgrenzbaren Vorgang mit einem definierten Anfangs- und Endzeitpunkt dar. Je nach Anwendungsfall kann ein Manöver aus mehreren Teilmanövern bestehen, die ihrerseits wiederum klar voneinander abgrenzbar sind.

Definition Fahrmanöver

Im Anwendungsbereich Fahrzeug ist ein Manöver ein wiederkehrender Vorgang innerhalb der Gesamtnutzung des Fahrzeugs (Fahrmanöver). Dabei ist das Manöver vollständig beschrieben durch die Fahrerhandlungen (beispielsweise Pedalstellung), den internen Zustand des Fahrzeugs

¹ Vergleiche beispielsweise Michon 1985, siehe auch Kapitel 2.2.1.

² Albers et al. 2014

³ Nach Albers et al. 2014

(beispielsweise Ladezustand der Hybridbatterie) und die Umgebungsbedingungen (beispielsweise Umgebungstemperatur).

In der hier vorgenommenen Definition stellt ein einzelnes Manöver einen eindeutig beschriebenen, vollständig und identisch reproduzierbaren und meist mehrfach erfolgenden Vorgang innerhalb der Nutzung des Systems durch den Anwender (hier den Fahrer) dar. Gleichzeitig weist der Fahrer bei seinen Handlungen eine grundlegende Unschärfe auf, so dass wiederholte Handlungen des Menschen immer Unterschiede in ihrer Ausgestaltung aufweisen (vergleiche Hypothese H3 in Kapitel 3.2). Dieser Interpretation entsprechend kann beispielsweise das Manöver „Anfahren“ durchaus mehrere, unterschiedlich ausgeführte Anfahrvorgänge beinhalten, solange die Menge dieser Anfahrvorgänge eindeutig beschreibbar ist.

Die *Begrenzung des Modellumfangs auf einzelne Manöver* ist ein geeigneter Ansatz zur Problemeingrenzung beim Aufbau von Fahrermodellen. Durch die Schädigungscharakteristik des zu untersuchenden Bauteils ist die sich aufsummierende Bauteilschädigung nicht konstant über den Fahrbereich verteilt, sondern konzentriert sich auf einzelne Betriebsbereiche. Dabei kann eine Verknüpfung zwischen dem für die Schädigung relevanten Betriebsbereich und dem bauteilspezifischen Schädigungsverhalten hergestellt werden. Beispiele für eine solche Verknüpfung werden in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5: Gegenüberstellung verschiedener Ausfälle von Antriebsstrang- und Motorenkomponenten und den jeweils dem Versagen zugeschriebenen Fahrbereichen

Bauteil	Schädigung	Mechanismus	relevantes Manöver
Belags- und Lamellenkupplungen ¹	Fading	Überhitzen	Anfahren/Halten am Berg
	Verschleiß	Reibverschleiß (Abhängig von Temperatur)	Anfahren Halten am Berg Schalten
Getriebe-synchronringe	Verschleiß	Reibverschleiß	Schaltvorgänge
Turbolader	Lager-schaden	Überhitzen	Abstellen des Motors direkt nach Vollast
Bremse	Verschleiß	Reibverschleiß	Bremsvorgänge

¹ Vergleiche Kassel 2009.

Zweimassen- schwungrad	Federbrüche	Lastspitzen bei Missbrauch	Abwürgen, Abrutschen vom Pedal
Lenkgetriebe	Ausfall Servomotor	Verschleiß	Rangieren, Lenken gegen Bordstein
Seitenwellen	Bruch	Schwing- festigkeit	Hohe Lastamplituden bei Knallstart und schnellen Beschleunigungsmanövern

Die verschiedenen Schädigungsmechanismen in der Tabelle variieren im für sie relevanten Fahrbereich zwischen einzelnen, voneinander trennbaren Manövern bis hin zu sich über eine Vielzahl zusammenhängender Manöver erstreckenden Schädigungsmechanismen. Je eher ein Schädigungsmechanismus einzelnen Fahrtmanövern zugeordnet werden kann, umso stärker bietet sich eine Trennung zwischen Manövern und Gesamtfahrt an.

Mit steigender Komplexität des Schädigungsmechanismus nimmt die Länge des abzubildenden Manövers zu. Im Extremfall ist die Abbildung eines kompletten repräsentativen Fahrzyklus als relevantes Manöver und die Verwendung der Randbedingungen zur Erfassung der Häufigkeit, relevanter Umweltbedingungen und der Vorkonditionierung von Fahrer, Strecke und Umwelt notwendig. Ein Beispiel für die Auslegung über einen kompletten Fahrzyklus ist die Simulation von Getriebeverschleiß und Kupplungsschädigung durch Hitzeentwicklung¹.

Mit der Auftrennung in relevante Fahrmanöver erfolgt eine Abgrenzung des für die Schädigung relevanten Fahrverhaltens vom kompletten Fahrzyklus (siehe das Beispiel in Abbildung 21). Damit ergibt sich eine deutliche Reduktion der Komplexität der zu betrachtenden Simulationsaufgabe. Gleichzeitig erfolgt, wie in der Abbildung illustriert, eine Aufhebung möglicher Wechselwirkungen zwischen angrenzenden Manövern, die stattdessen in der Beschreibung des jeweiligen Manövers abgebildet werden müssen. Die Eingrenzung der Randbedingungen kann somit von der im Manöver stattfindenden Bauteilschädigung getrennt werden und über einen separaten Ansatz durchgeführt werden. Hier bietet sich das Zurückgreifen auf statistische Daten an, aber auch eine Ermittlung über vorangestellte Modellteile ist möglich (für das beschriebene Beispiel des Manövers Anfahren könnte etwa eine vorangestellte Verkehrsflusssimulation verwendet werden, um die Randbedingungen für die einzelnen Anfahrvorgänge des Fahrers zu ermitteln).

¹ Siehe Kassel 2009.

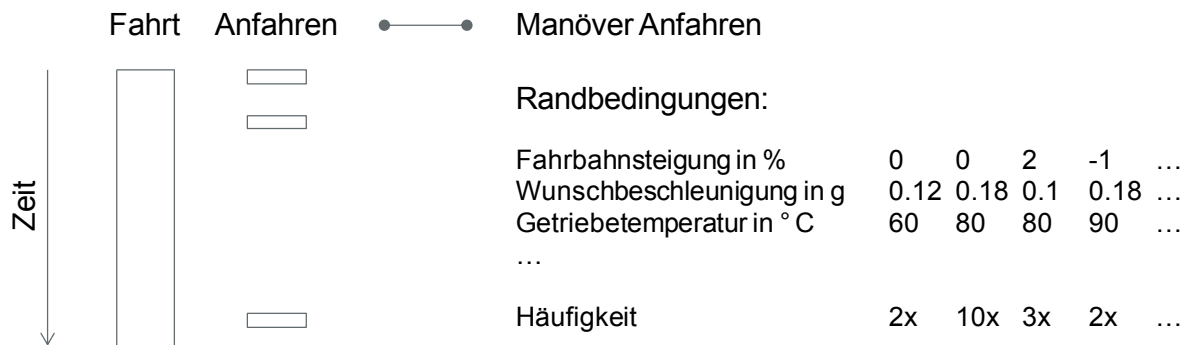


Abbildung 21: Überführung eines gesamten Fahrzyklus in ein einzelnes Manöver unter verschiedenen Randbedingungen am Beispiel des Anfahrens. Die auf der linken Seite angedeutete Tätigkeit einer kompletten Fahrt kann in einzelne Anfahrvorgänge aufgeteilt werden, die als wiederholt ablaufende Manöver beschrieben werden können (rechte Seite).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Unterteilung von kompletten Fahrten in einzelne Manöver und die Reduzierung des Modellgültigkeitsbereichs auf die für eine Fragestellung relevanten Manöver ein geeignetes Mittel ist, die Komplexität eines zu entwickelnden Fahrermodells zu reduzieren. Diese Methode wird exemplarisch am Beispiel des Beschleunigens in Kapitel 7.1 angewendet.

5.2 Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung

Auch bei der Begrenzung des Fahrerverhaltens auf ein einzelnes zu betrachtendes Manöver (vergleiche den vorangegangenen Abschnitt) bleibt das jeweils zu modellierende Fahrerverhalten komplex. Als weitere Methode zur Eingrenzung des zu modellierenden Modellumfangs wird deshalb im Folgenden die Methode der *Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung* vorgestellt.

Einen Überblick der verschiedenen für den Fahrer relevanten mentalen Prozesse stellen die in Kapitel 2.1 und 2.2 eingeführten, beschreibenden Modelle des Fahrers dar, insbesondere das Handlungsmodell nach RASMUSSEN (siehe Abbildung 5) und das Modell der hierarchischen Struktur des Fahrerverhaltens (siehe Abbildung 8). Bei der Bewertung der einzelnen Hierarchieebenen kann festgehalten werden, dass gerade die Handlungsanteile, die auf der obersten, kognitiven Ebene der Modelle ablaufen, nur mit großem Aufwand in der Simulation abzubilden sind. Dies beinhaltet beispielsweise:

- Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern im Straßenverkehr
- Die psychische und körperliche Verfassung des Fahrers
- Die Wahl der Strecke und des gewünschten Fahrstils

Gleichzeitig haben die genannten Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des Fahrers und können nicht komplett ausgeklammert werden. Sinnvoll erscheint somit, sie als Teil der Randbedingungen zu erfassen und eine Trennung des Fahrerverhaltens in Handlungsmodell und Randbedingungen vorzunehmen (siehe Abbildung 22).

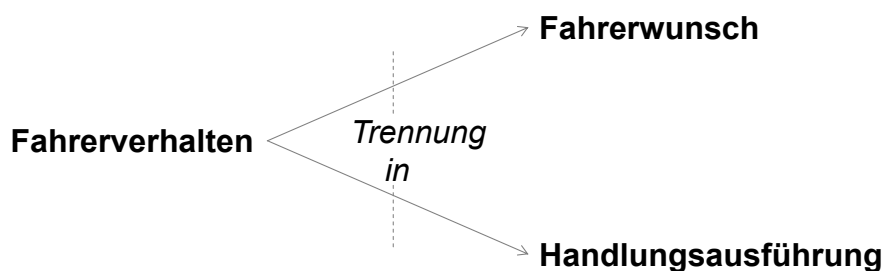


Abbildung 22: Zerlegung des Fahrerverhaltens in ein Handlungsmodell und eine Beschreibung des Fahrerwunsches

Die Begriffswahl orientiert sich an der Erwartung, dass im Normalfall das Entstehen des Fahrerwunsches und die Wahl und Definition von Handlungszielen nicht in der Modellierung abgebildet werden soll. Zwar existieren durchaus Modellansätze, die diese Prozesse abzubilden versuchen¹, der dabei zu betreibende Aufwand ist jedoch mit dem oben definierten Minimalkriterium (siehe Seite 45) nicht zu vereinbaren. Im Normalfall wird also der Fahrerwunsch für die Modellierung als gegeben betrachtet, die Umsetzung des Wunsches in tatsächliche Handlungen als Ziel der Modellierung.

Die Abbildung des Fahrerwunsches kann dabei sowohl als zeitlich variierende Werte (Fahrerwunsch in Abhängigkeit der Zeit oder Fahrtstrecke) oder als einzelne Werte stattfinden (Fahrerwunsch in Form einzelner Kennwerte). Dabei ist die Grenze zwischen Fahrerwunsch und Handlungsausführung fließend und entsprechend den Anforderungen zu wählen. Als Beispiel kann die Modellierung von Überholmanövern herangezogen werden. Die beschriebene Trennung kann auch in verschiedenen in der Literatur beschriebenen Modellen identifiziert werden (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Vergleich der Trennung in Fahrerwunsch und Handlungsausführung für zwei Modelle, die beide eine Modellierung kompletter Fahrten anbieten.²

Modell	Abbildung Fahrerwunsch	Handlungsausführung
3F-Methode nach KÜÇÜKAY	OGP-Profil: Beinhaltet vom Fahrer gewünschte Fahrzeugbeschleunigungen aufgrund von Überholvorgängen	statistisches Fahrermodell, das das OGP-Profil für ein tatsächliches Fahrzeug umsetzt
Verkehrsfluss-simulation Pelops	gewünschter Fahrstil, abgebildet in verschiedenen skalaren Fahrerkenntwerten	Folge- und Spurwechselmodell für die einzelnen Fahrzeuge

Für die aufgeführten Beispiele wird die Entscheidung, ein Überholmanöver durchzuführen, im einen Fall als Teil der Randbedingungen betrachtet (3F-Methode), im anderen Fall als Teil der Handlungsausführung (Pelops). Die jeweils vorgenommene Trennung ist aus den Einsatzgebieten der Modelle begründet. Der Vergleich zeigt auch, dass das Konzept der Trennung zwischen Fahrerwunsch und Handlungsausführung in verschiedenen bereits verfügbaren Modellen mit variierenden Bezeichnungen vorhanden ist.

Durch die Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung ergeben sich für die Synthese von Fahrermodellen verschiedene Ansätze:

- Die Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrerwünsche stellt einen Ansatz zur Klassierung von gemessenen Manövern dar (beispielsweise die Auswertung von gemessenen Beschleunigungsvorgängen in Kapitel 7.1.2 zur Klassierung der unterschiedlichen auftretenden Beschleunigungsvorgänge).
- Die Herleitung geeigneter Handlungsmodelle kann aus dem Vergleich zwischen einem angenommenen Fahrerwunsch und tatsächlich gemessenem Fahrerverhalten erfolgen, was zu einer deutlichen Reduzierung in der Komplexität des betrachteten Verhaltens führt (vergleiche beispielsweise das Modell zur Konstantfahrt in Kapitel 7.2.3).
- Sowohl die Frage nach einem geeigneten Fahrerwunsch als auch nach für den Fahrer geltenden Handlungsgrenzen sind geeignete Kriterien, um das

¹ Siehe beispielsweise Dörner 1999.

² Vergleiche Küçükay und Kassel 2007 sowie Pelops 2007

betrachtete Fahrerverhalten einzugrenzen (vergleiche die Herleitung des KoGaS-Beschleunigungsmodells in Kapitel 7.1.3).

Somit ergeben sich durch die Auftrennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung sinnvolle Ansatzpunkte, die bei dem Aufbau von Fahrermodellen verfolgt werden können. Gleichzeitig lassen sich die Elemente bekannter Fahrermodelle durchgängig in die gefundene Aufteilungsstruktur eingrenzen (vergleiche Tabelle 6), so dass mit den eingeführten Begriffen eine einheitliche Struktur und Terminologie für die Darstellung von Fahrermodellen gefunden ist.

Der Fahrerwunsch muss sinnvollerweise entweder aus vorliegenden Messdaten geschätzt, über ein vorangestelltes Modell ermittelt oder vom Benutzer direkt vorgegeben werden („Simuliere einen Fahrer, der sportlich mit etwa 3 m/s^2 anfahren will, anschließend zügig auf 100 km/h beschleunigt und diese Geschwindigkeit auf einer kurvigen Landstraße zu halten versucht.“). Der Bereich der Handlungsausführung wird durch ein geeignetes Handlungsmodell ausgefüllt, das in seiner Struktur bisher nicht weiter beschrieben wurde. Dieser Thematik widmet sich der folgende Abschnitt.

5.3 Wahl eines geeigneten Modelltyps

Der Aufbau von simulationsfähigen Fahrermodellen kann über verschiedene Fahrermodelltypen erfolgen, die die jeweilige Beschreibung der menschlichen Handlungen als dynamisches Modell abbilden. Dieses bildet – entsprechend der im vorangegangenen Kapitel aufgestellten Struktur – die Umsetzung des Fahrerwunsches in reale Handlungen des Fahrers ab und wird im Folgenden dementsprechend als *Handlungsmodell* bezeichnet. In diesem Modell zu berücksichtigen sind:

- Handlungsmechanismen, die in direktem Zusammenhang mit den abzubildenden Zielgrößen stehen.
- Die Anpassung des Fahrers an variable Systemeigenschaften, solange diese für das Modellierungsziel von Bedeutung sind.

Auszuklammernde Mechanismen sind:

- Mechanismen, die mit den verfügbaren Modellstrukturen nicht plausibel dargestellt werden können (etwa komplexe kognitive Mechanismen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Handlungsebenen, solange diese nicht für die zu betrachtende Zielgröße zwingend erforderlich sind).

- Handlungsteile, die in keinem Zusammenhang mit den zu betrachtenden Zielwerten stehen.

Die vorgestellte Auftrennung entspricht dem oben definierten Minimalprinzip, nur die für das Fahrermodell notwendigen Handlungsanteile abzubilden.

Entsprechend der in Kapitel 2.2 vorgestellten, in der Literatur gebräuchlichen Fahrermodelle kann die Menge verfügbarer Fahrermodelle in drei Gruppen eingeteilt werden:

- statistische Modelle
- Reglermodelle
- optimaltheoretische Modelle

Die in Kapitel 2 ebenfalls diskutierte Gruppe beschreibender Fahrermodelle kommt für ein Handlungsmodell nicht in Frage, da diese nicht direkt zur dynamischen Simulation geeignet sind (zur Umsetzung einer als Flussdiagramm gegebenen Modellstruktur als Zustandsautomat siehe Kapitel 7.2). Auch die Gruppe der kognitiven Modelle wird in der hier aufgeführten Liste ausgeklammert, da diese in ihrem Umfang im Allgemeinen nicht mit dem definierten Minimalkriterium vereinbar sind. Diese Wahl bezieht sich jedoch auf die Zielstellung der Last- und Verschleißuntersuchungen (vergleiche Hypothese H2 in Kapitel 3.2) und kann für andere Anwendungsfelder angepasst oder um weitere Modellierungen ergänzt werden.

Die *Wahl der geeigneten Modellstruktur* zählt somit zur Syntheseleistung, die beim Aufbau eines Fahrermodells erfolgen muss. Grundlegende Empfehlungen werden dabei in der folgenden Auflistung gegeben:

Statistische Modelle bieten sich immer dann an, wenn ein ausreichend großer Datensatz mit geeigneter Erfassung des statistisch relevanten Parameterbereichs vorliegt. Gerade bei deutlicher Extrapolation des erfassten Parameterbereichs ist die Gültigkeit der statistisch ermittelten Kennwerte jedoch im Allgemeinen nicht mehr gegeben¹.

Reglermodelle bieten eine Struktur, die über Eingangs- und Ausgangsgrößen eine Simulation des Fahrerverhaltens im Zeitbereich ermöglichen. Die direkte Kopplung eines Fahrermodells an Prüfstände oder Mehrkörpermodelle erfordert immer ein Reglermodell, wobei diese Struktur neben „klassischen“ Reglermodellen in Closed-Loop-Form auch Open-Loop-Modellteile ohne direkte

Rückkopplung sowie andere Fahrermodelle in statistischer oder optimaltheoretischer Form beinhalten kann (vergleiche Kapitel 7.2.2).

Optimaltheoretische Modelle ermöglichen die Ermittlung eines gelernten Zustands durch Optimierung hin zu geeigneten Zielgrößen und können somit gerade zur Ermittlung von Handlungsgrößen bei wiederholt ablaufenden Handlungen des Fahrers verwendet werden (beispielsweise der Wahl von Gaspedal- und Kupplungsstellung beim Anfahren). Dabei beinhaltet das Modell neben Zielgrößen auch Informationen zu den dem Fahrer möglichen Handlungen (Begrenzung der Handlungsparameter über *Handlungsgrenzen*, siehe beispielsweise Kapitel 7.1.5).

5.4 Unbestimmtheit der menschlichen Handlung aus Simulationssicht

Die bisher ausgeführten Grundprinzipien beim Aufbau von Fahrermodellen geben eine sinnvolle Grundstruktur vor, anhand derer Fahrermodelle aufgebaut werden können. Im Folgenden werden weitere prinzipielle Überlegungen zur Berücksichtigung von Unbestimmtheiten in der Handlungsausführung des Fahrermodells beschrieben.

Die im Kapitel 2.1 dargestellten Grundlagen verdeutlichen, wie komplex das menschliche Gehirn ist. Auf unterschiedlichen Bewusstseinssebenen laufen verschiedenartige Prozesse ab, die sich jeweils beeinflussen, nicht jedoch in der Simulation vollständig abgebildet werden können.

So ist beispielsweise zu erwarten, dass ein emotionales Gespräch des Fahrers mit einem Beifahrer starken Einfluss auf Puls, Blutdruck, Botenstoffausschüttung, Reaktionszeiten, motorische Fähigkeiten, die Aufmerksamkeit des Fahrers und den gewünschten Fahrstil einschließlich Risikobereitschaft und Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern hat.

Diese aus psychologischer und neurologischer Sicht erklärable Kopplung stellt für Handlungsmodelle des Fahrers eine unbekannte Einflussgröße dar. Durch die Verknüpfung verschiedener Funktionen des Gehirns kommt es insbesondere zu einer laufenden Beeinflussung der für die Fahraufgabe relevanten Parameter,

¹ Siehe beispielsweise Küçükay und Kassel 2007 zur Bewertung des statistisch beschriebenen Parameterbereichs im Rahmen der 3F-Methode bei Verwendung von 1 Mio. erfassten Fahrkilometern.

beispielsweise eine Schwankung der auf das Fahren gerichteten Aufmerksamkeit. Diese Schwankung ist zumindest bei einigen Simulationsaufgaben für die Beschreibung des Fahrerverhaltens relevant, die zugrunde liegenden Mechanismen können aber mit den verfügbaren Modellen nicht in der Simulation abgebildet werden. So bleibt nur die Möglichkeit, die Schwankung verschiedener Fahrerparameter als streuenden Wert mit einer angenommenen Verteilung zu beschreiben. Im Rahmen numerischer Simulation ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Auslagerung der Parametervariation in den Bereich der Modellinitialisierung: Annahme konstanter Fahrerparameter für den Bereich eines einzelnen Simulationslaufs und der Bewertung mehrerer Simulationen mit unterschiedlichen Parametern.
- Berücksichtigung der Parameterschwankung über ein vordefiniertes Muster: In diesem Fall bleibt die Determiniertheit des Simulationsmodells erhalten und eine Schwankung der Fahrerparameter wird während eines Simulationslaufs berücksichtigt. Kritisch ist jedoch die anzunehmende Musterstruktur des Fahrverhaltens, die möglicherweise weitere, ungewollte Muster im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis erzeugt (Beispielsweise eine Wiederholung von Werten bei Überschreitung der Periodendauer eines linearen Kongruenzgenerators)
- Berücksichtigung der Parameterschwankung durch zufällig generierte Werte: Über die Verwendung eines Zufallsgenerators wird eine Schwankung der Parameter ohne sich wiederholende Muster ermöglicht. Hierdurch kommt es jedoch zu einem Verlust der Determiniertheit, d. h. bei mehrfacher Simulation unter den gleichen Initialisierungsparametern sind die Ergebnisse nicht mehr identisch
- Verwendung eines Modells mit unscharfen Zustandsdefinitionen: Zumindest im Bereich linearer Operationen besteht die Möglichkeit der Verarbeitung von unscharfen Zuständen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Dies führt spätestens bei nichtlinearen Algorithmen jedoch zu einer deutlich erschwerten Modellbildung. Als Kritik kann zusätzlich eingewendet werden, dass aus neurologischer Sicht der Zustand des Gehirns scharf definiert ist (ausgenommen ist hier eventuell eine Betrachtung auf quantenphysikalischer Ebene). Somit ist fraglich, ob ein Modell des Gehirns auf Basis unscharfer Zustände trotz Diskrepanz zu neurologischen Grundlagen eine Verbesserung der Modellqualität erreichen kann.

Bei Abwägung der beschriebenen Möglichkeiten erscheint die insbesondere Umsetzung von Parameterstreuungen über die Verwendung von Pseudozufalls-

zahlen sinnvoll. Entsprechende Algorithmen ermöglichen die Wiederholung einer Simulation unter identischen Bedingungen, wenn der gleiche Wert für die Initialisierung der Pseudozufallsfunktion verwendet wird. Gleichzeitig verfügen die üblicherweise in gängigen Softwareumgebungen implementierten Algorithmen über eine ausreichend große Unabhängigkeit von typischen Mustern, um die Anforderungen an eine Zufälligkeit im Rahmen mehrfacher Simulationen mit unterschiedlichen Initialisierungen zu genügen. Die Anwendung von Pseudozufallszahlen im Rahmen von Fahrermodellen wird in Kapitel 7.2.4 beschrieben.

5.5 Zusammenfassung der verschiedenen Modellierungsansätze

Im vorliegenden Kapitel werden verschiedene Methoden für den Aufbau von Fahrermodellen hergeleitet und diskutiert. Die beschriebenen Methoden stellen einen Satz an Werkzeugen für die Synthese und den Aufbau von Fahrermodellen dar, über die die individuelle Erstellung von Fahrermodellen, angepasst an eine jeweilige Fragestellung, möglich wird.

Gleichzeitig erfolgt dieser Aufbau iterativ. Entsprechend der *Uneindeutigkeit der Modelle zur Abbildung menschlichen Verhaltens* (vergleiche Hypothese H1 in Kapitel 3.2) ergibt sich auch eine Uneindeutigkeit des Aufbaus geeigneter Modelle – prinzipiell können mehrere, unterschiedlich aufgebaute Fahrermodelle zur Beantwortung einer Fragestellung geeignet sein. Diese Offenheit des Ergebnisses zeigt sich auch in den vorgestellten Methoden, die zwar eine Reduktion der Komplexität während des Modellierungsprozesses liefern, nicht aber eine eindeutige Lösung, die sich durch die Anwendung automatisch ergibt. Vielmehr kann die Synthese eines Fahrermodells zur Beantwortung einer bestimmten Fragestellung als ablaufender *Problemlösungsprozess* beschrieben werden.

Um bei der Herleitung geeigneter Fahrermodelle zu unterstützen, werden die entwickelten Methoden in die SPALTEN-Methodik nach ALBERS eingeordnet (siehe Abbildung 23). Neben den vorgeschlagenen Schritten wird in der Darstellung auch die Bedeutung des Abgleichs mit dem Verhalten realer Fahrer während des Syntheseprozesses hervorgehoben.

Die Anwendung der entwickelten Methoden wird in Kapitel 7 ausführlich vorgestellt und diskutiert. Sie beruht wie beschrieben auf der Verfügbarkeit und Anwendung vorhandener Messdaten zum Fahrerverhalten, die im folgenden Kapitel behandelt wird.

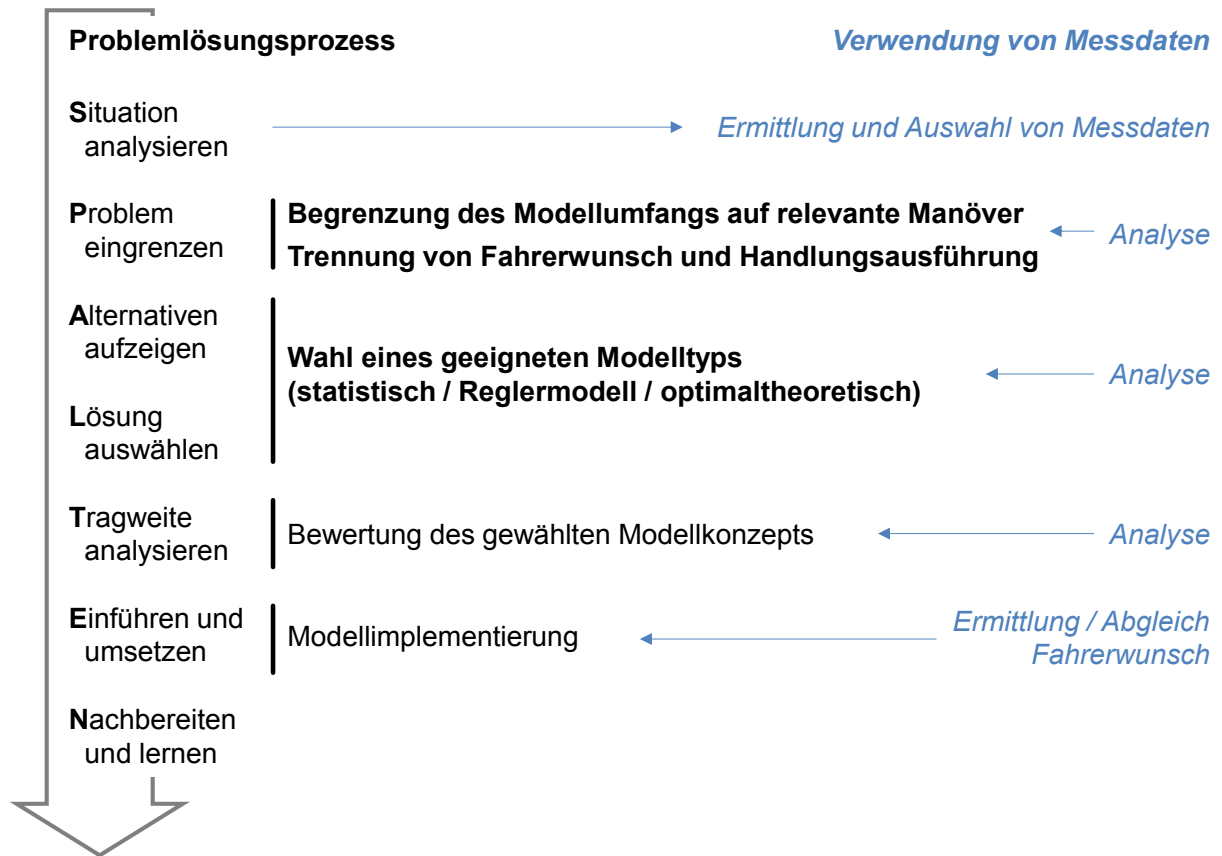


Abbildung 23: Beschreibung der Synthese von Fahrermodellen als Problemlösungsprozess nach der SPALTEN-Methodik (vergleiche Kapitel 2.3.1). Die entwickelten methodischen Werkzeuge sind als Text hervorgehoben.

6 Statistische Analyse von im Feld gemessenem Fahrerverhalten

In der wissenschaftlichen Literatur sind nur wenige Veröffentlichungen mit quantitativen Daten zu gemessenem Fahrerverhalten und der Fahrzeugnutzung verfügbar (vergleiche Kapitel 2.2)¹. Analysen von gemessenem Fahrerverhalten sind auch in den Veröffentlichungen zu verschiedenen Fahrzyklen verfügbar. ANDRÉ stellt im Zusammenhang mit dem ARTEMIS-Fahrzyklus eine Analyse von insgesamt ca. 100.000 km Fahrtdaten vor², im Rahmen der Dokumentation zum WLTP-Fahrzyklus werden ca. 760.000 km Fahrtdaten aus verschiedenen Ländern analysiert und verglichen³.

In allen betrachteten Fällen sind die in den Untersuchungen verwendeten Fahrtmessungen nicht als Rohdaten verfügbar und können dementsprechend auch nicht für weiterführende Analysen verwendet werden. Insgesamt ist in der Literatur nur ein ungefährender Überblick zu verschiedenen Daten bzgl. Fahrzeugnutzung und Fahrerparametern vorhanden. Oftmals werden exemplarische Beispielswerte veröffentlicht, aber keine vollständige Angabe der für verschiedene Fahrer ermittelten Werte geleistet. Im Rahmen der Entwicklungstätigkeit größerer Automobilhersteller und –zulieferer werden im Allgemeinen in der Erprobung große Mengen an feldnahen Fahrtdaten erhoben. Diese Daten stehen in Forschungsprojekten nur im Rahmen geeigneter Kooperationsverträge zur Verfügung und können nicht frei verwendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb eine eigene Studie zur Erfassung von Fahrprofilen im Feld durchgeführt, mit der die vorhandenen Daten aus Literatur und Fahrzeugentwicklung ergänzt und erweitert werden sollen. Im Folgenden wird die Erfassung der Daten beschrieben und die Daten werden auf allgemeine Kennwerte und Aussagen zu dem erfassten Fahrerverhalten hin untersucht. Eine gezielte Anwendung der Daten für den Aufbau und die Validierung einzelner Fahrermodelle erfolgt in Kapitel 7.

¹ Erfasste Daten zum Fahrerverhalten werden beispielsweise in Müller-Kose 2002 und Deml et al. 2007 angegeben.

² André 2004.

³ Tutuianu et al 2013

6.1 Messtechnik und Umfang der erhobenen Daten

Zur messtechnischen Erfassung des Fahrerverhaltens kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht, die sich stark in der technischen Leistungsfähigkeit des verwendeten Systems und den damit verbundenen Kosten unterscheiden. Für die Erfassung des Fahrerverhaltens im Feld können folgende Anforderungen aufgestellt werden:

- Erfassung der Handlungen des Fahrers und interner Fahrzeugwerte wie Motordrehzahl und -last
- Speicherkapazität zur Erfassung mehrerer Wochen typischer Fahrzeugnutzung
- Einfache Montage in verschiedenen Fahrzeugen
- Verfügbarkeit des Messsystems über längere Zeiträume.

Zur Durchführung wurde auf die vergleichsweise preiswerte technische Lösung der Erfassung von Fahrzeugcanbus und GPS-Daten über Android-Smartphones zurückgegriffen¹. Fahrzeuginterne Kennwerte werden über die Verwendung eines Bluetoothadapters und die OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs erfasst. Die Aufzeichnung von CAN-Bus, GPS-Signalen und Beschleunigungssensoren im Smartphone erfolgt über die Software „Torque Pro“, die Aufzeichnungsraten bis 10 Hz unterstützt.



Abbildung 24: Verwendetes Smartphone mit Stromversorgung und verschiedenen OBD-Adaptoren zur Erfassung von Fahrtmessungen.

¹ Siehe auch Albers et al. 2013b.

Die ermittelten Messdaten liegen nach einem Konvertierungsprozess in einer einheitlichen Datenbank vor, die für automatisierte Auswertungen und Stapelverarbeitungen geeignet ist. Die Konvertierungssoftware und die in dieser Arbeit dargestellten Auswertungen wurden durchgehend in den Programmumgebungen Matlab und GNU Octave geschrieben¹ und sind so aufgebaut, dass zusätzliche Messdaten ohne hohen Aufwand ergänzt und integriert werden können. Zur Anonymisierung der Fahrer werden die Fahrernamen bei der Konvertierung in die Messdatei durch einen Hashwert ersetzt, der eine Zuordnung der einzelnen Fahrtmessungen zum jeweiligen Fahrer weiterhin ermöglicht. Die ermittelten Hashwerte werden auch zur Identifizierung einzelner Fahrer in den Darstellung in diesem Kapitel verwendet (siehe beispielsweise Abbildung 30).

Mit der beschriebenen Technik wurden ca. 35.000 km Fahrtdaten von insgesamt 34 teilnehmenden Fahrern gesammelt. Die Verteilung der Altersklassen der einzelnen Fahrer ist in Abbildung 25 dargestellt.

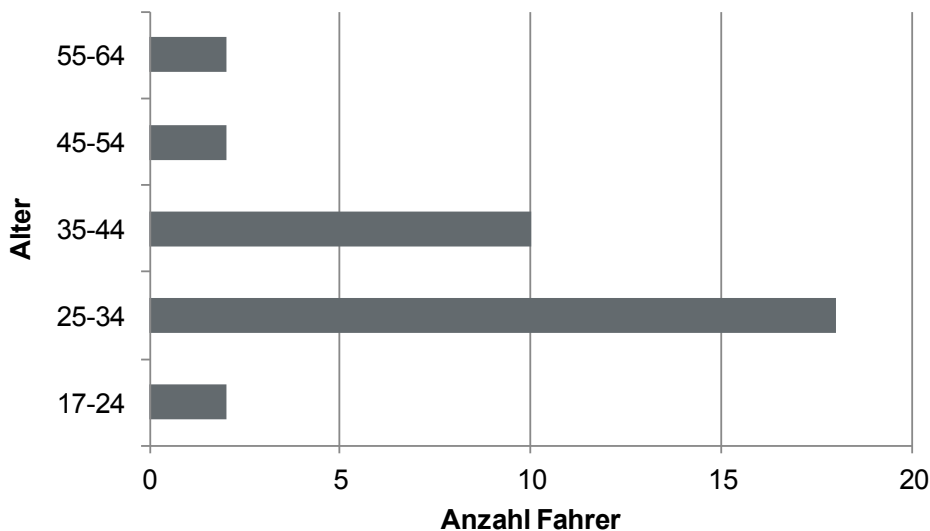


Abbildung 25: Verteilung des Alters der teilnehmenden Fahrer (insgesamt 34 Fahrer, davon 7 weiblich, 27 männlich)

¹ Siehe Anhang A für die verwendeten Softwareversionen. Die Programmpakete Matlab und GNU Octave weisen ein hohes Maß an Kompatibilität auf. Die entwickelten Programmsequenzen sind in beiden Umgebungen nutzbar. Im Folgenden wird deshalb durchgängig auf beide Programmumgebungen verwiesen.

Die Menge der gesammelten Fahrtdaten variiert dabei stark von Fahrer zu Fahrer. Für die meisten Fahrer liegt sie bei 1-2 Wochen normaler Fahrzeugnutzung, für einzelne Fahrer ist die Menge erfasster Daten aber auch deutlich höher (etwa bei Bereitschaft des Fahrers, ein eigenes Smartphone für die Messungen zu verwenden oder bei besonderer Relevanz wie zum Beispiel der Nutzung verschiedener Fahrzeuge durch einen Fahrer). Die teilnehmenden Fahrer wurden hauptsächlich nach Verfügbarkeit und Bereitschaft, das eigene Fahrverhalten erfassen zu lassen, ausgewählt und entstanden aus Freiwilligen im Firmenumfeld, Universitätsumfeld und privaten Umfeld des Autors (jeweils etwa 1/3 der Gesamtmenge erfasster Fahrer). Somit entspricht die Menge der gesammelten Fahrtdaten keinem repräsentativen Schnitt durch die Menge aller Autofahrer, zeigt jedoch die Bandbreite verschiedener Nutzungsarten und Fahrstile auf.

Die erfassten Fahrtmessungen spiegeln die in Deutschland vorhandene Streckenvielfalt wieder. Ein großer Teil der Messdaten konzentriert sich dabei auf den Bereich Karlsruhe, Autobahnmessungen und einzelne Fahrtmessungen erstrecken sich aber deutlich über diesen Bereich hinaus. Eine Kartenansicht der erfassten Fahrtdaten ist in Abbildung 26 dargestellt.

Die verwendete Methode zur Erfassung der Messdaten ist prinzipbedingt Einschränkungen in der maximalen Datenrate unterworfen. Tabelle 7 zeigt einen Überblick über die Auflösung der einzelnen Sensoren und Signale.

Tabelle 7: Messgenauigkeit der verwendeten Messtechnik

Signaltyp	Abtastrate	Signalgenauigkeit
GPS Ort, Geschwindigkeit, Höhe	1 Hz	ideale Bedingungen: ± 2 Meter durchgehend: ± 10 Meter
Beschleunigungssensoren	10 Hz	$\pm 0,01$ g
CAN-Bus	2 .. 5 Hz je nach Signalanzahl	Entsprechend Datenqualität CAN-Bus-Daten

Im Rahmen von Funktionserprobungen im technischen Bereich sind allgemein deutlich höhere Datenraten üblich. Typische Messsysteme im Industriebereich ermöglichen die hochauflösende Aufzeichnung von Drehzahlen, Akustik, Analog- und Digitalsignalen zur Auflösung von Schwingungen und Wechselwirkungen im Antriebsstrang. Für die Betrachtung des Fahrerverhaltens ist eine deutlich geringere Messgenauigkeit und Messdatenrate ausreichend. Unter der Vernachlässigung von Schreck- und Impulsreaktionen ist eine Erfassung des Fahrerverhaltens mit den in Tabelle 7 aufgeführten Genauigkeiten prinzipiell möglich.

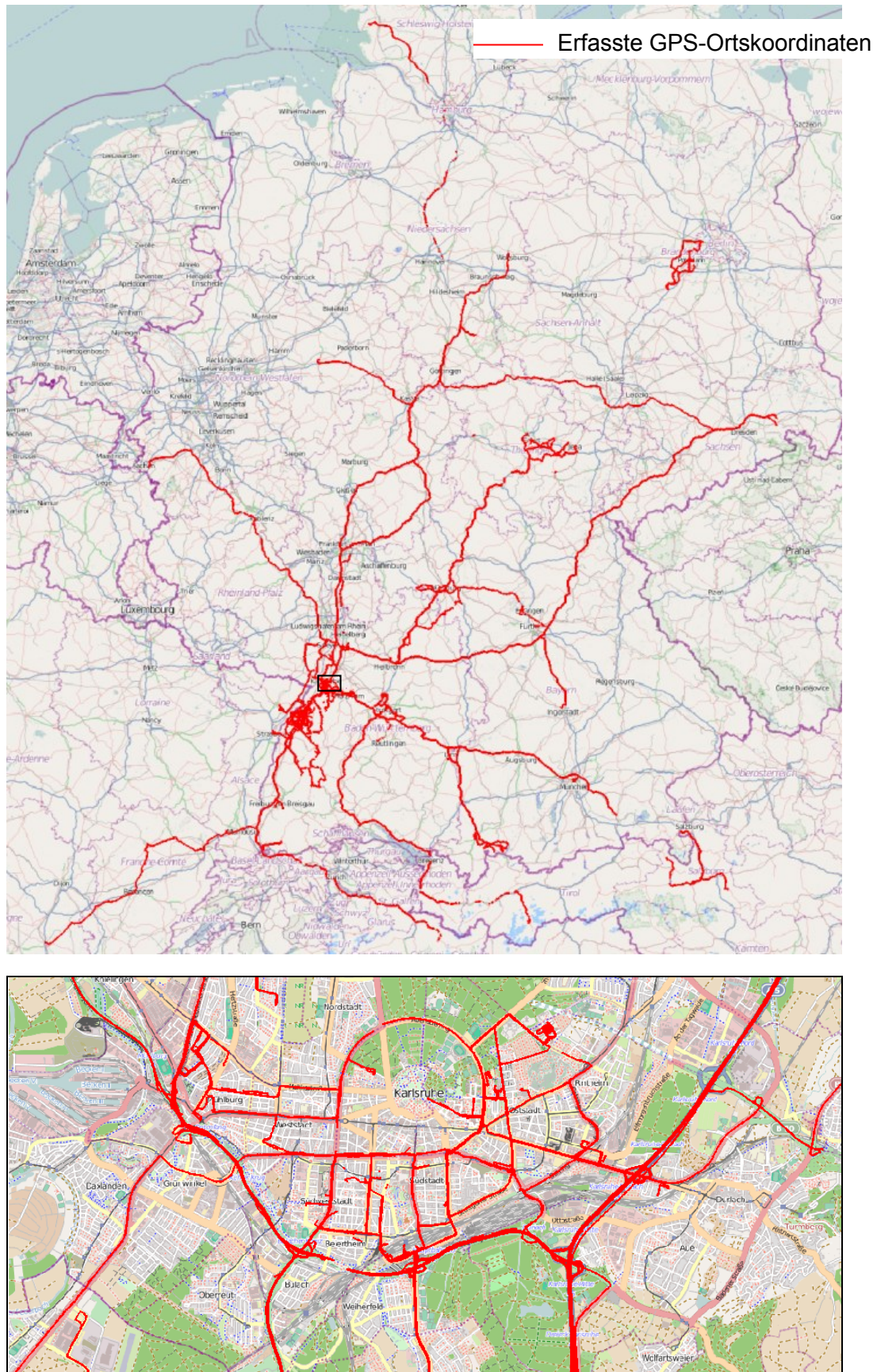


Abbildung 26: Darstellung aller erfassten Fahrtmessungen als Kartenansichten (Deutschland und Raum Karlsruhe). Verwendung von OpenStreetMap Kartendaten unter Creative Commons CC BY-SA, © OpenStreetMap-Mitwirkende – siehe Anhang B

Die Auswertung von GPS- und Beschleunigungsdaten ermöglicht eine Erfassung von Fahrerprofilen auch für Fahrzeuge, bei denen kein CAN-Bus verfügbar ist. Im Vergleich zeigen bei gemessenem CAN-Bus die Geschwindigkeitsprofile des GPS-Signals und des vom Fahrzeug ausgegebenen CAN-Signal eine gute Übereinstimmung. Die vom GPS erfasste Geschwindigkeit zeigt leichte Abweichungen zum CAN-Signal, die in den Untersuchungen auch nicht durch eine direkte Auswertung der GPS-Ortskoordinaten verbessert werden konnte (siehe Abbildung 27).

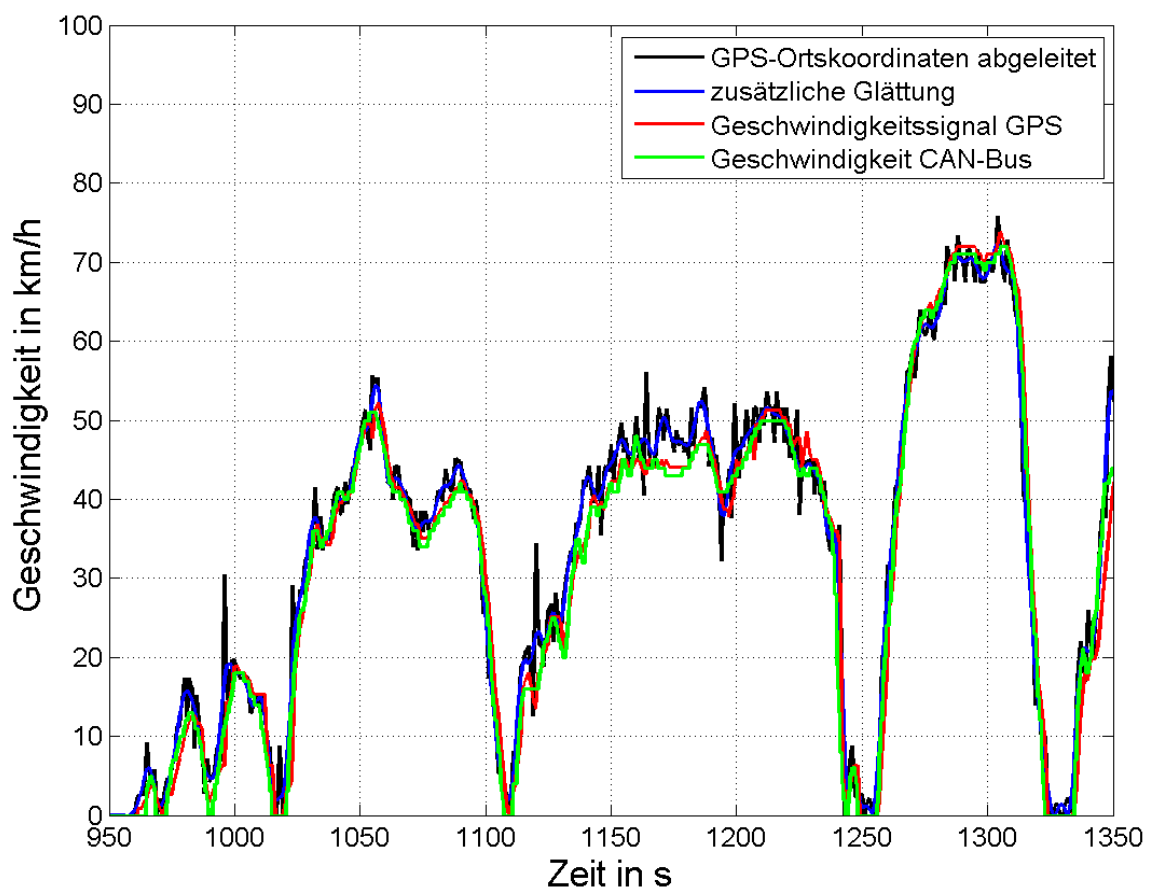


Abbildung 27: Vergleich des erfassten GPS- und CAN-Bus-Geschwindigkeitssignals für eine Fahrtmessung (Fahrzeug: Fiat 500 mit 0.9-l-2-Zylinder Twinair-Motor).

6.2 Auswertung der erhobenen Fahrtdaten

Die erhobenen Fahrtdaten zeigen ein umfangreiches und differenziertes Bild der Fahrzeugnutzung verschiedener Fahrer. Über verschiedene, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Auswertemethoden wird im Folgenden ein Überblick über die

Bandbreite der erhobenen Fahrtdaten gegeben. Aus den Daten ableitbare Aussagen über das Verhalten verschiedener Fahrer werden diskutiert.

6.2.1 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverteilungen

Über die gemessene Fahrtgeschwindigkeit ist eine Kategorisierung der Fahrer nach Fahrgeschwindigkeit und Längsbeschleunigung möglich. Zur Auswertung wurde eine Programmsequenz zur automatisierten Verarbeitung der in der Fahrtdatenbank liegenden Messungen erstellt.

Aus der vorgenommenen Auswertung ergeben sich Histogrammdarstellungen der Aufenthaltsdauer einzelner Fahrer bezogen auf Fahrtgeschwindigkeit und Längsbeschleunigung¹. Eine der Darstellungen wird exemplarisch in Abbildung 28 gezeigt.

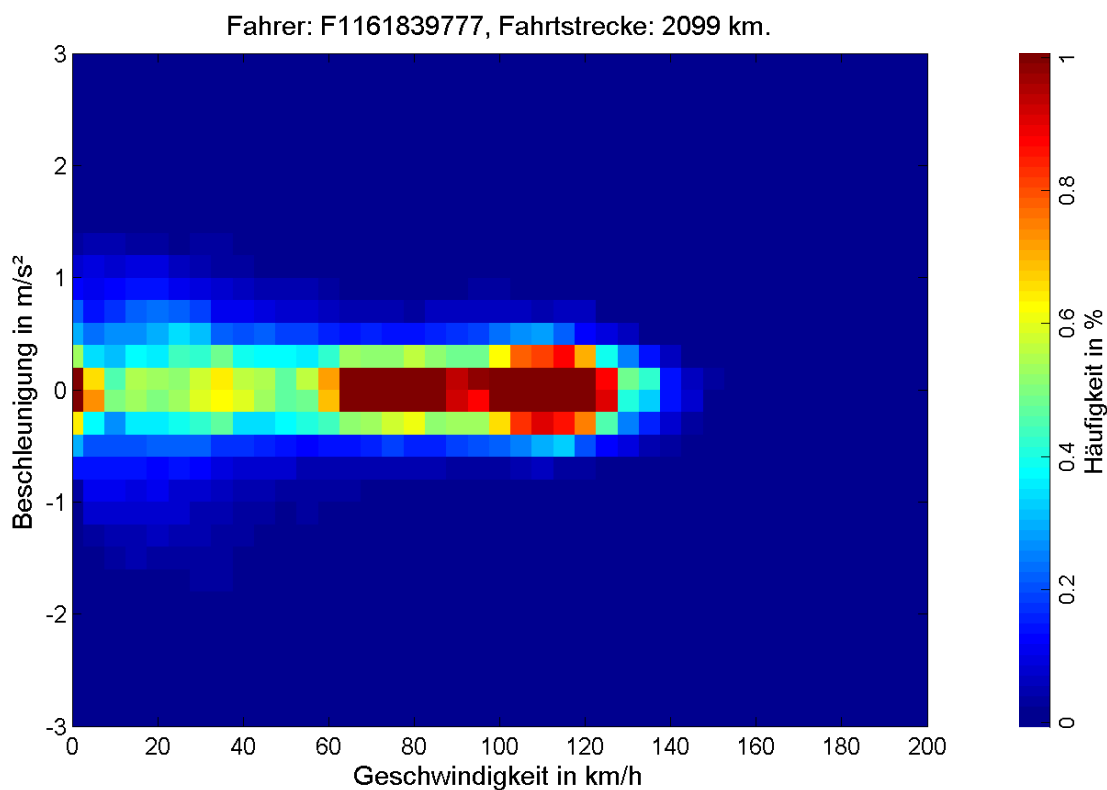


Abbildung 28: Visualisierung von Fahrerlogdaten als Histogramm von Geschwindigkeit und Längsbeschleunigung

¹ Siehe auch Albers et al. 2015b

Die Darstellung visualisiert die Fahrtdaten eines der Fahrer in der Fahrtdatenbank, für den ca. 2000 km erfasste Fahrt vorliegen. In den Fahrtmessungen liegen die hauptsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten zwischen 60 und 120 km/h, die maximale Fahrgeschwindigkeit liegt bei ca. 140 km/h.

Zur Bewertung der maximalen Längsbeschleunigung für die einzelnen Fahrgeschwindigkeiten bietet sich die alternative Darstellung der Histogramm Daten in Abbildung 29 an. Hierfür wurden die Histogrammwerte gebündelt und auf den jeweiligen Maximalwert normalisiert. Über eine logarithmische Achsenskalierung werden die Bereiche niedriger Häufigkeiten detaillierter aufgelöst als in der Histogrammdarstellung in Abbildung 28.

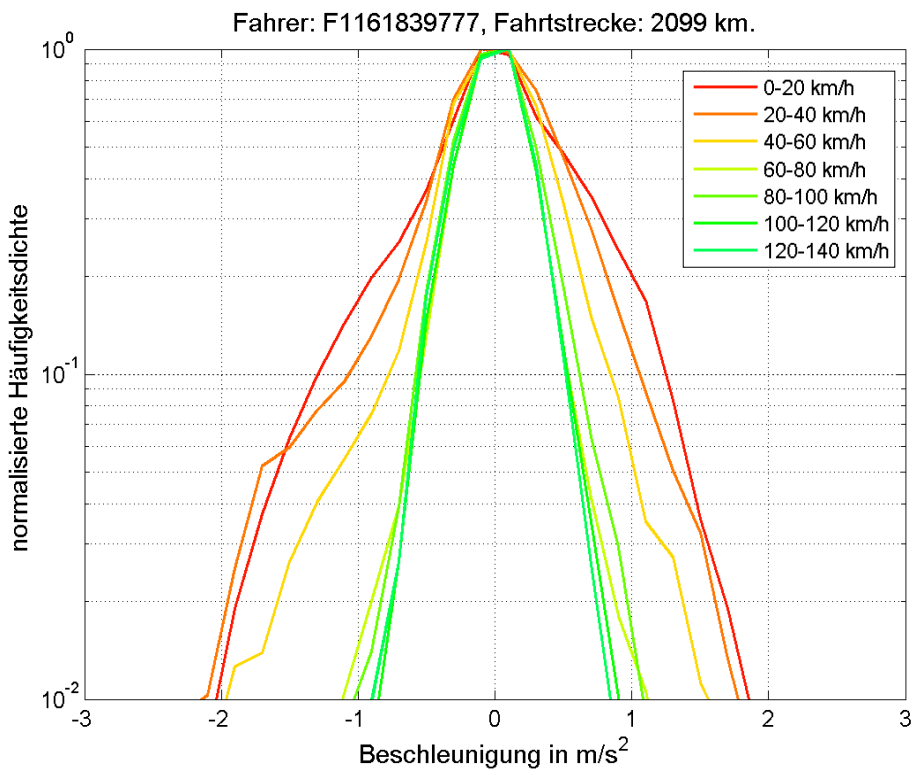


Abbildung 29: Visualisierung von Fahrerlogdaten als Häufigkeitsdichte der Beschleunigung für verschiedene Fahrtgeschwindigkeiten

Über die Histogrammdarstellung ist eine einfache visuelle Bewertung der verschiedenen Fahrer nach gefahrenen Streckentypen (entsprechend der gewählten Geschwindigkeiten) und Fahrstil (entsprechend der gefahrenen Beschleunigungen) möglich. Eine solche Auswahl von 12 verschiedenen Fahrern ist in Abbildung 30 und Abbildung 31 dargestellt.

mittlere Fahrtgeschwindigkeit

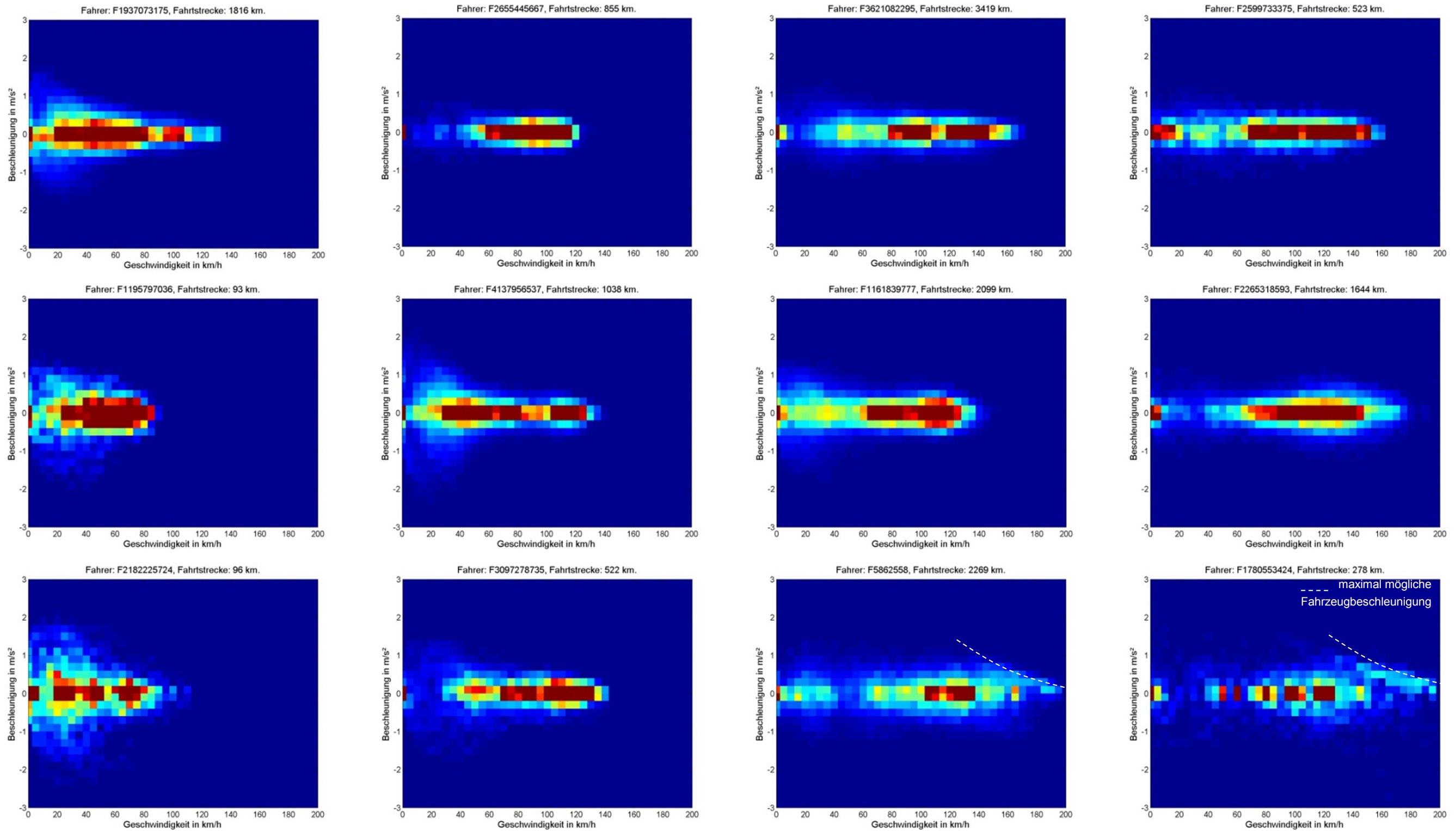
niedrig

hoch

niedrig

Beschleunigungen

hoch



Skalierung der Histogrammwerte:

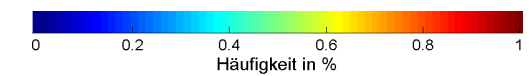


Abbildung 30: Vergleich der Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme für verschiedene Fahrer. Für die beiden Fahrer F5862558 und F1780553424 ist in der Darstellung die maximal mögliche Beschleunigung des Fahrzeugs (begrenzt durch die Motorleistung) erkennbar. Bei niedrigen bis mittleren Geschwindigkeiten weist die Verteilung der Beschleunigung jedoch ein sehr symmetrisches Bild auf.

mittlere Fahrtgeschwindigkeit

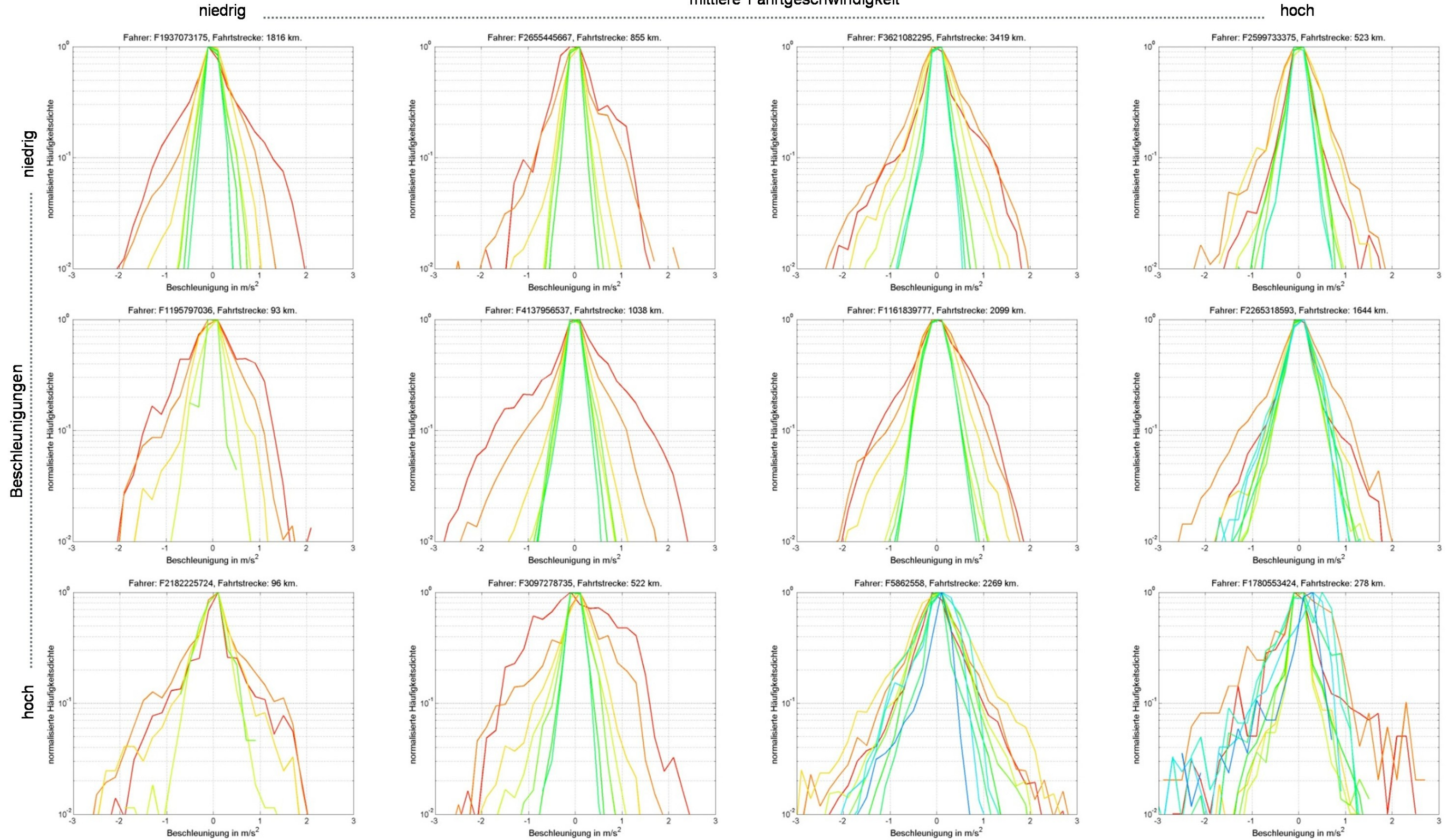
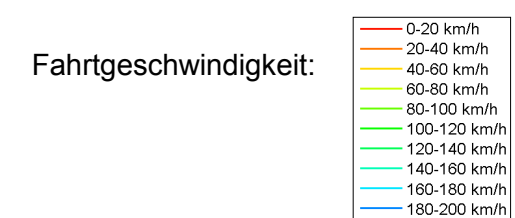


Abbildung 31: Vergleich der Beschleunigungshäufigkeiten für verschiedene Fahrer (Darstellung der normalisierten Häufigkeitsdichte über die Längsbeschleunigung)



Die Auswahl ist verschiedenen Einschränkungen unterworfen. Sie berücksichtigt nur einen Teil der verfügbaren Fahrtdaten, da nur 12 der 30 verfügbaren Fahrer dargestellt wurden. Beim Vorliegen sehr ähnlicher Fahrtdaten wurde einer der vorliegenden Fahrer ausgewählt (siehe Abbildung 32). Eine direkte Bewertung der Häufigkeit verschiedener Fahrstile ist somit nur begrenzt möglich.

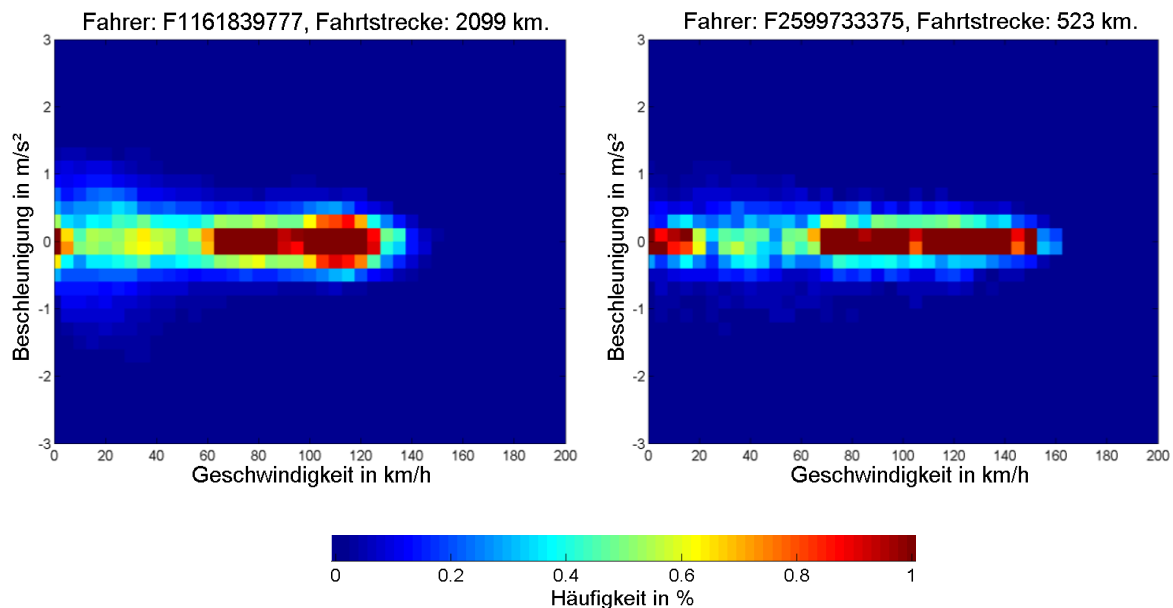


Abbildung 32: Exemplarischer Vergleich der Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme für zwei Fahrer, für die die Fahrtdaten ähnliche Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverteilungen aufweisen.

In weiten Fahrbereichen sind die ermittelten Beschleunigungshäufigkeiten für die einzelnen Fahrer symmetrisch aufgebaut – Vorwärtsbeschleunigungen und Bremsbeschleunigungen sind gleich verteilt (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31). Obwohl es sich bei Beschleunigen und Abbremsen um unterschiedliche Handlungen mit sehr unterschiedlichem Antwortverhalten des Systems Fahrzeug handelt, ergeben sich symmetrische Verteilungen in der Darstellung der Häufigkeitsverteilungen. Hauptsächlich bei hohen Fahrgeschwindigkeiten ist jedoch eine Asymmetrie der Verteilung erkennbar, bei der über einen längeren Zeitraum bei niedriger Vorwärtsbeschleunigung die Geschwindigkeit erhöht wird und kurzzeitig mit hoher Beschleunigung abgebremst wird (siehe Abbildung 33). Diese Begrenzung kann durch die maximale Leistungsabgabe des Verbrennungsmotors erklärt werden, die bei hohen Geschwindigkeiten die noch erzielbare Beschleunigung begrenzt (als Linien in Abbildung 30 eingezeichnet).

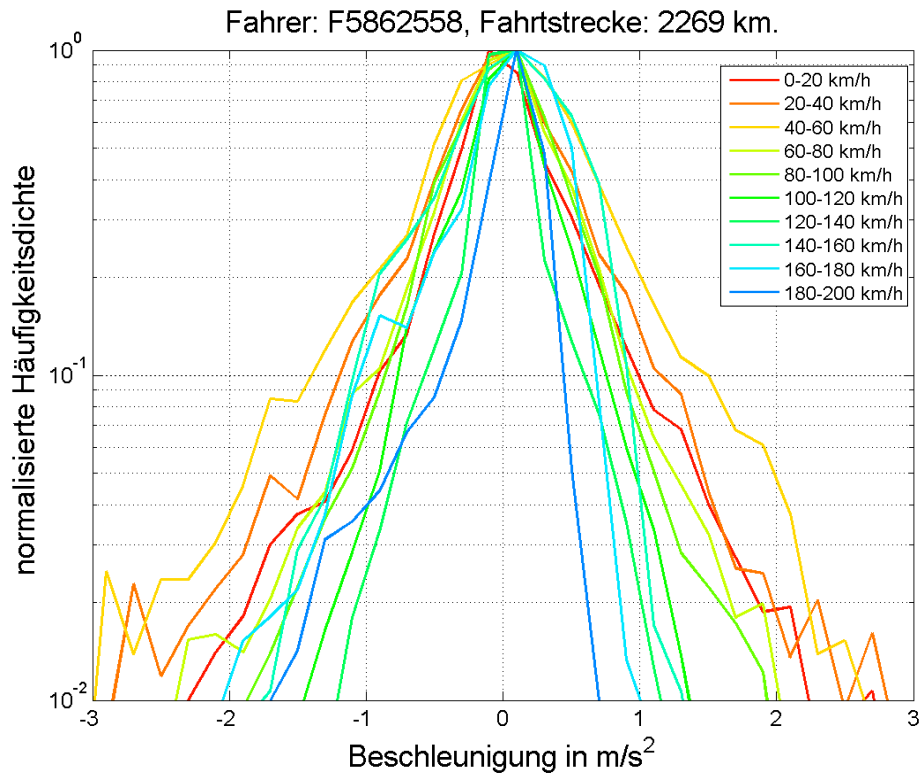


Abbildung 33: Beschleunigungshäufigkeiten für Fahrer F5862558. Während die gemessenen Beschleunigungen für niedrige und mittlere Geschwindigkeiten eine symmetrische Verteilung aufweisen zeigt sich bei hohen Geschwindigkeiten eine Assymetrie der Verteilung, die durch die maximale Leistungsabgabe des Motors und der daraus folgenden Begrenzung der möglichen Beschleunigung erklärt werden kann.

6.2.2 Vergleich der Fahrdaten mit Fahr- und Prüfzyklen

Die zur Bewertung der Fahrdaten entwickelten Auswertungsroutinen können alternativ auch zur Bewertung von Fahr- und Prüfzyklen verwendet werden. Exemplarisch sind in Abbildung 34 die Histogrammvisualisierungen zu WLTP-, Artemis- und NEFZ-Fahrzyklus dargestellt.¹

Die sehr synthetische Struktur des NEFZ-Fahrzyklus zeigt sich auch in der Histogrammvisualisierung, die qualitativ starke Abweichungen zu den Felddaten für einzelne Fahrer aufweist. WLTP- und Artemis-Zyklus liefern deutlich realitätsnähere Fahrgeschwindigkeiten als Vorgaben, wobei der WLTP-Zyklus eher einem „durchschnittlichen“ Fahrstil in den vorliegenden Fahrdaten zu entsprechen scheint, während der Artemis-Zyklus eher mit den Werten von sportlicheren Fahrern in der Fahrdatenbank korreliert.

¹ Vergleiche André 2004 bezüglich Artemis-Zyklus sowie Tutuianu et al 2013 bezüglich WLTP-Zyklus.

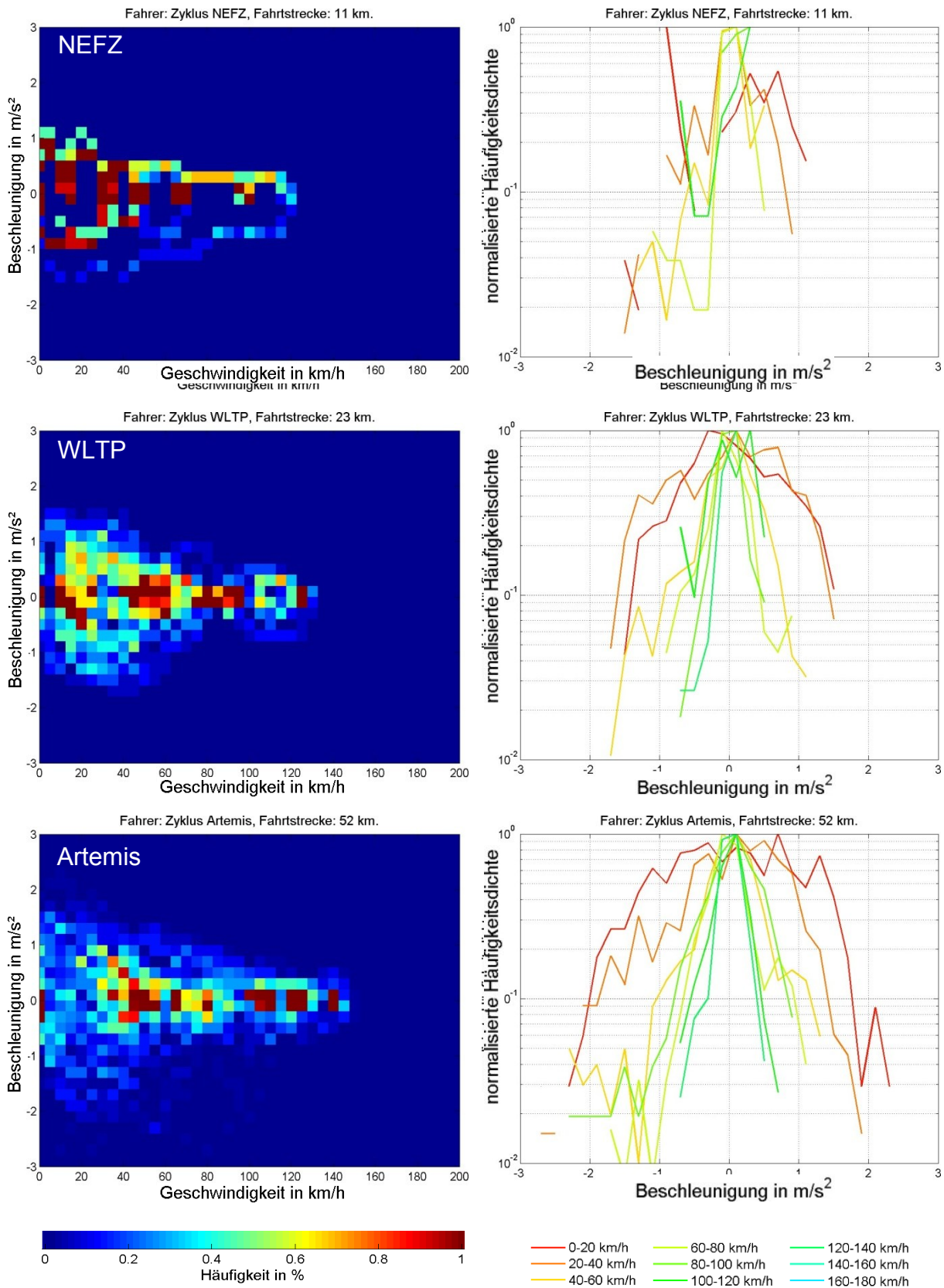


Abbildung 34: Auswertung der Häufigkeitsverteilung von NEFZ-, WLTP- und Artemis-Fahrzyklus. Im Vergleich zeigt sich ein deutlich „realitätsnäheres“ Bild für WLTP- und Artemis-Zyklus, während der NEFZ-Zyklus ein stark synthetisches Bild aufweist. Links: Beschleunigungshistogramme, Rechts: Häufigkeitsdichte Beschleunigung

6.2.3 Ableitung von Kennwerten zur Längsbeschleunigung

Auf Basis der Auswertung der Beschleunigungshäufigkeitsdichte kann eine Bewertung der maximal auftretenden Längsbeschleunigungen bei verschiedenen Fahrern abgeleitet werden¹. Um einen eindeutig ermittelbaren Wert aus den Histogrammen herauszugreifen, wird auf den Kennwert der Standardabweichung zurückgegriffen, obwohl die ermittelten Häufigkeitsverteilungen nur in ungefährender Näherung normalverteilt sind (siehe Abbildung 35).

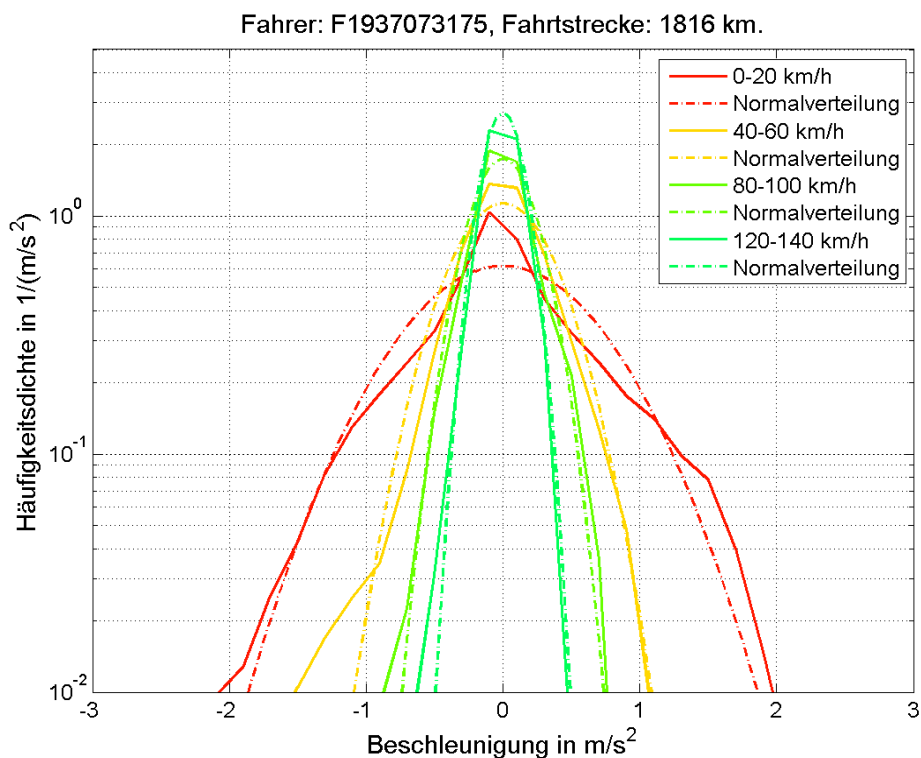


Abbildung 35: Vergleich zwischen den ermittelten Häufigkeitsdichtefunktionen der Beschleunigung und den über die Standardabweichungen ermittelten Normalverteilungen für verschiedene Fahrtgeschwindigkeiten

Wie bereits in der Diskussion der Visualisierung diskutiert (vergleiche Kapitel 6.2.1) ist die Häufigkeitsverteilung der Beschleunigung bei niedrigen bis mittleren Geschwindigkeiten symmetrisch und weist für steigende Geschwindigkeit eine abnehmende Streubreite auf. Dieser Effekt kann über die Visualisierung der

¹ Siehe auch Albers et al. 2015b

Standardabweichung der Beschleunigung für mehrere Fahrer in Abbildung 36 aufgezeigt werden.

In der Darstellung beinhaltet sind auch die verschiedenen in Kapitel 6.2.2 bewerteten Prüfzyklen. Die bisher subjektiv über die Histogrammdarstellung vorgenommene Bewertung der Prüfzyklen kann mit den ermittelten Standardabweichungen weiter quantifiziert werden, wonach der WLTP-Zyklus eher einem durchschnittlichen und der Artemis-Zyklus eher einem sportlichen Fahrer entspricht.

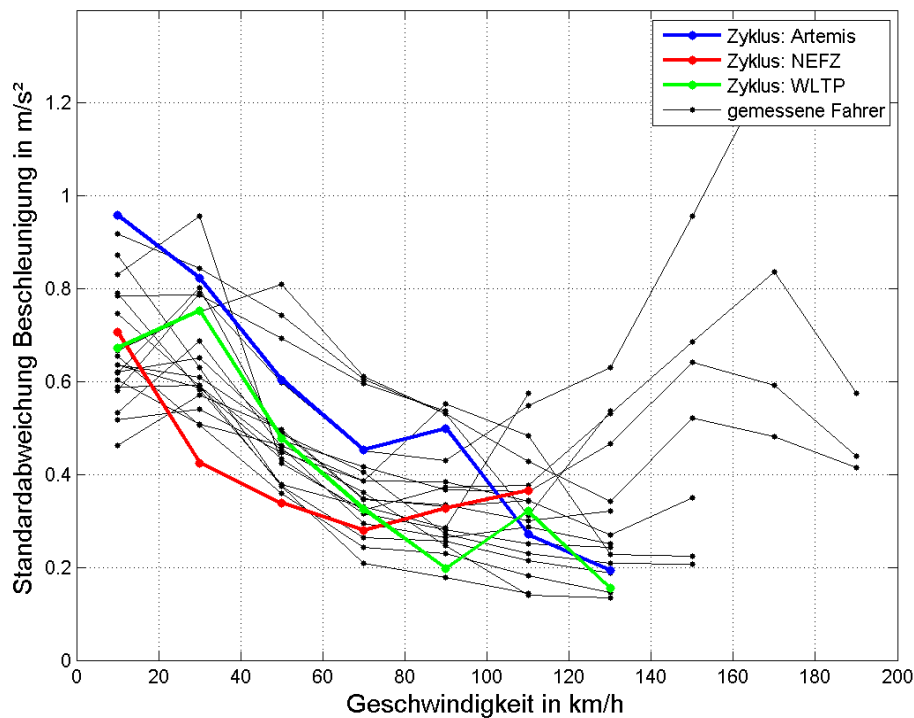


Abbildung 36: Vergleich der Standardabweichung der Beschleunigung für alle Fahrer mit mehr als 200 km gemessener Fahrtstrecke sowie für verschiedene Prüfzyklen

Ab einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 40 km/h nehmen die gefahrenen Beschleunigungen deutlich ab. Bei Geschwindigkeiten über 120 km/h nimmt die Standardabweichung der Längsbeschleunigung wieder zu, ein Effekt, der in der Literatur zum Fahrerverhalten bisher nicht wiedergegeben wird. Dieser Effekt kann über die bereits in Kapitel 6.2.1 diskutierte Asymmetrie der Beschleunigungsverteilung bei hohen Geschwindigkeiten und die damit verbundene Abnahme konstanter Fahrgeschwindigkeiten in diesem Bereich erklärt werden.

Auf Basis der Darstellung können die in Tabelle 8 angegebenen Kennwerte für die erwartete Beschleunigung bei verschiedenen Fahrern und Fahrtgeschwindigkeiten abgeleitet werden.

Tabelle 8: Erwartete Werte für die Standardabweichung der Beschleunigung bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten und Fahrstilen.

Fahrgeschwindigkeit	Zurückhaltend	Normal	Sportlich
0 bis 40 km/h	$\sigma = 0,5 \text{ m/s}^2$	$\sigma = 0,7 \text{ m/s}^2$	$\sigma = 0,9 \text{ m/s}^2$
80 bis 120 km/h	$\sigma = 0,2 \text{ m/s}^2$	$\sigma = 0,35 \text{ m/s}^2$	$\sigma = 0,5 \text{ m/s}^2$
> 140 km/h	-	$\sigma = 0,5 \text{ m/s}^2$	$\sigma = 0,8 \text{ m/s}^2$

Ungefähr kann die Abhängigkeit α der ermittelten Beschleunigungs-Standardabweichung von der Fahrtgeschwindigkeit durch die Funktion in Gleichung 1 angenähert werden:

$$\alpha(v) = 0.01 \cdot \begin{cases} 12 & \text{wenn } v < 36 \text{ km/h} \\ 7 & \text{wenn } v > 165 \text{ km/h} \\ 0.001 \cdot (v \text{ in km/h} - 120)^2 + 5 & \text{sonst} \end{cases} \quad (1)$$

Über die Abhängigkeit können die ermittelten Beschleunigungskennwerte auf einen einzelnen Kennwert für die Fahrt nach Gleichung 2 reduziert werden:

$$\text{Kennwert} = \sum_{v=0}^{v_{\max}} \frac{\sigma_{\text{Beschleunigung}}(v)}{\alpha(v)} \cdot \text{Anteil}(v) \quad (2)$$

Die in Gleichung 2 verwendeten Bezeichnungen sind definiert zu:

v	Bereich der Fahrtgeschwindigkeit, z. B. 0 .. 20 km/h
$\sigma_{\text{Beschleunigung}}(v)$	Standardabweichung der Beschleunigung
$\text{Anteil}(v)$	Zeitlicher Anteil von v an der Gesamtmessung

Die Gewichtungsfunktion in Gleichung 1 ist dabei so skaliert, dass die über Gleichung 2 ermittelten Kennwerte im einstelligen Zahlenbereich liegen. Die ermittelten Kennwerte für die verschiedenen Fahrer sind gemeinsam mit den Werten für die verschiedenen Fahrzyklen in Abbildung 37 dargestellt.

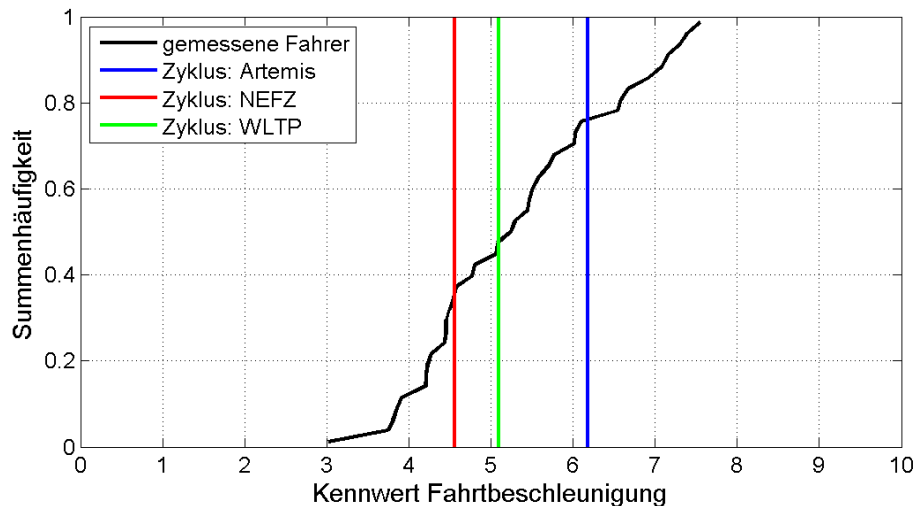


Abbildung 37: Verteilung der Kennwerte für die 34 in der Fahrtdatenbank verfügbaren Fahrer als Summenhäufigkeit und Kennwerte für die verschiedenen Prüfzyklen

Im Bereich der Bewertung des Fahrstils zeigt sich allgemein eine gute Korrelation zwischen subjektiv empfundenen Fahrstil und gemessenen Beschleunigungswerten. Aus der oben getroffenen Darstellung heraus können den verschiedenen Fahrstilen die in Tabelle 9 angegebenen Kennwerte zugeordnet werden.¹

Die vorgeschlagene Methodik der Reduktion der Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Kollektive ist ein Ansatz, gemessenen Fahrprofilen einen einzelnen Kennwert zur Bewertung des Beschleunigungsverhaltens des Fahrers zuzuordnen, mit dem Fahrzyklen und Prüfprofile bewertet werden können. Die Ermittlung eines einzelnen Kennwerts ermöglicht eine vereinfachte Bewertung und Einordnung von Fahrtdaten, stellt gleichzeitig aber auch eine starke Reduzierung der Datenmenge dar. Für die Anwendung der Methodik wird deshalb die gleichzeitige Bewertung der Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Histogramme gemäß Kapitel 6.2.1 empfohlen.

Tabelle 9: Einteilung der Fahrstile und ungefähre Zuordnung zu den ermittelten Kennwerten nach Gleichung 2

Fahrstil	Erwarteter Kennwert nach Gleichung 2
Zurückhaltend	3 .. 4.5
Normal	4.5 .. 6
Sportlich	6 .. 7.5

¹ Vergleiche Kapitel 2.2.2 sowie Albers et al. 2015b

6.2.4 Häufigkeit von Stopp- und Anfahrvorgängen

Neben den gefahrenen Beschleunigungen ist auch die Bewertung der Häufigkeit von Stopp- und Anfahrvorgängen von prinzipieller Relevanz. Die Häufigkeitsverteilung von Anfahrvorgängen wurde in den vergangenen Jahren mit der Einführung von Start-Stopp-Systemen bei OEMs und Automotive-Zulieferern verstärkt diskutiert und spielt auch für die Auslegung von Kupplungssystemen eine entscheidende Rolle.

Zur Bewertung der Anzahl von Anfahrten wurden alle verfügbaren Fahrtmessungen auf die Anzahl der Anfahrvorgänge pro Kilometer hin untersucht. Längere Fahrtmessungen wurden dabei in 20-Minuten-Abschnitte unterteilt, um eine genauere Aufschlüsselung zwischen verschiedenen Fahrtbereichen und eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlich langen Fahrtmessungen zu ermöglichen.

In den untersuchten 35 000 km Fahrtdaten treten ca. 9 500 Anfahrvorgänge auf. Das Ergebnis der Auswertung kann als Darstellung der Anfahrhäufigkeit über die mittlere Geschwindigkeit einer Fahrtmessung visualisiert werden (siehe Abbildung 38).

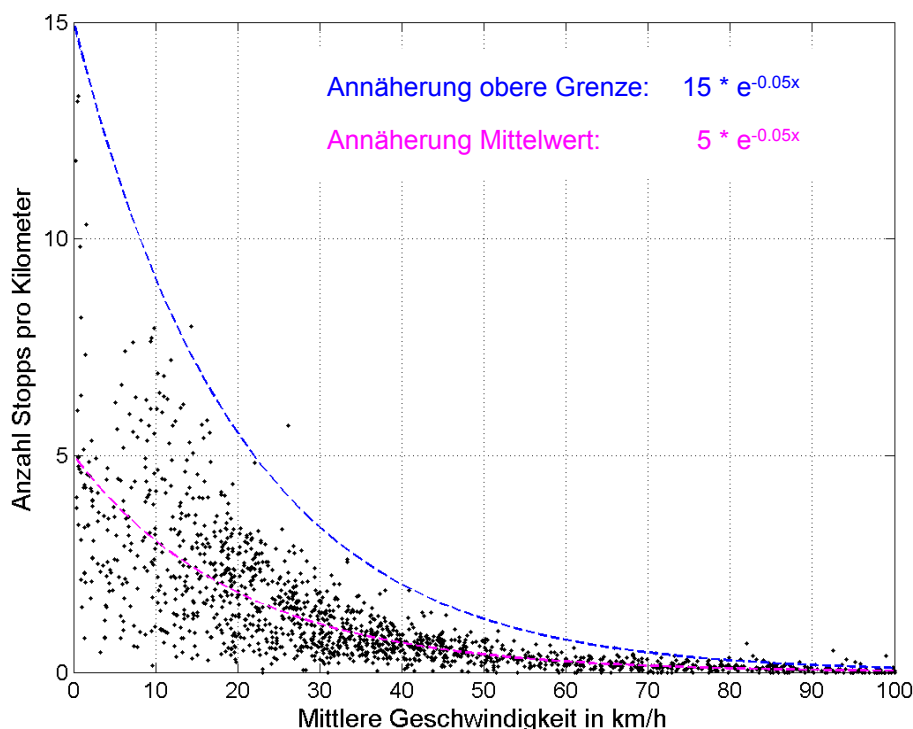


Abbildung 38: Anzahl von Stoppvorgängen pro Kilometer über die mittlere Geschwindigkeit der einzelnen Fahrtabschnitte. Lange Fahrtmessungen, die die Dauer von 20 Minuten überschreiten, wurden in einzelne Abschnitte aufgeteilt, um eine gleichmäßigere Verteilung der betrachteten Fahrtlängen und eine Berücksichtigung unterschiedlicher Streckentypen, die bei langen Fahrten auftreten, zu erreichen.

Die Darstellung zeigt eine starke Streuung der Anzahl der Stoppvorgänge über die verschiedenen Fahrtmessungen, wobei der Streubereich sehr stark von der mittleren Geschwindigkeit der Fahrt abhängig ist. In ungefährender Näherung kann eine Abschätzung der Abhängigkeit über die eingezeichneten Annäherungskurven vorgenommen werden.

Basierend auf der Auswertung können für die Startanzahl Erwartungswerte in Abhängigkeit der mittleren Fahrgeschwindigkeit definiert werden (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Erwartungswerte für die Anzahl von Stopp- und Anfahrvorgängen über verschiedene Streckentypen. Interpretation der Ergebnisse von ca. 35.000 km gemessener Fahrt, die 34 unterschiedliche Fahrer beinhaltet.

Fahrbereich	mittlere Geschwindigkeit	typische Anzahl Anfahrvorgänge
Stop and Go	0 ... 10 km/h	5 Anfahrten / km
Stadtverkehr	20 km/h	2 Anfahrten / km
Stadt u. Land gemischt	50 km/h	0.4 Anfahrten / km
Autobahn	100 km/h	<0.1 Anfahrten / km

Neben der Häufigkeit der Anfahrvorgänge kann auch die Anfahrbeschleunigung der einzelnen Anfahrvorgänge bewertet werden. Hierzu wird eine Ausgleichsgerade in den Fahrbereich zwischen 1 und 3 m/s Fahrzeuggeschwindigkeit gelegt, um ein stabiles Auswertungsergebnis unabhängig von der Messungenauigkeit des verwendeten Messsystems zu erhalten. Auf dieser Basis können die in Abbildung 39 dargestellten Verteilungen der Anfahrbeschleunigung ermittelt werden.

An der Darstellung ist auffällig, dass die Beschleunigung beim Anfahren für die einzelnen Fahrer zwischen Anfahrvorgängen stark streut: Für alle betrachteten Fahrer liegen Anfahrten mit sehr geringer Anfahrbeschleunigung sowie Anfahrten mit höheren Beschleunigungen bis 2.5 m/s², teilweise bis 4 m/s² vor. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrern sind bezogen auf die Summenkurve vergleichsweise gering: Der Bereich der einzelnen Fahrer kann gut über die Skalierung der Häufigkeitsverteilung für alle Anfahrvorgänge um ± 30 % abgedeckt werden. Damit erscheint die Anfahrbeschleunigung eines einzelnen Anfahrvorgangs kein guter Kennwert zur Beurteilung des Fahrstils zu sein. Die Betrachtung lässt stattdessen erwarten, dass ein nennenswerter Einfluss der Fahrsituation auf die Beschleunigung bei einzelnen Anfahrvorgängen auftritt.

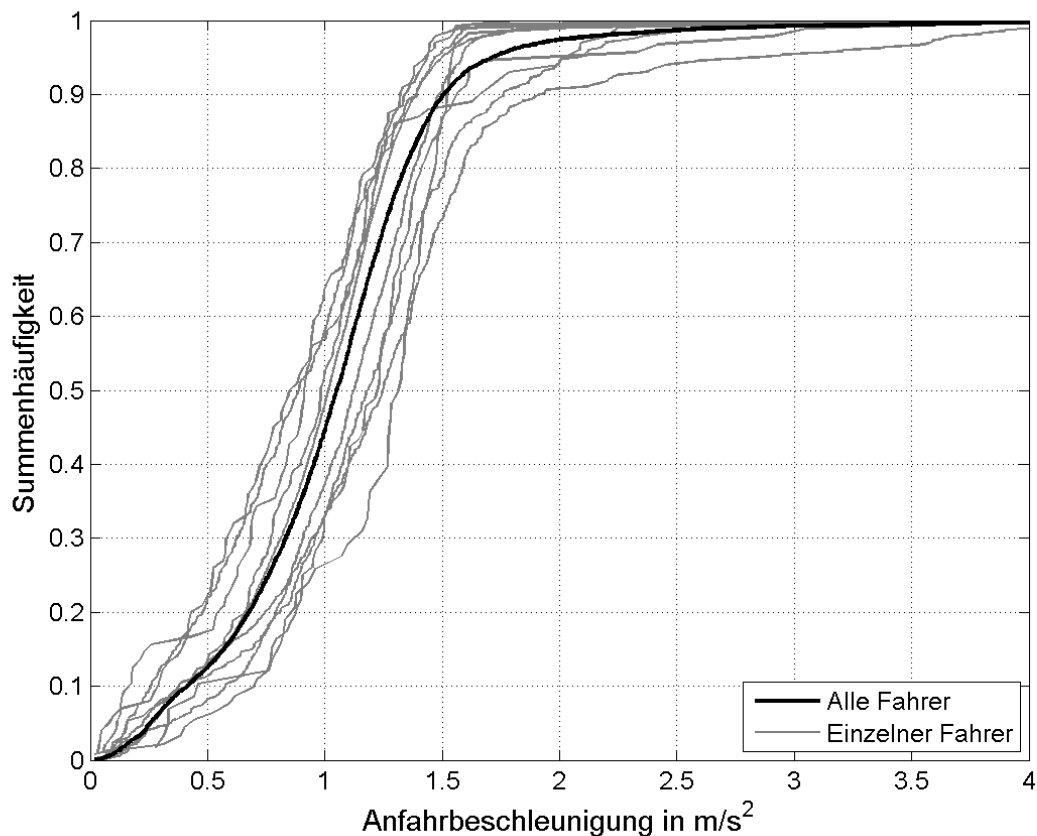


Abbildung 39: Darstellung der Summenhäufigkeit der Anfahrbeschleunigung für alle ca. 9500 erfassten Anfahrvorgänge der vorliegenden Datenbasis sowie für 12 einzelne Fahrer (jeweils mindestens 100 einzelne Anfahrvorgänge).

6.2.5 Abhängigkeit des Fahrtverhaltens von Fahrzeug und Beladung

Im Allgemeinen wird im Bereich von Last- und Verschleißmodellierung das Fahrerverhalten aufgetrennt nach Fahrtstrecke, Fahrstil und Beladung (siehe auch Kapitel 2.2.2). Im Gegensatz zu den im Rahmen der 3F-Methode durchgeführten Messungen¹ sind in den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fahrtmessungen keine systematischen Variationen der einzelnen Einflussparameter durchgeführt worden. Für einzelne Fahrer liegen durch die Verwendung mehrerer eigener Fahrzeuge oder die Nutzung von Carsharing, Dienst- und Mietwagen dennoch Messungen für mehrere Fahrzeuge vor. Zusätzlich liegen in zwei Fällen für Fahrer im Rahmen von Umzugs- und Transportfahrten Messdaten mit leerem und vollem Fahrzeug bzw. mit und ohne Anhänger vor.

¹ Siehe Müller-Kose 2002, Kassel 2009.

Zum Vergleich des *Fahrerverhaltens bei unterschiedlicher Fahrzeugbeladung* werden die Fahrtdaten für vorliegende Fahrzeuge mit unterschiedlichen Beladungen als Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme in Abbildung 40 (Umzugsfahrten mit einem Sprinter-Kleintransporter) und Abbildung 41 (VW-Kleinbus mit und ohne Anhänger) dargestellt. Im Vergleich ist für die Fahrten mit leerem und beladenem Kleintransporter in Abbildung 40 kein signifikanter Unterschied des Fahrerverhaltens zu sehen, während für die Fahrten in Abbildung 41 durch den Fahrzeuganhänger eine starke Veränderung des Fahrverhaltens erfolgt.

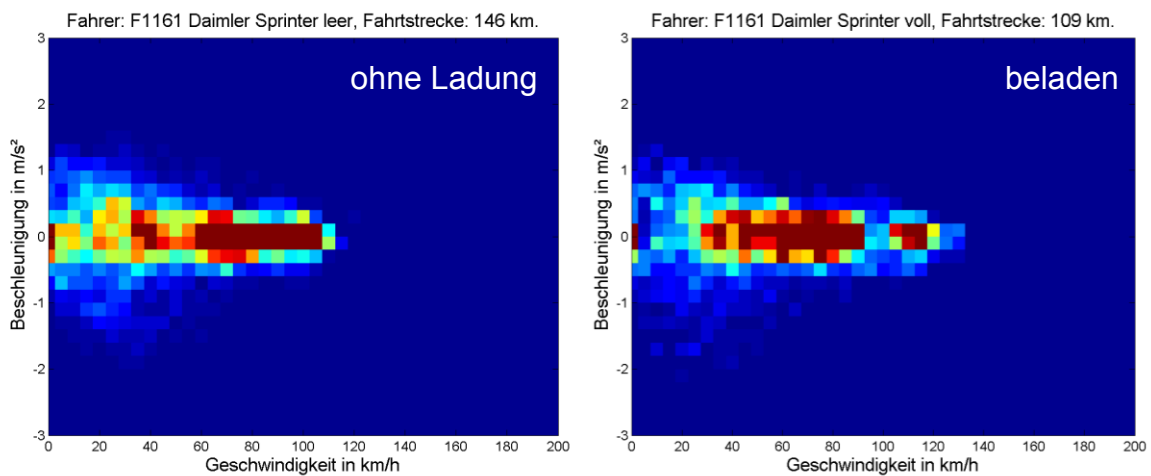


Abbildung 40: Vergleich der Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme für Fahrer F1161839777 mit einem Daimler Sprinter, unterteilt nach Fahrten mit und ohne Beladung (Hintergrund der Fahrtdaten: Transportfahrten für Umzug)

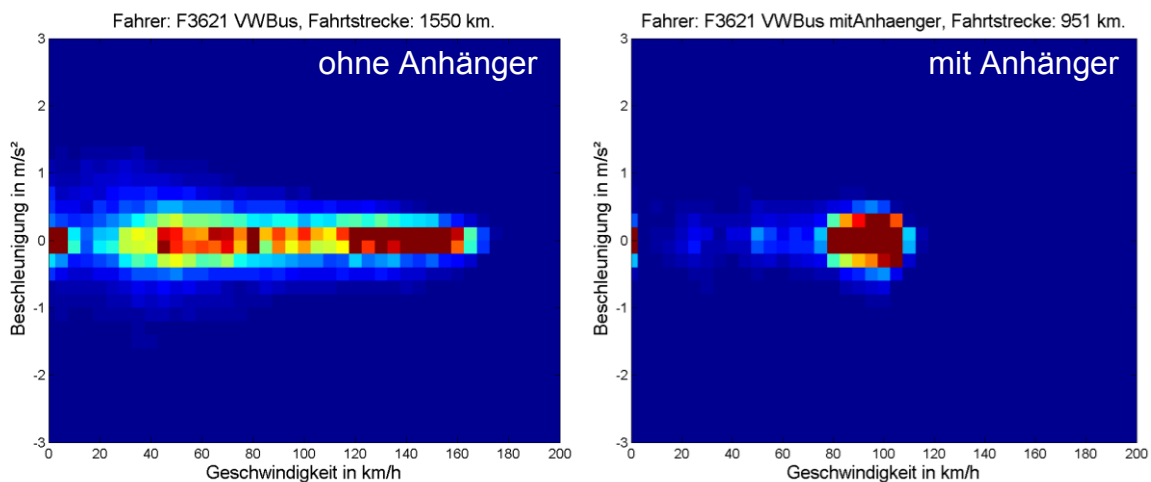


Abbildung 41: Vergleich der Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme für Fahrer F3621082295 mit einem VW T6 Kleinbus, getrennt nach Fahrtemessungen mit und ohne Anhänger. Bei den Fahrtdaten mit Anhänger handelt es sich fast ausschließlich um Autobahnfahrten. In der Auswertung zeigt sich eine Veränderung des Fahrstils, die auch mit der vorgeschriebenen Begrenzung der Fahrtgeschwindigkeit erklärt werden kann.

Zum Vergleich der *Auswirkungen verschiedener Fahrzeuge auf den Fahrstil* wird die Bewertung der Standardabweichung der Beschleunigung bei verschiedenen Fahrtgeschwindigkeiten herangezogen. Die ermittelten Werte sind für verschiedene Fahrer, aufgeschlüsselt nach den verwendeten Fahrzeugen, in Abbildung 42 dargestellt.

Im Vergleich zeigt sich eine relativ geringe Streuung bezüglich der ermittelten Beschleunigungsabweichung zwischen den verschiedenen Fahrzeugen für die einzelnen Fahrer. Somit weist die entwickelte *Methode der Beschreibung des Fahrerverhaltens über Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme und die Standardabweichung der Längsbeschleunigung* eine weitgehende Unabhängigkeit vom gefahrenen Fahrzeug auf. Im Rahmen *typischer Fahrten*, also unter Ausschluss von Spezialfahrten wie der beschriebenen Fahrt mit Anhänger oder auch einer Testfahrt in einem Sportwagen, scheint das Fahrzeug den Fahrstil des Fahrers nicht oder nur geringfügig zu beeinflussen.

Um den beschriebenen Einfluss eingrenzen zu können, wurden im Rahmen der Ergebnisinterpretation einzelne Fahrer zu ihrem Fahrstil und der Wahrnehmung unterschiedlicher Fahrzeuge befragt. Die Befragung ergab, dass die Fahrer bestimmte Fahrzeugtypen bevorzugten: Defensiv fahrende Fahrer lehnten sehr sportlich abgestimmte Fahrzeuge ab (Bezeichnung als „Dreckschleuder“ oder „Protzfahrzeuge“), während Fahrer mit einem sportlichen Fahrstil Fahrzeuge, die diesen aufgrund einer kleinen Motorisierung nicht ermöglichen, in ähnlicher Weise ablehnen (Beschreibung von Fahrzeugen als „untermotorisiert“ oder „inakzeptabel“).

Die vorliegenden Daten können dahingehend interpretiert werden, dass nicht das Fahrzeug den Fahrstil des Fahrers beeinflusst, sondern der Fahrer wählt das Fahrzeug im Hinblick auf den von ihm gewünschten Fahrstil aus. Dabei ist die Datenmenge, auf der diese Schlussfolgerungen beruhen, stark eingeschränkt, da nur für wenige Fahrer mehrere Fahrzeuge oder unterschiedliche Beladungen untersucht wurden.

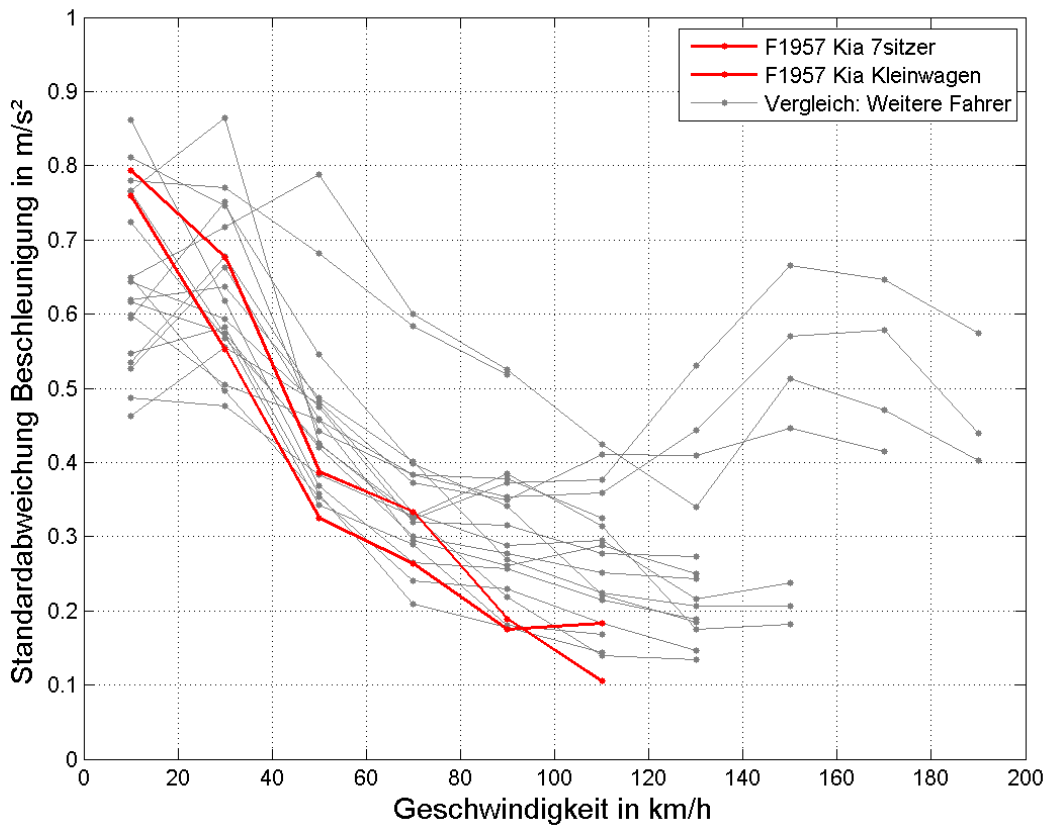
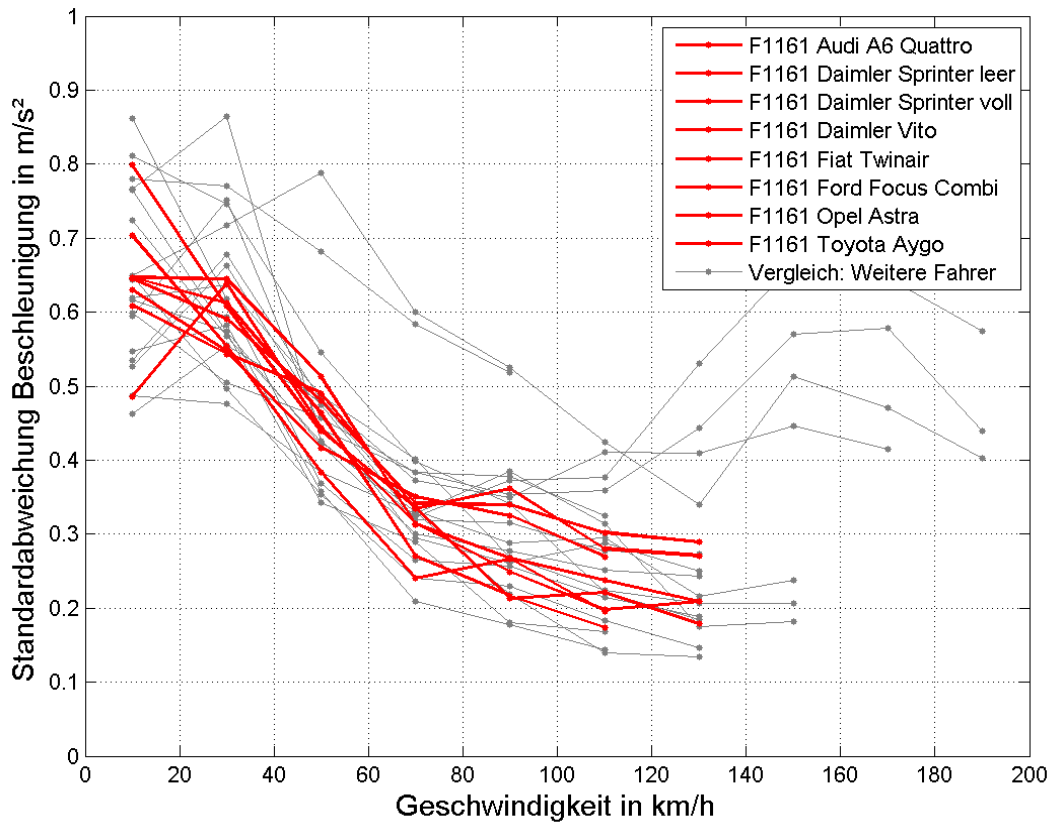


Abbildung 42: Darstellung der Beschleunigungswerte bei Nutzung verschiedener Fahrzeuge durch einen Fahrer

6.2.6 Vergleich verschiedener Fahrer auf identischen Strecken

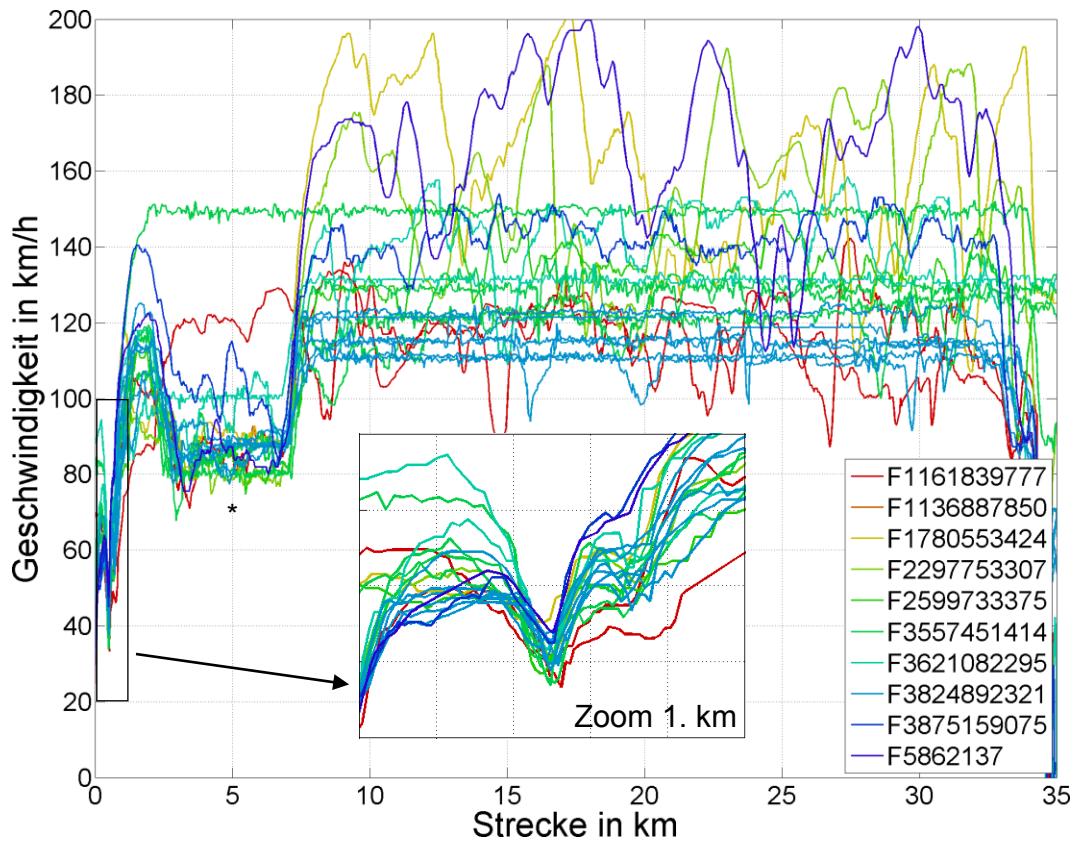
Über die in den Fahrtmessungen hinterlegten GPS-Daten besteht die Möglichkeit, direkte Vergleiche verschiedener Fahrer auf der gleichen Fahrtstrecke darzustellen. Dies wird im Folgenden für vier Strecken, bei denen vergleichsweise viele Fahrtmessungen vorliegen, durchgeführt.

Die Auswahl der Strecke erfolgt über die Festlegung mehrerer Wegpunkte, auf die die GPS-Daten gefiltert werden. Für die Betrachtung wurde eine Toleranz von ± 20 m für die einzelnen Wegpunkte verwendet, die in der Betrachtung gute Filterungsergebnisse geliefert hat.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 bis Abbildung 46 dargestellt. Ergänzend zeigt Abbildung 47 eine Kartendarstellung der betrachteten Streckenabschnitte.

Aus den Visualisierungen heraus ergibt sich eine gute qualitative Abbildung der Fahrtunterschiede zwischen einzelnen Fahrern und der Unterschiede für einzelne Fahrten eines einzelnen Fahrers auf einer bestimmten Strecke. Die Darstellungen können so interpretiert werden, dass es eine Bandbreite unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten gibt, die Strecke und Verkehr in einer bestimmten Situation ermöglichen und innerhalb derer unterschiedliche Fahrer ihren jeweiligen Fahrstil wählen. Für einzelne Fahrsituationen ist die Streubreite zwischen verschiedenen Fahrern erstaunlich gering (siehe etwa die Autobahnauffahrt in Abbildung 43 oder den Landstraßenbereich in Abbildung 46), im Rahmen einer mehrspurigen Autobahn ergeben sich jedoch signifikante Unterschiede zwischen der Fahrgeschwindigkeit der einzelnen Fahrer.

Zusätzlich kann für Autobahnfahrten eine klare Unterscheidung zwischen Fahrt mit Tempomat und mit eigener Geschwindigkeitswahl ausgewiesen werden: Während Fahrten mit Tempomat eine durchgehend konstante Fahrgeschwindigkeit über längere Strecken aufweisen, liegt bei eigener Geschwindigkeitswahl der Fahrer – vermutlich auch bedingt durch den umgebenden Verkehr – eine starke Schwankung der Fahrgeschwindigkeit vor (siehe Abbildung 43ff).



*) Über einen Großteil des Erfassungszeitraums lag im Bereich 3-7 km eine Baustelle mit Begrenzung der Geschwindigkeit auf 80 km/h vor.

Abbildung 43: Vergleich der Fahrtgeschwindigkeit mehrerer Fahrer auf der A5 ab Auffahrt Bühl Richtung Karlsruhe. Die Autobahnauffahrt beginnt ab 0,5 km Wegstrecke.

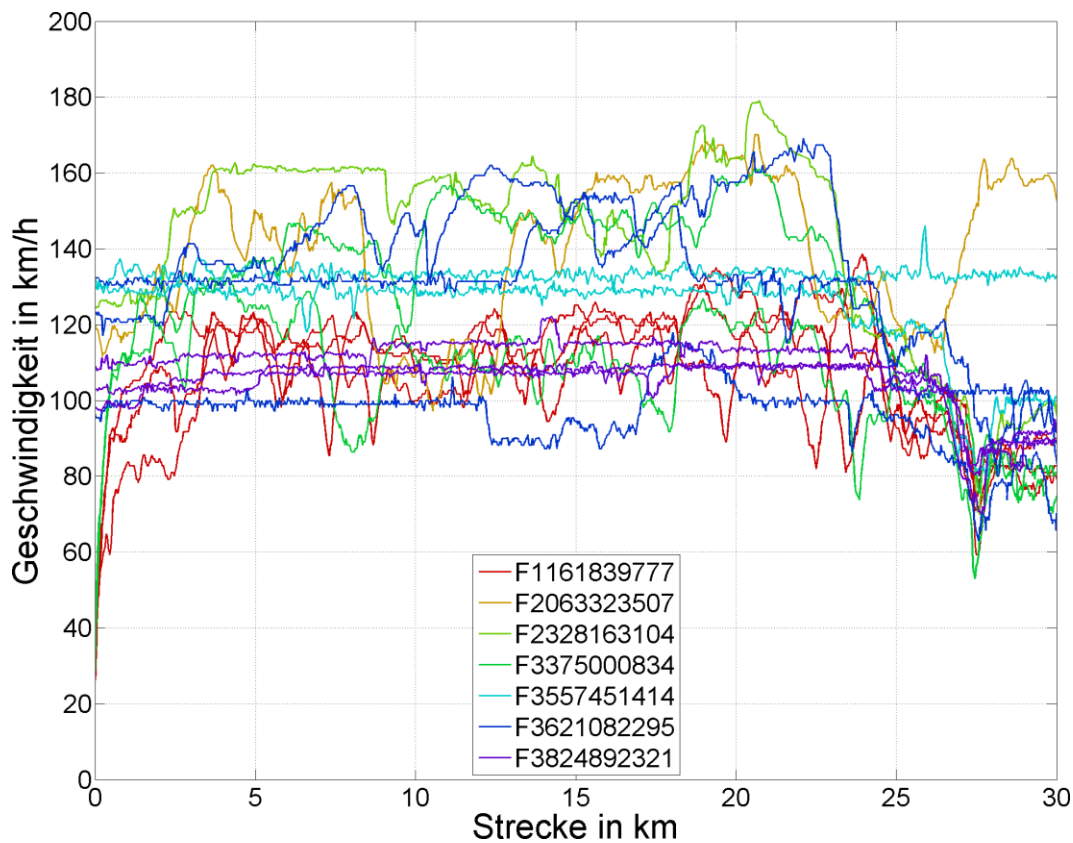


Abbildung 44: Vergleich der Fahrgeschwindigkeit mehrerer Fahrer auf der A5 zwischen Ettlingen und Bühl

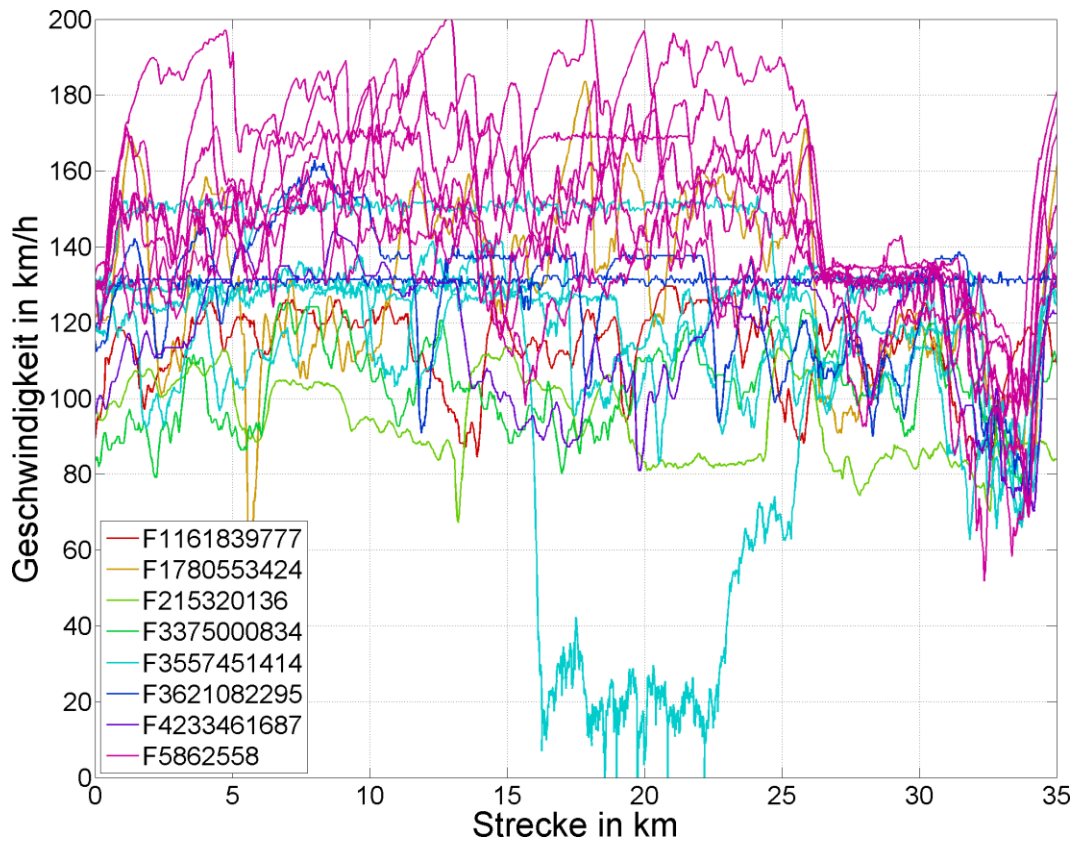


Abbildung 45: Vergleich der Fahrgeschwindigkeit mehrerer Fahrer auf der A5 zwischen Karlsruhe und Autobahnkreuz Walldorf

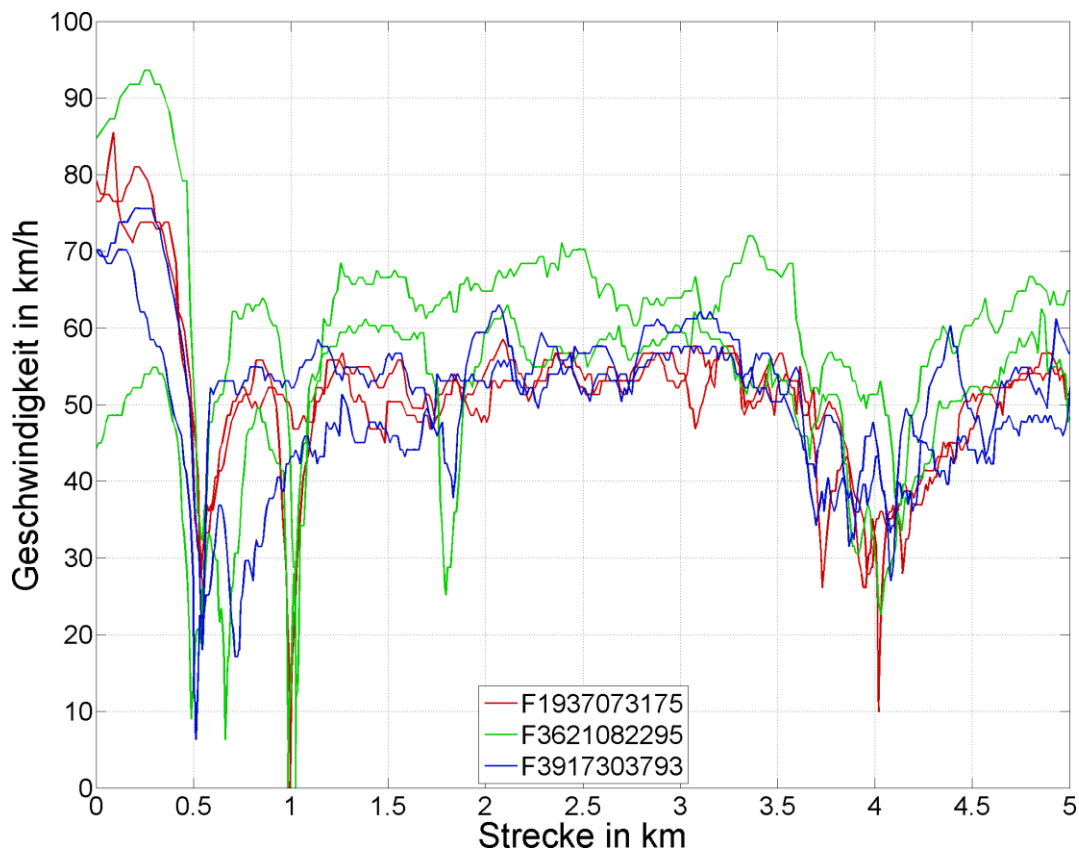
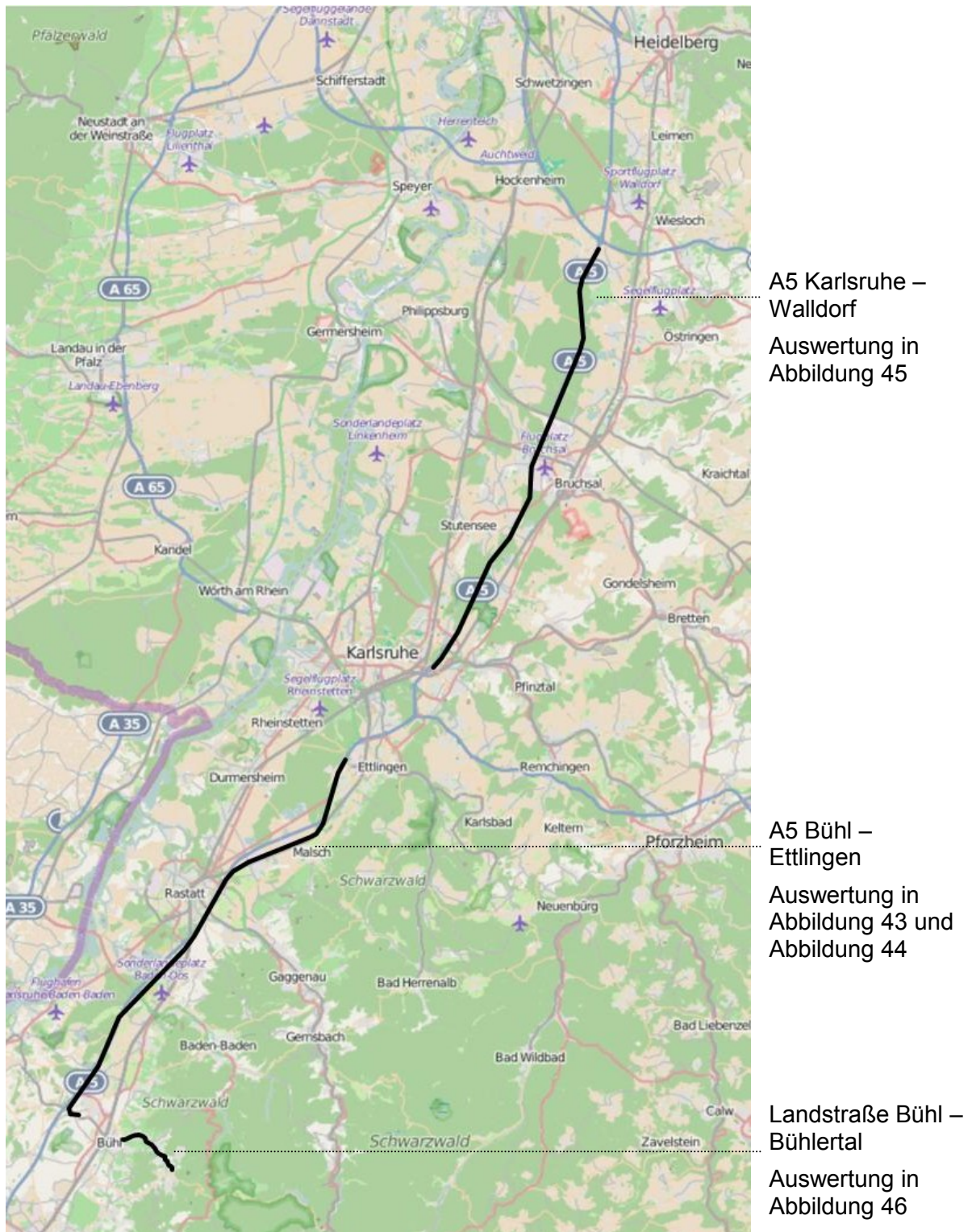


Abbildung 46: Vergleich der Fahrgeschwindigkeit mehrerer Fahrer auf der Landstraße mit Ortsdurchfahrten zwischen Bühl und Bühlertal



A5 Karlsruhe –
Walldorf
Auswertung in
Abbildung 45

A5 Bühl –
Ettlingen
Auswertung in
Abbildung 43 und
Abbildung 44

Landstraße Bühl –
Bühlertal
Auswertung in
Abbildung 46

Abbildung 47: Abbildung der ausgewählten Strecken für den Vergleich verschiedener Fahrer (siehe vorangegangene Seiten). Verwendung von OpenStreetMap Kartendaten unter Creative Commons CC BY-SA, © OpenStreetMap-Mitwirkende – siehe Anhang B

6.2.7 Auswertung von Gangwahl und Schaltwechseln

Für einen Teil der erfassten Fahrtmessungen beinhalten die aufgezeichneten Fahrtmessungen auch die Signale für Motordrehzahl und Motorlast aus dem fahrzeuginternen CAN-Bus-Signal. Für die in den Messdaten enthaltenen Automatik- und Hybridfahrzeuge liefern die gemessenen Daten zusätzliche Informationen zur Schalt- und Betriebsstrategie des Getriebes, die nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. Für Handschalter kann jedoch zusätzlich zu der bereits ausführlich erfolgten Bewertung von Fahrgeschwindigkeit und –beschleunigung auch das Schaltverhalten des Fahrers bewertet werden.

Hierzu wird aus erfasster Motordrehzahl und Fahrzeuggeschwindigkeit die Übersetzung des Antriebsstrangs ermittelt, über die die einzelnen Gänge ausgewertet werden können. Eine Auswertung der verschiedenen Übersetzungsverhältnisse ist für einen Ford Focus exemplarisch in Abbildung 48 dargestellt. In der Darstellung sind die einzelnen Gänge mit steigender Übersetzung sowie die Leerlaufdrehzahl des Motors, für die die einzelnen Messpunkte bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten auf einer ansteigenden Gerade liegen, gut erkennbar.

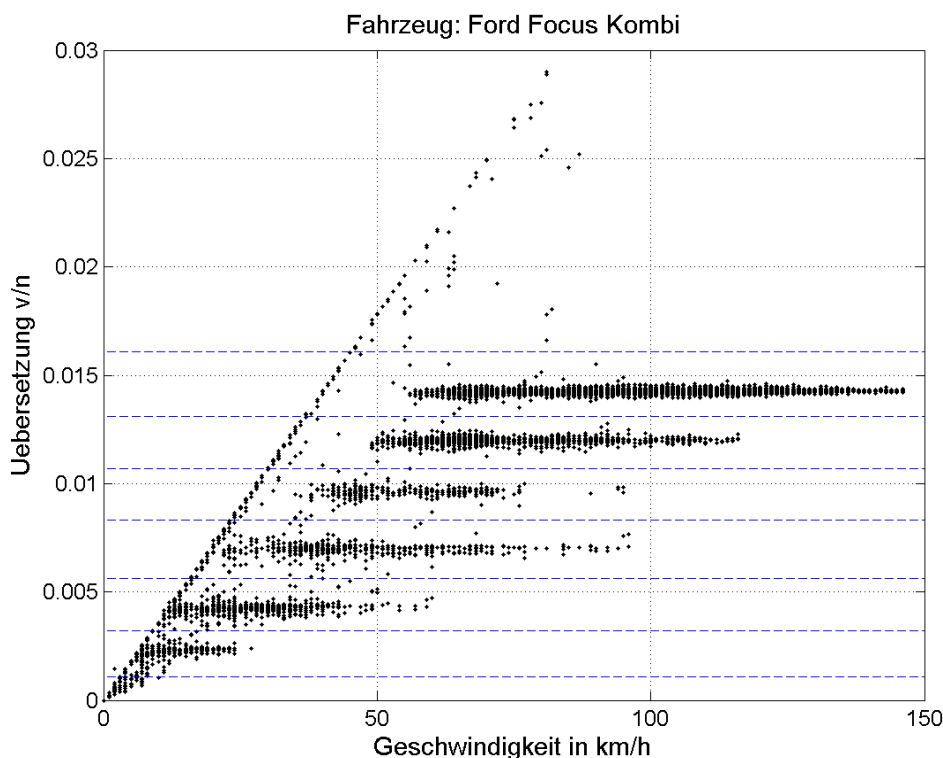


Abbildung 48: Verhältnis zwischen Fahrgeschwindigkeit und Motordrehzahl für einen Ford Focus mit 6-Gang-Handschaltergetriebe und 4-Zylinder-Dieselmotor. Dargestellt

Für die verwendete Darstellung wird die fahrzeuginterne Größe der Motorlast verwendet, die im Bereich 0 bis 100 % liegt. Für einzelne Fahrzeuge ergeben sich teilweise unterschiedliche Angaben des Werts durch die Motorsteuerung – beispielsweise wird für die Anwendung in Abbildung 49 der Wertebereich $<10\%$ und $>98\%$ nicht ausgenutzt.

Als Alternative zur Aufschlüsselung nach den einzelnen Gängen bietet sich die Darstellung der Schaltpunkte für alle Gänge in einem einzelnen Diagramm an (siehe Abbildung 50). Ergänzt wurden in der Darstellung zusätzlich Ausgleichskurven (Parabeln bestimmt über ein Least-Square-Schätzverfahren) für die gewählten Schaltpunkte beim Hochschalten in den jeweiligen Gängen.

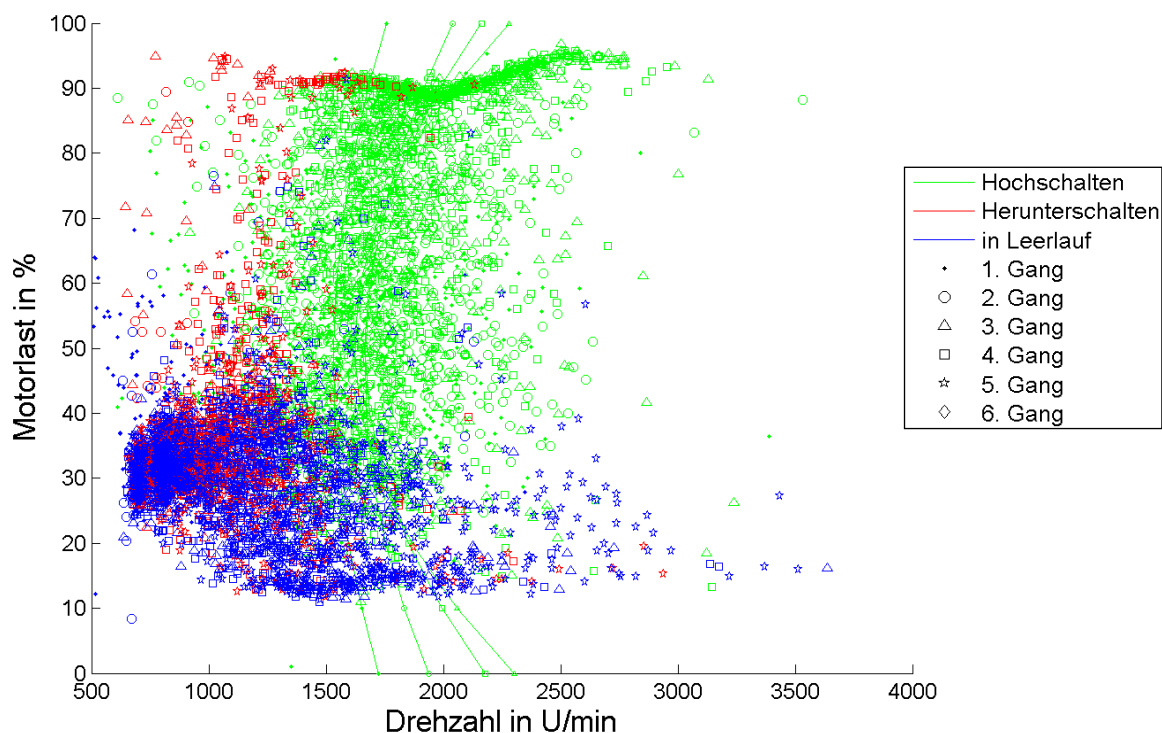


Abbildung 50: Darstellung aller Gangwechsel für Fahrer F1937073175, Fahrzeug: Hyundai i10 mit 1.4-l-4-Zylinder-Benzinmotor und 5-Gang-Handschaltgetriebe

Ein Vergleich verschiedener mit der beschriebenen Methodik bestimmter Schaltkennfelder ist in Abbildung 51 bis Abbildung 53 dargestellt. Neben fünf Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe ist auch ein 6-Gang-Automatikgetriebe als Referenz mit aufgeführt. Im Vergleich zeigt sich, dass Fahrer mit Handschaltgetriebe im Gegensatz zum Automatikgetriebe näherungsweise bei einer konstanten Drehzahl schalten (siehe Anmerkungen in den Abbildungen).

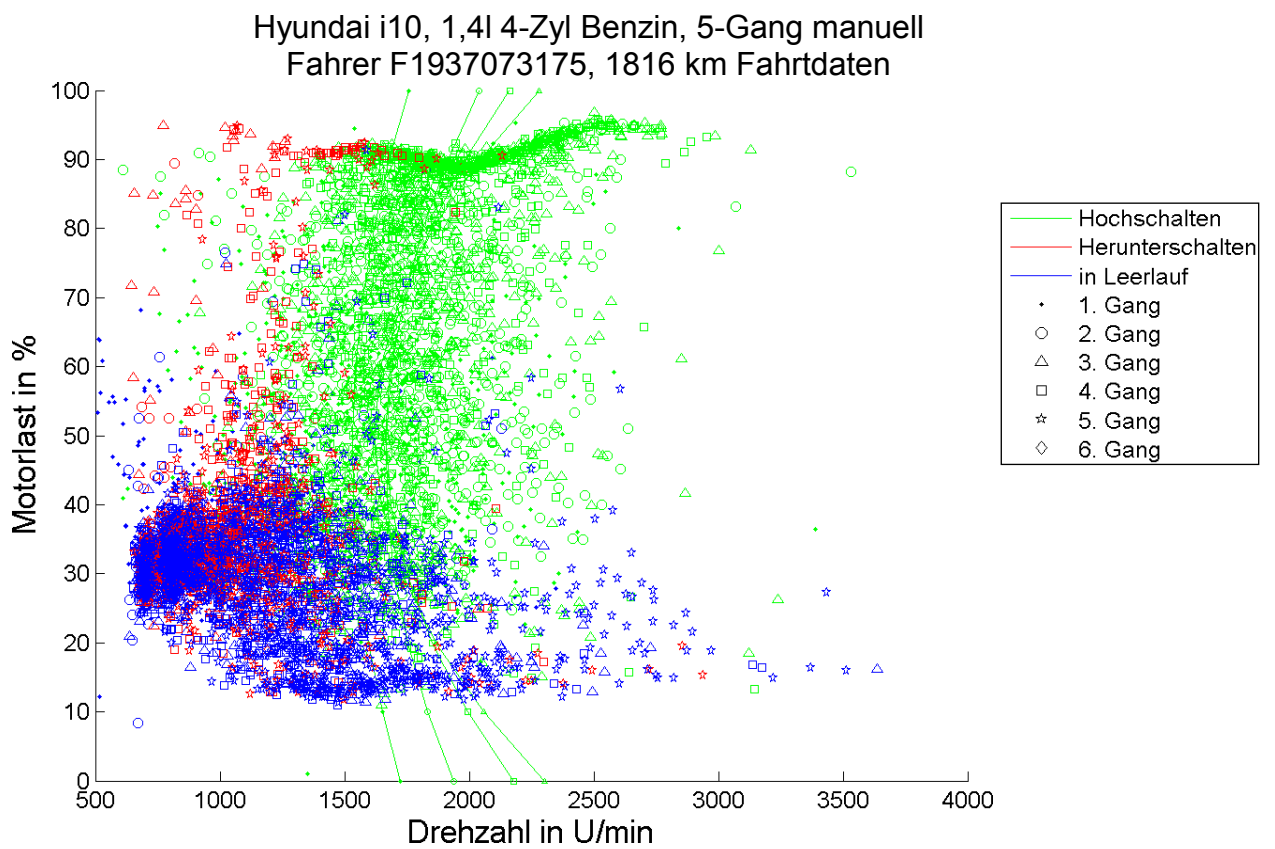
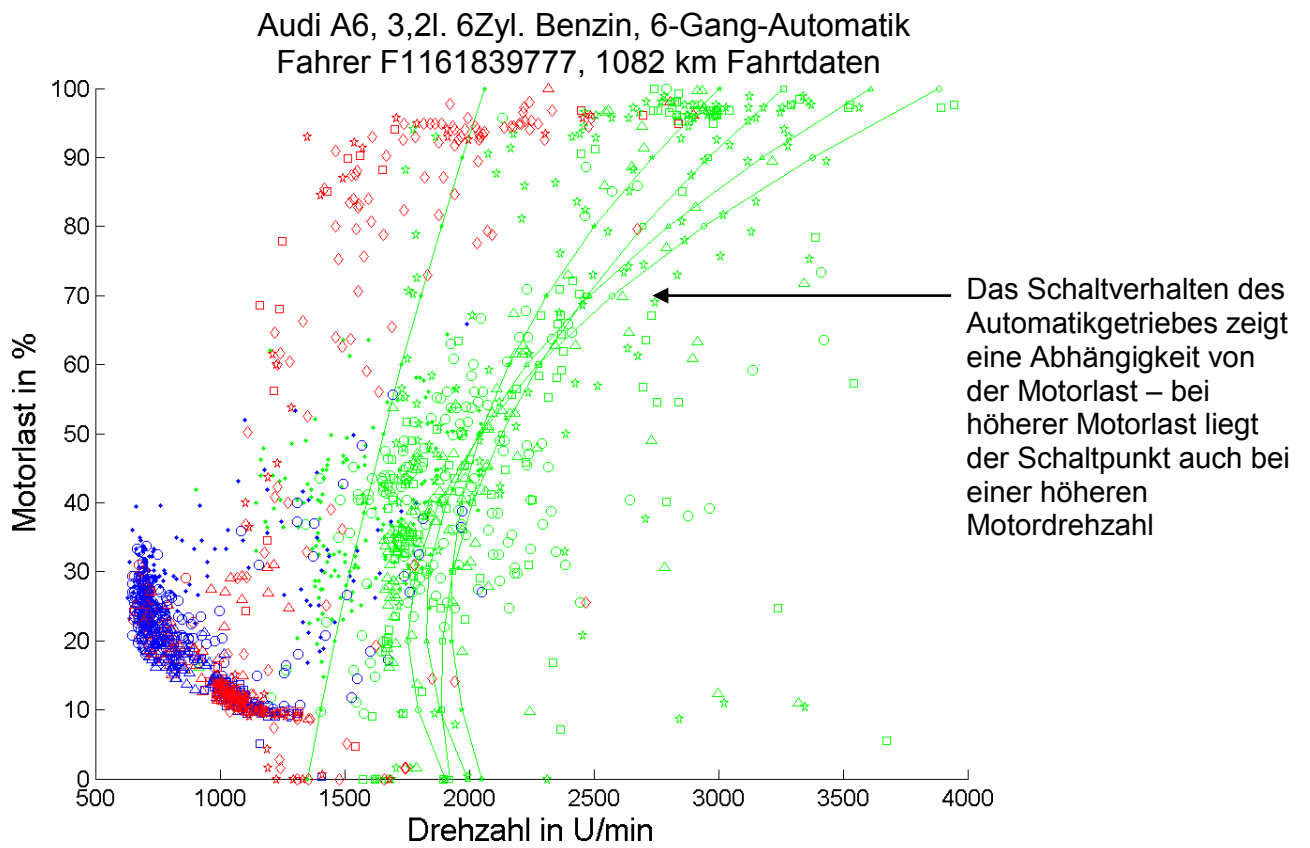


Abbildung 51: Ermittelte Schaltkennfelder für zwei unterschiedliche Fahrzeuge (jeweils ein Fahrer).

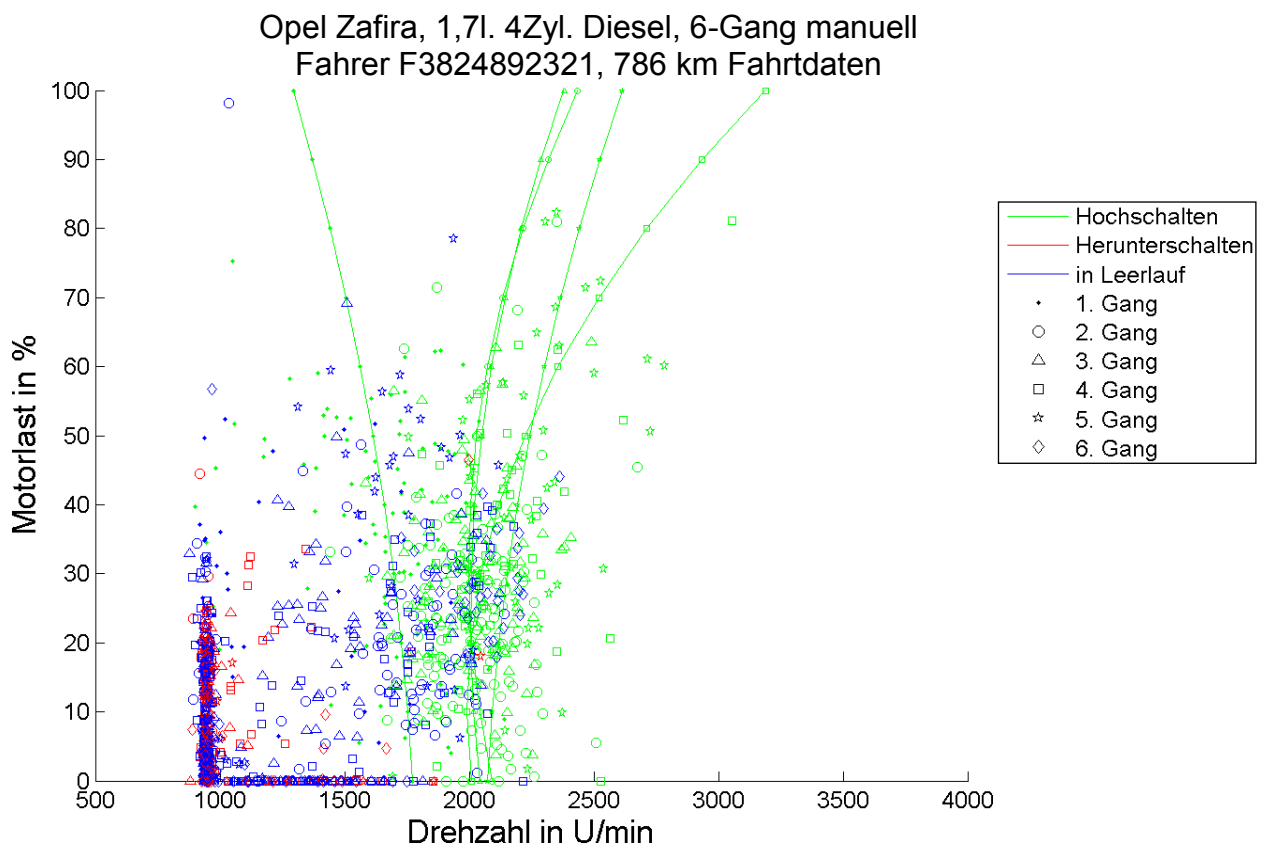
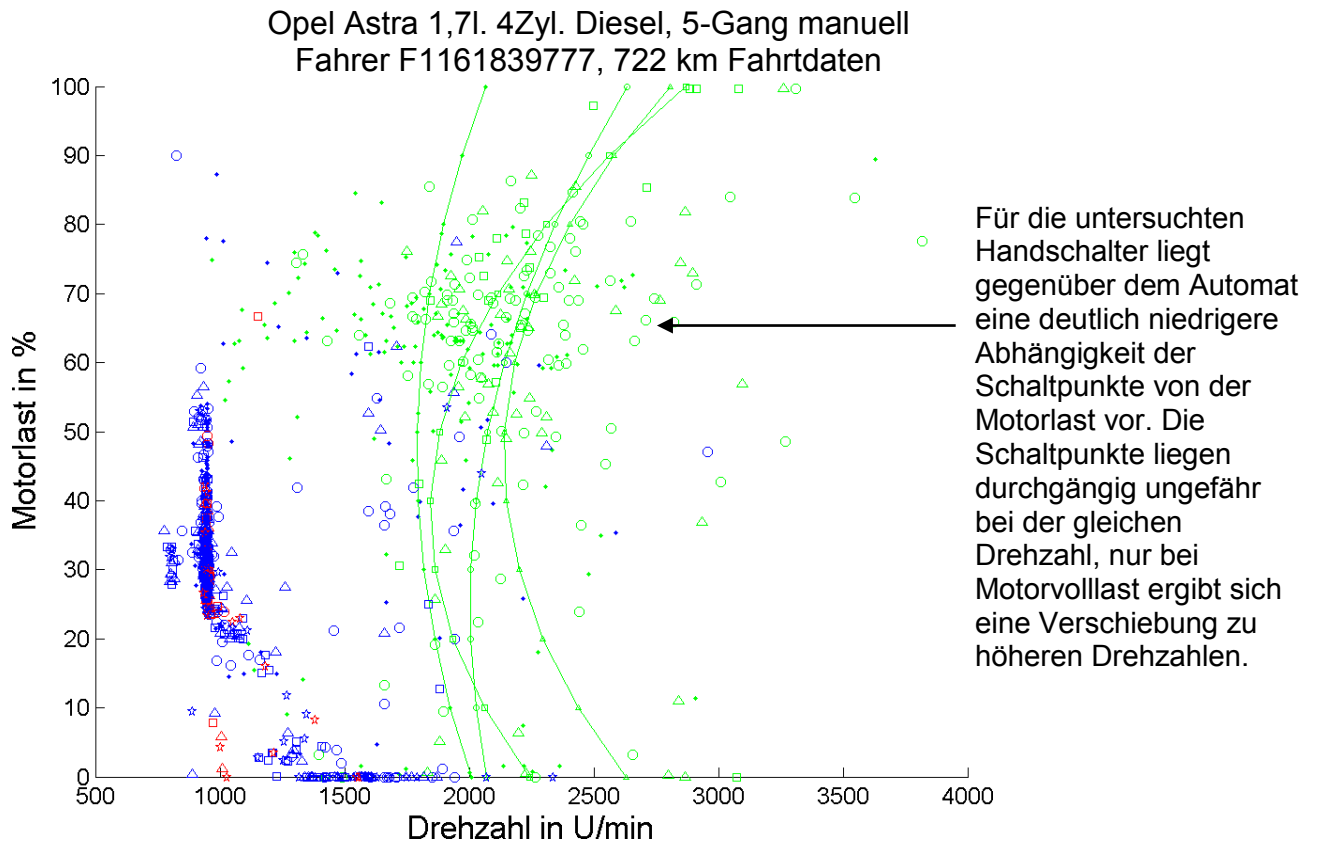


Abbildung 52: Ermittelte Schaltkennfelder für zwei unterschiedliche Fahrzeuge (jeweils ein Fahrer).

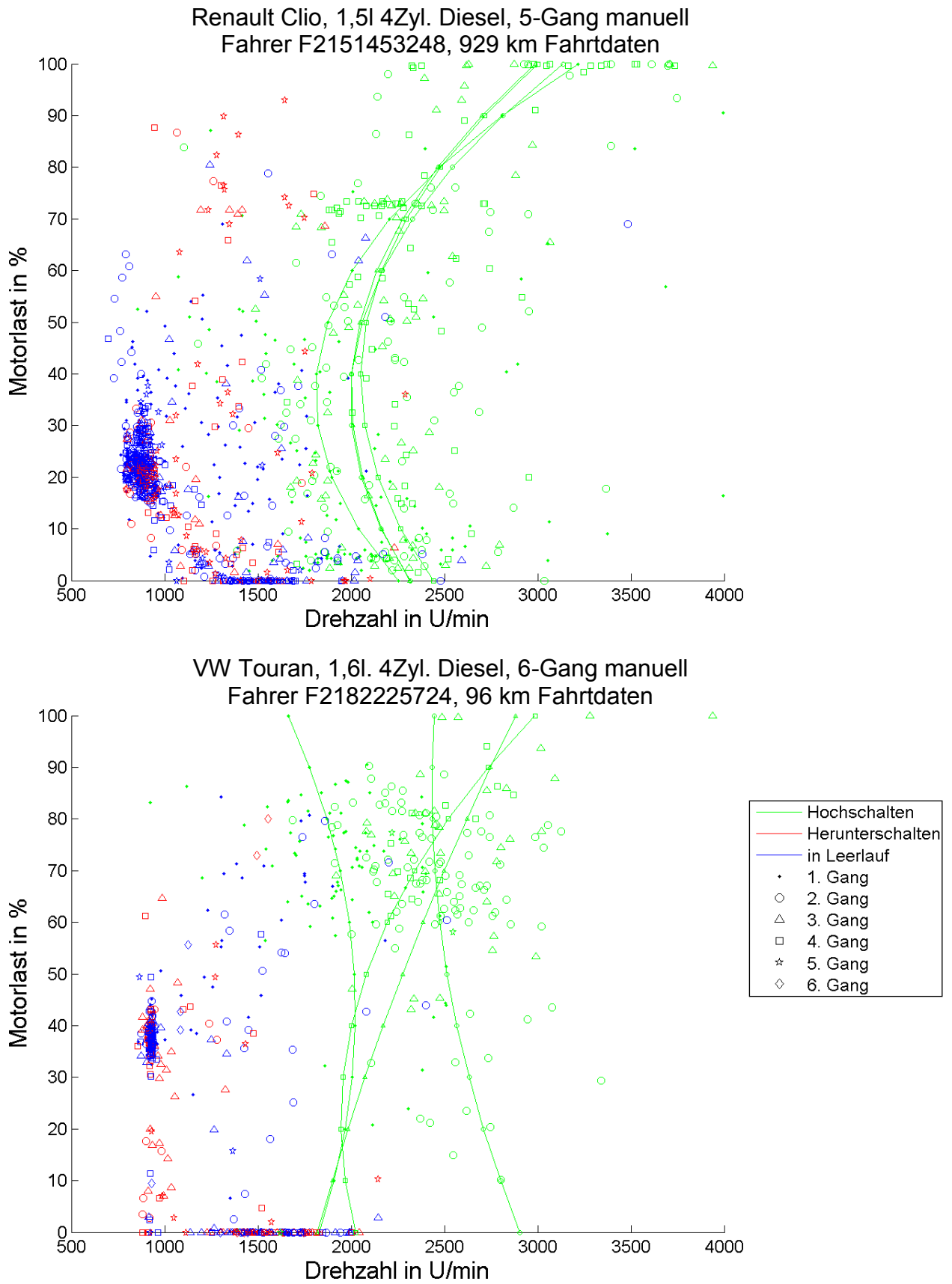


Abbildung 53: Ermittelte Schaltkennfelder für zwei unterschiedliche Fahrzeuge (jeweils ein Fahrer).

Für die Fahrer mit Handschalter ist kein signifikanter Unterschied der Schaltdrehzahl für verschiedene Gänge erkennbar. Allgemein ist bei den Fahrern die Tendenz erkennbar, häufig vom Fahrbereich direkt in den Leerlauf zu schalten, was beim Automat deutlich seltener erkennbar ist.

Neben den Schaltpunkten kann auch die Häufigkeit der verschiedenen Schaltvorgänge ausgewertet werden. Die hieraus ermittelten Schalthäufigkeiten sind in Tabelle 11 angegeben.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen sich dahingehend interpretieren, dass Fahrer bei einem Teil der Schaltvorgänge nicht den folgenden Gang wählen, sondern einen oder mehrere Gänge überspringen (je nach Fahrer zwischen 0 und 10% der Schaltungen beim Hochschalten und bis zu 30% der Schaltungen beim Herunterschalten). Dieses Verhalten ist prinzipiell aus dem Ansatz einer aufwandsoptimierten Handlungswahl nachvollziehbar und unterscheidet sich von den Schaltkennfeldern, die beispielsweise für ein Doppelkupplungs- oder Wandlerautomatgetriebe erwartet würden.

Die entwickelten Darstellungen von Schaltkennfeldern (siehe Abbildung 53) und Schalthäufigkeiten (Tabelle 11) ermöglichen eine kompakte Darstellung des Schaltverhaltens von einzelnen Fahrern. Neben der direkt vorgenommenen Interpretation der ermittelten Daten ermöglichen sie die Validierung von aufgebauten Fahrermodellen (siehe Kapitel 7) und die Bewertung von Prüfläufen und Erprobungsmessungen.

Tabelle 11: Schalthäufigkeiten für fünf verschiedene Fahrzeuge mit manuellem Schaltgetriebe mit jeweils unterschiedlichem Fahrer

VW Touran, 1.6-l-4-Zyl. Diesel (Fahrer F2182225724, 96 km):

	Leerlauf	1. Gang	2. Gang	3. Gang	4. Gang	5. Gang	6. Gang	hin zu
1. Gang	107	0	91	0	0	0	0	0
2. Gang	143	7	7	118	2	1	0	0
3. Gang	174	4	76	2	97	1	0	0
4. Gang	159	0	21	42	5	47	1	1
5. Gang	78	0	0	22	12	1	45	0
6. Gang	66	0	0	14	9	7	7	0

ausgehend von

Opel Zafira, 1.7-l-4-Zyl. Diesel (Fahrer F3824892321, 786 km):

	Leerlauf	1. Gang	2. Gang	3. Gang	4. Gang	5. Gang	6. Gang	hin zu
1. Gang	96	13	75	0	0	0	0	0
2. Gang	86	20	13	94	0	0	0	0
3. Gang	95	6	54	3	38	1	0	0
4. Gang	39	0	14	18	0	5	8	0
5. Gang	11	0	2	6	8	0	3	0
6. Gang	10	0	0	1	0	4	1	0

ausgehend von

Hyundai i10, 1.4-l-4-Zyl Benzin (Fahrer F1937073175, 1816 km):

	Leerlauf	1. Gang	2. Gang	3. Gang	4. Gang	5. Gang	hin zu
1. Gang	695	58	546	101	0	0	0
2. Gang	617	87	65	857	22	0	0
3. Gang	952	36	301	111	943	47	0
4. Gang	917	0	56	481	53	643	0
5. Gang	1198	1	12	228	217	479	0

ausgehend von

Opel Astra, 1.7-l-4-Zyl. Diesel (Fahrer F1161839777, 722 km):

	Leerlauf	1. Gang	2. Gang	3. Gang	4. Gang	5. Gang	hin zu
1. Gang	199	13	135	0	0	0	0
2. Gang	176	13	19	100	2	1	0
3. Gang	139	0	17	6	38	11	0
4. Gang	77	0	3	12	0	21	0
5. Gang	60	0	1	6	10	3	0

ausgehend von

Renault Clio, 1.5-l-4-Zyl. Diesel (Fahrer F2151453248, 929 km):

	Leerlauf	1. Gang	2. Gang	3. Gang	4. Gang	5. Gang	hin zu
1. Gang	271	21	101	0	0	0	0
2. Gang	161	37	13	92	0	0	0
3. Gang	120	7	43	4	68	0	0
4. Gang	71	1	16	36	4	70	0
5. Gang	48	0	3	11	42	10	0

ausgehend von

6.3 Zusammenfassung

Die Auswertung der vorliegenden Fahrtmessungen zeigt ein vielschichtiges und differenziertes Bild der Fahrzeugnutzung durch einzelne Fahrer.

Eine *Unterteilung und Bewertung des Fahrstils* ist in guter Näherung durch die Betrachtung der Fahrgeschwindigkeit und Längsbeschleunigung über Histogrammdarstellungen möglich (siehe Kapitel 6.2.1 und 6.2.2). Neben qualitativen Vergleichen einzelner Fahrer ist auch die Reduzierung des Fahrerverhaltens auf einzelne Kennwerte möglich. Hierzu wird ein Verfahren zur Reduzierung von Fahrtdaten auf einen einzelnen Kennwert zur Beschleunigung vorgeschlagen (siehe Kapitel 6.2.3). Die so ermittelten Kennwerte sind in weiten Grenzen unabhängig von Fahrzeugbeladung und Fahrzeug (Fahrten mit Anhänger und mit besonderen Fahrzeugen wie etwa Sportwagen sind hiervon ausgenommen).

Neben der Fahrgeschwindigkeit und Längsbeschleunigung wurde auch das Anfahr- und Schaltverhalten einzelner Fahrer untersucht (siehe Kapitel 6.2.4 und 6.2.5). Die entwickelte Methodik ist in der Lage, automatisiert große Mengen von Fahrtdaten zu verarbeiten und geeignete Visualisierungen zur Analyse der umfangreichen Datenmengen auszugeben. Die dargestellten Ergebnisse zeigen verschiedene Ergebnisse wie die Verteilung von Beschleunigungskennwerten beim Anfahren und die Verteilung von Schaltpunkten bei Handschalteranwendungen, die in der wissenschaftlichen Literatur nur an einzelnen Messungen, nicht aber an den hier dargestellten Vergleichen in umfangreichem Maß diskutiert wurden¹.

Die entwickelten Methoden zur Analyse von Fahrtdaten ermöglichen neben den vorgestellten, grundlegenden Betrachtungen zum Fahrerverhalten auch die Analyse und Bewertung von Prüfprofilen und Fahrtmessungen in der Erprobung von Antriebsstrangkomponenten. Über die verwendeten Visualisierungen können erfasste Fahrprofile und Prüfzyklen mit der vorhandenen Datenbasis in Relation gesetzt werden und mit der Gesamtmenge von im Feld erwarteten Fahrstilen verglichen werden. Die dazu notwendigen Analysen können automatisiert durchgeführt werden und stellen somit ein ressourcenneutral anwendbares, zusätzliches Analysewerkzeug in der Erprobung von Bauteilen dar.

¹ Vergleiche Deml et al. 2007 sowie Müller-Kose 2002.

7 Aufbau von Fahrermodellen

7.1 Aufbau eines Fahrermodells für Beschleunigungsvorgänge

Im Folgenden wird die in Kapitel 5 entwickelte Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen am Beispiel der Modellierung des Beschleunigungsvorgangs von Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe angewandt. Um die entwickelte Methodik zu verdeutlichen, werden die einzelnen Schritte zur Modellbildung ausführlich dargestellt. Das Vorgehen folgt dabei der in Kapitel 5.5 vorgestellten Grundstruktur zur Synthese von Fahrermodellen nach dem SPALTEN-Problemlösungsprozess (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Beschreibung der verfolgten Methodik zur Synthese eines Fahrermodells für Beschleunigungsvorgänge

SPALTEN-Methodik	Durchgeführte Schritte (mit Angabe des Kapitels):
Situation analysieren	7.1.1: Auswahl des zu betrachtenden Manövers 7.1.2: Auswertung von gemessenen Beschleunigungsvorgängen
Problem eingrenzen	7.1.3: Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung
Alternativen aufzeigen	Bewertung von statistischem Modell, Reglermodell oder optimaltheoretischem Modell für das Handlungsmodell des Fahrers
Lösung auswählen	7.1.4: Wahl von geeigneten Teilmodellen für die Handlungsausführung
Tragweite analysieren	7.1.5: Aufbau und Implementierung des Beschleunigungsmodells (erste Rohimplementierung) 7.1.6: Validierung des Modells
Einführen und umsetzen	Anwendung des Beschleunigungsmodells im Rahmen von Kapitel 8 zur Bewertung der dynamischen Belastung der Fahrzeugseitenwellen
Nachbereiten und lernen	

Ziel des aufgebauten Modells ist die Vorhersage der gewählten Gaspedalstellung und Schaltzeitpunkte des Fahrers bei Beschleunigungsmanövern. Das aufgebaute

Fahrermodell findet im Anschluss Verwendung als Teilmodell in einem Fahrermodell zur Simulation kompletter Fahrzyklen (siehe Kapitel 7.2).

7.1.1 Auswahl und Abgrenzung des zu betrachtenden Manövers

Der Ausgangspunkt für den Aufbau eines Fahrermodells stellt der Schritt der *Situationsanalyse* dar. Dabei werden an dieser Stelle Messdaten zur Analyse des interessierenden Fahrerverhaltens herangezogen.

Für die Modellierung von Beschleunigungsvorgängen sind verschiedene Verläufe denkbar. Eine Modellierung sollte folgende Punkte umfassen:

- Vorhersage der Gaspedalstellung während Beschleunigungsvorgängen
- Vorhersage der Schaltzeitpunkte
- Korrekte Abbildung von Schaltvorgängen

Die 3F-Methode nach KÜÇÜKAY¹ verwendet zur Modellierung einen hauptsächlich statistisch getriebenen Ansatz: Eine große Menge aufgezeichneter Beschleunigungsvorgänge wird in einer Datenbank abgelegt und vom Simulationsmodell über eine zufällige Auswahl aufgerufen. Dabei wird in der Datenbank zwischen den einzelnen Gängen des Getriebes unterschieden.

Das zu entwickelnde Modell soll sich von dieser Abhängigkeit von statistischen Daten lösen: Die Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Motor- und Fahrzeuganwendungen erfolgt dabei innerhalb des Modells und ist somit ohne die Durchführung zusätzlicher Fahrtmessungen möglich.

Hierzu wird in einem ersten Schritt eine Bewertung des Manövers Beschleunigen anhand der bereits in Kapitel 6 vorgestellten Messdaten durchgeführt. Auf dieser Basis werden Hypothesen zu Fahrerwunsch und Handlungsausführung aufgestellt und in einem optimaltheoretischen Fahrermodell zusammengefasst.

7.1.2 Auswertung von gemessenen Beschleunigungsvorgängen

Bei der Betrachtung eines bestimmten Manövers ist prinzipiell eine gezielte Auswertung vorhandener Messdaten oder die Durchführung von geeigneten Versuchen mit realen Fahrern sinnvoll, um eine Eingrenzung des erwarteten Verhaltens vorzunehmen. Über diese Auswertung ist eine Aufstellung und Bewertung verschiedener Hypothesen zum Beschleunigungsverhalten des Fahrers möglich

¹ Vergleiche Kapitel 2.2.2 sowie Küçükay und Kassel 2007

(Beispielsweise der These des Regelns auf eine konstante Beschleunigung während des kompletten Manövers). An dieser Stelle erfolgt die Eingrenzung des Fahrerhaltens durch die Auswertung der bereits vorliegenden Messdaten (vergleiche Kapitel 6) hinsichtlich des enthaltenen Beschleunigungsverhaltens.

Über eine Betrachtung der Beschleunigungsvorgänge in der Datenbank kann eine Aufschlüsselung des Fahrerhaltens für verschiedene Fahrzeuge und Fahrer vorgenommen werden. Dazu wurden aus den vorliegenden Fahrtmessungen mehr als 1000 Beschleunigungsvorgänge ausgewertet, die jeweils eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit um mindestens 50 km/h ohne längere Unterbrechungen aufweisen.

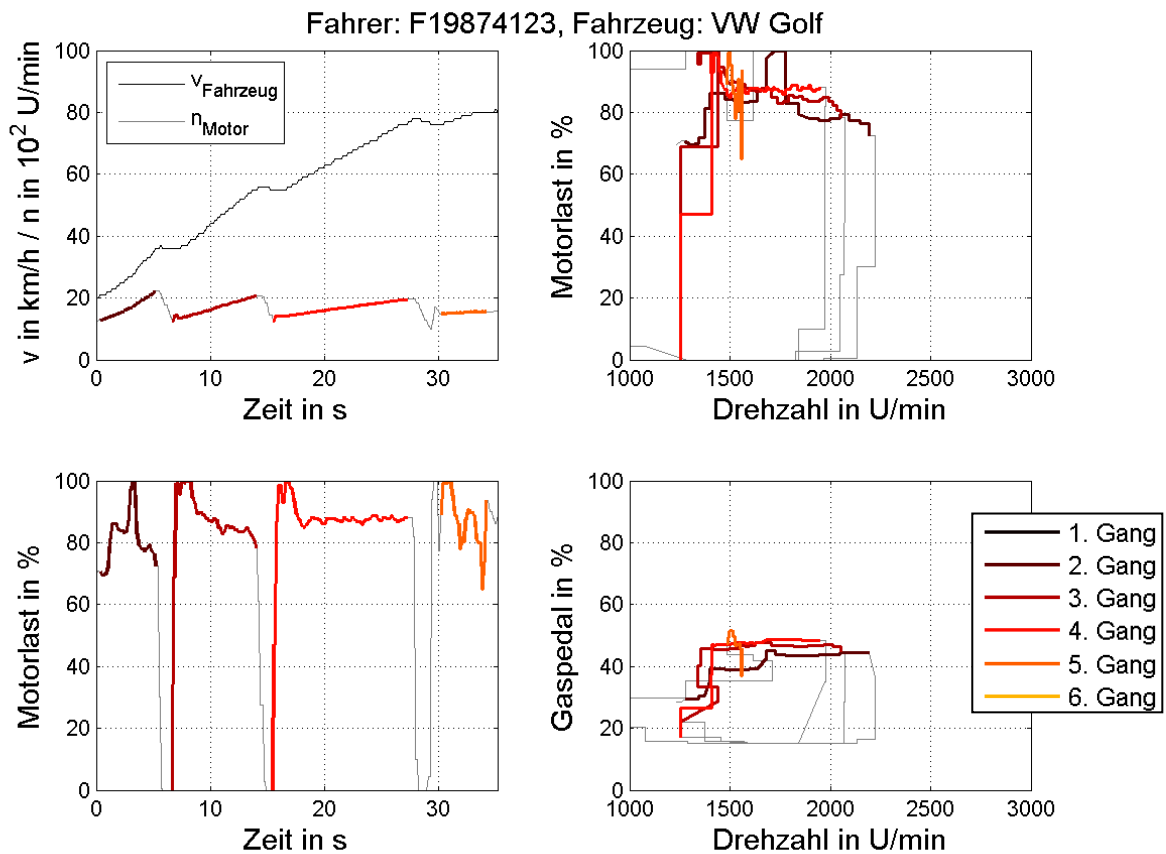


Abbildung 54: exemplarische Darstellung der Auswertung von gemessenen Größen für einen Beschleunigungsvorgang, Fahrzeug: VW Golf mit 1.9-l-4-Zyl. Dieselmotor

Für jeden betrachteten Beschleunigungsvorgang liegt nach der Auswertung eine Darstellung verschiedener gemessener Größen vor. Ein erzeugtes Diagramm ist exemplarisch in Abbildung 54 dargestellt. Die verwendete Darstellung zeigt jeweils den Verlauf von Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl und Motorlast über die Zeit sowie eine Darstellung von Motorlast und Gaspedalstellung über die Motordrehzahl.

In den Darstellungen werden die verschiedenen Stufen des Getriebes farblich hervorgehoben – dazu wird die bereits in Kapitel 6.2.7 eingeführte Methodik zur Erkennung des eingelegten Gangs verwendet.

Die Darstellung ermöglicht eine visuelle, qualitative und quantitative Bewertung des Fahrerverhaltens bei einzelnen Beschleunigungsvorgängen. Über den Vergleich mehrerer Grafiken, zum Beispiel anhand der in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellten Auswahl, können Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Fahrerverhalten bewertet werden. Dabei zeigt sich durchgehend, dass die Fahrer bei Beschleunigungsvorgängen über mehrere Gänge hinweg eine vergleichbare Gaspedalstellung und Motorlast wählen. Somit liegt die gewählte Beschleunigung nicht bei einem konstanten Wert. Fahrer scheinen statt einer konstanten Beschleunigung eher eine gewünschte Gaspedalstellung und einen begrenzten Drehzahlbereich zu präferieren.

Die Wahl des Schaltzeitpunkts stellt einen weiteren Indikator dafür dar, dass Fahrer nicht während eines Beschleunigungsvorgangs auf eine bestimmte Wunschbeschleunigung hin regeln. Tendenziell werden bei Beschleunigungsvorgängen niedrige Gänge bis zu höheren Drehzahlen gefahren als höhere Gänge (siehe Abbildung 55f). Dieses Verhalten wurde in den Messdaten auch für Fahrzeuge gefunden, die nicht über eine Schaltpunktanzeige verfügen (siehe beispielsweise die Darstellung zum Opel Astra in Abbildung 55).

Die Ergebnisse der Analyse werden im Folgenden zu verschiedenen Hypothesen hinsichtlich Fahrerwunsch und Handlungsausführung zusammengefasst.

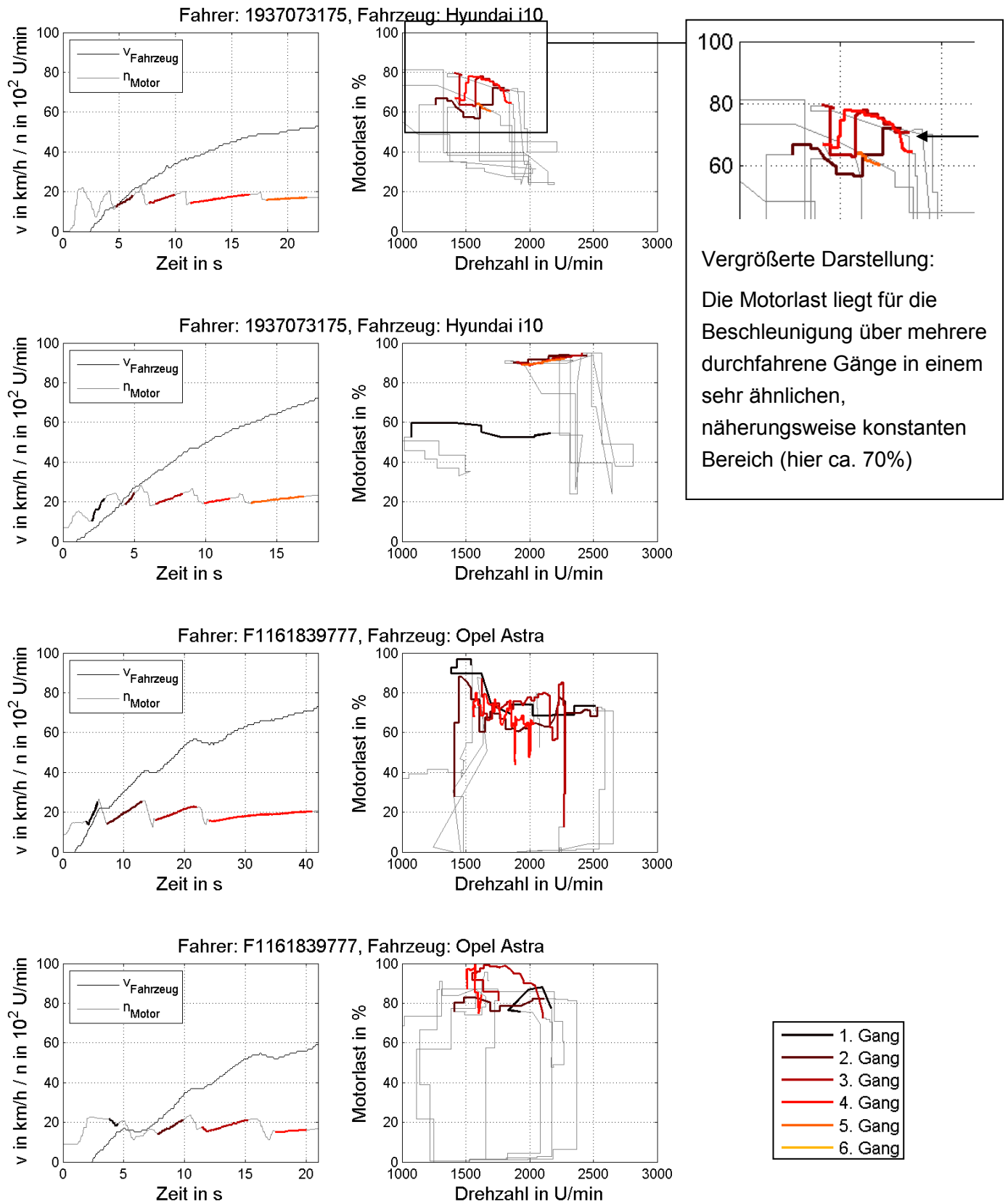


Abbildung 55: Ausgewertete Beschleunigungsvorgänge für verschiedene Fahrer und Fahrzeuge (Hyundai i10 mit 1.4-l-4-Zylinder-Benzinmotor und Opel Astra mit 1.7-l-4-Zylinder Dieselmotor)

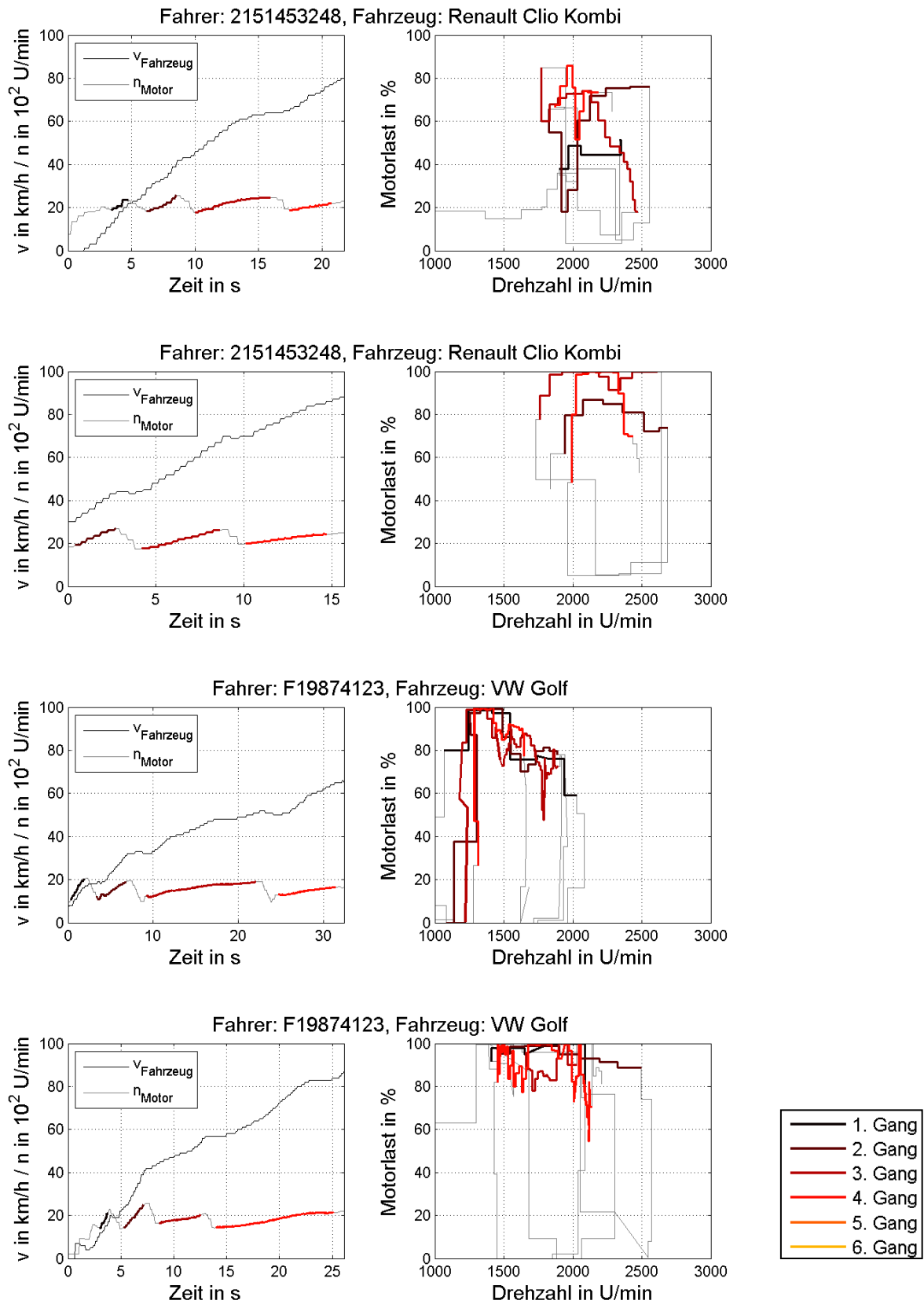


Abbildung 56: Ausgewertete Beschleunigungsvorgänge für verschiedene Fahrer und Fahrzeuge (Renault Clio mit 1.5-l-4-Zyl. Dieselmotor und VW Golf mit 1.9-l-4-Zyl. Dieselmotor)

7.1.3 Trennung des Fahrerhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung

Das aufzubauende Fahrermodell soll eine Vorhersage für die Wahl der Gaspedalstellung und die Zeitpunkte für Schaltvorgänge während eines Beschleunigungsvorgangs liefern. Als Teil der *Problemeingrenzung* erfolgt eine Festlegung des abzudeckenden Modellbereichs, die durch die Methode der *Trennung des Fahrerhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung* vorgenommen wird. Hierzu wird als Hypothese für den Fahrerwunsch das Ziel formuliert, die gewünschte Zielgeschwindigkeit und damit das Ende des Beschleunigungsvorgangs innerhalb eines bestimmten Zeitraums zu erreichen.

Für die Handlungsausführung können auf Basis der untersuchten Messdaten verschiedene Eingrenzungen vorgenommen werden:

- Der Fahrer wählt in Näherung eine konstante Gaspedalstellung über den kompletten Beschleunigungsvorgang hinweg.
- Hochschaltvorgänge finden bei einer ungefähr konstanten Drehzahl für alle Gänge statt, wobei die Tendenz erkennbar ist, dass der Fahrer bei höheren Gängen früher schaltet.

Auf Basis des angenommenen Fahrerwunsches und den aus den Messdaten abgeleiteten Grenzen für die Handlungsausführung ist die Herleitung eines Fahrermodells zur Vorhersage der Handlungswahl des Fahrers bei Beschleunigungsvorgängen möglich. Der hier vorgestellte Ansatz ist eine mögliche Lösung des Modellierungsproblems, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Hauptsächlich soll mit der vorgenommenen Ausführung unterstrichen werden, dass das vorhandene Modellierungsproblem durch die Trennung in Fahrerwunsch und Handlungsausführung in der Komplexität deutlich reduziert wird und damit die Aufgabe der Modellbildung vereinfacht und kanalisiert wird.

Das aufzubauende Modell hat die in Abbildung 57 dargestellte Grundstruktur. Auf Grundlage der verschiedenen in Kapitel 5.3 vorgestellten Modelltypen kann nun eine Struktur für den noch unbekanntem Teil des Fahrermodells gesucht werden.

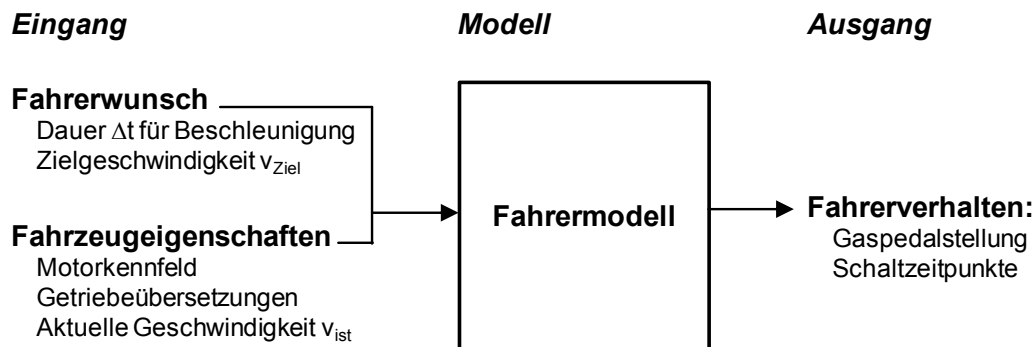


Abbildung 57: Struktur des aufzubauenden Fahrermodells

7.1.4 Wahl von geeigneten Teilmodellen für die Handlungsausführung

Für die Modellierung der Handlungswahl bieten sich die in Kapitel 5.3 eingeführten Modelltypen statistisches Modell, Reglermodell und optimaltheoretisches Modell an (Stichpunkte *Alternativen aufzeigen* und *Lösung auswählen* nach der SPALTEN-Methodik). Ein statistisches Modell erfordert im Allgemeinen das Vorliegen zusätzlicher Messdaten für die jeweilige Anwendung, was für die in Kapitel 7.1.1 definierte Zielstellung nicht gegeben ist. Auch ein Reglermodell erscheint nicht direkt zielführend, da die Auswertung der Messdaten keinen direkten Regelkreis zwischen Fahrer und Fahrzeug während des Beschleunigungsvorgangs nahelegt. Damit fällt die Wahl auf ein optimaltheoretisches Modell, über das eine Ermittlung der Gaspedalstellung und der Schaltpunkte während des Beschleunigungsvorgangs erfolgen soll.

Ein optimaltheoretisches Modell fasst das Erreichen des Fahrerwunschs als Optimierungsaufgabe innerhalb der verschiedenen, für die Handlungsausführung vorgegebenen Grenzen auf. Dabei wird in erster Näherung von einer konstanten Drehzahlschwelle für alle Gänge ausgegangen. Die in den Messdaten beobachtete leichte Gangabhängigkeit wird anschließend über die Implementierung im Zeitbereich hinzugefügt.

7.1.5 Aufbau und Implementierung des Beschleunigungsmodells

Zur Wahl eines Optimierungskriteriums für das zu entwickelnde Modell wird das Motorkennfeld für die bereits oben betrachtete VW Golf-Anwendung herangezogen. In Abbildung 58 ist das Motorkennfeld mit Linien konstanter Gaspedalstellung eingezeichnet. Da in den gemessenen Fahrtdaten keine direkte Aufzeichnung des Motormoments erfolgt, wurde dieses über die Fahrtbeschleunigung unter Berücksichtigung der aktuellen Motordrehzahl und des Fahrtwiderstands für alle gemessenen Bestandteile der Fahrtmessungen zurückgerechnet. Die Berechnung berücksichtigt u.a. keine Steigungen der Fahrstrecke und Lastkurven der Nebenaggregate, wodurch die Ungenauigkeiten in den gemessenen Werten erklärt werden können.

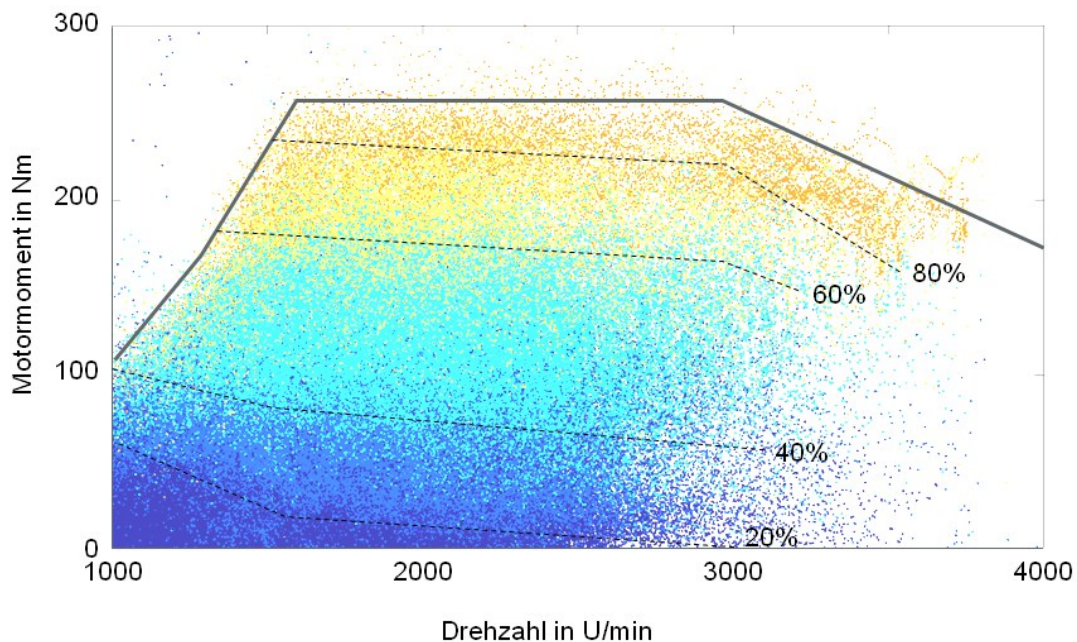


Abbildung 58: Ermitteltes Motorkennfeld mit Bereichen unterschiedlicher Gaspedalstellungen auf Basis der ermittelten Fahrtmessdaten für den betrachteten VW Golf mit 1,9l 4-Zylinder Dieselmotor

In die dargestellte Abbildung können die verschiedenen, im Folgenden aufgelisteten Grenzen für die Handlungsausführung des Fahrers eingezeichnet werden.

Handlungsgrenzen HG (siehe auch Abbildung 59):

HG1: Möglichkeit zur Beschleunigung mit ungefähr konstanter Beschleunigung innerhalb eines Gangs – der gewählte Drehzahlbereich muss ein ungefähr konstantes Moment für den Beschleunigungsvorgang zur Verfügung stellen. Es ist beispielsweise nicht zu erwarten, dass der Fahrer für

Beschleunigungsvorgänge mit mehr als 60 % Gaspedalstellung den Bereich unter 1400 U/min als „angenehm“ empfindet, da in diesem Bereich der Motor nicht die bei höheren Drehzahlen verfügbaren Beschleunigungen ermöglicht.

HG2: Wahl einer konstanten Schaltdrehzahl beim Hochschalten für verschiedene Beschleunigungsvorgänge bei unterschiedlichen Gaspedalstellungen – bei höheren gewünschten Beschleunigungen erhöht der Fahrer zuerst die Gaspedalstellung, erst beim Erreichen der maximalen Gaspedalstellung werden höhere Schaltdrehzahlen gewählt.

HG3: Da beim Beschleunigen meist mehrere Gänge nacheinander durchfahren werden, muss die Getriebespreizung zwischen minimaler und maximaler Drehzahl während des Schaltvorgangs berücksichtigt sein. Eine eindeutige Lösung des Optimierungsproblems erfordert eine Begrenzung des Abstands zwischen minimaler und maximaler Motordrehzahl (Bedingungen H1 und H2) genau um die Getriebespreizung.

HG4: Der Beschleunigungsvorgang erfolgt mit konstanter Gaspedalstellung über alle durchfahrenen Gänge hinweg.

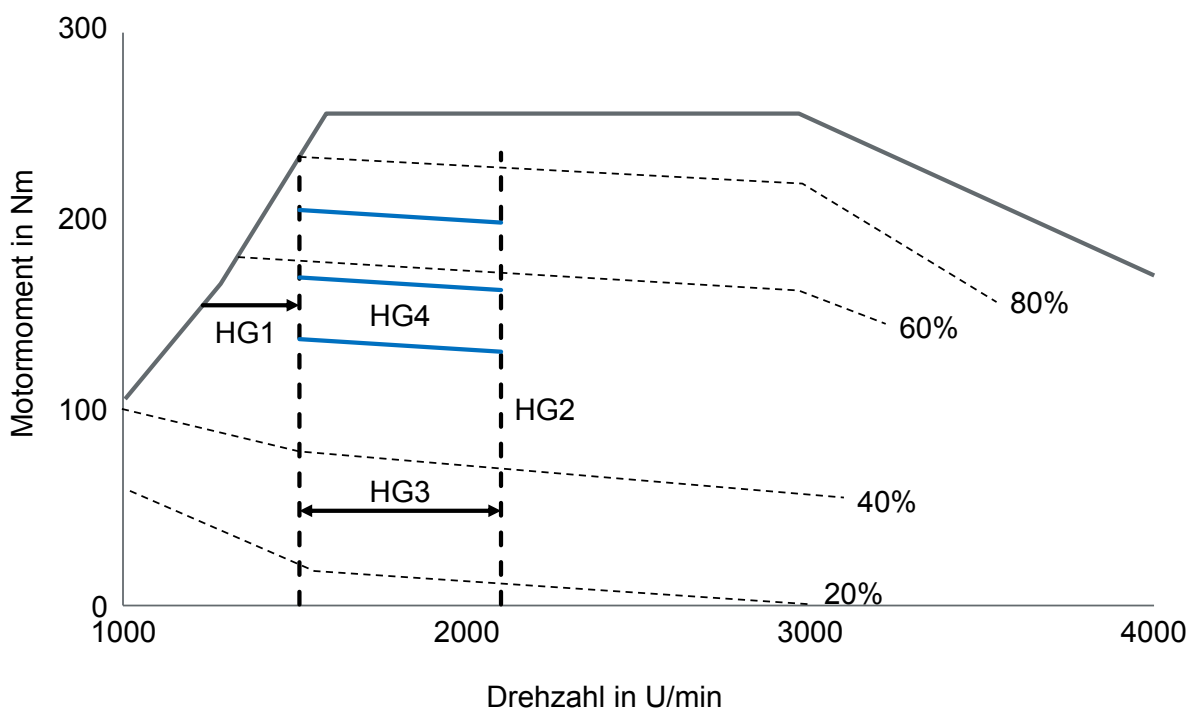


Abbildung 59: Darstellung der einzelnen Handlungsgrenzen im Motorkennfeld

Die Annahme der Handlungsgrenzen schränkt den Handlungsbereich ein, der für den Beschleunigungsvorgang in Frage kommt. Die Umsetzung des Fahrerwunsches kann somit als Optimierungsziel formuliert werden:

Optimierungsziel Z:

Finde eine mögliche Gaspedalstellung, die die Einschränkungen HG1-HG4 erfüllt und das Erreichen der Zielgeschwindigkeit v_{Ziel} in der dem Fahrerwunsch entsprechenden Dauer Δt ermöglicht.

Die Implementierung der Hypothesen zur Handlungswahl HG1-HG4 (Handlungsgrenzen) und des Optimierungsziels Z bei Angabe von Fahrzeugparametern als *Optimierungsmodell* stellt das an dieser Stelle aufzubauende Fahrermodell dar. Zur einfachen Benennung wird dieses Modell im Folgenden als *KoGaS-Beschleunigungsmodell* (Konstante Gaspedal-Stellung) bezeichnet. Vorgestellt werden dazu zwei Implementierungen: In vereinfachter Form als Microsoft-Excel-Tabellenblatt und als Optimierungsschleife für eine Fahrdynamiksimulation in den Programmpaketen Matlab und GNU Octave.

Zur vereinfachten Implementierung als Tabellenblatt werden die zur Fahrzeuganwendung relevanten Daten sowie die vom Fahrer gewünschten Handlungsgrenzen und Fahrerwunschwerte in einer Eingabemaske vom Benutzer angegeben. Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt über die zur Beschleunigung benötigte Motorleistung bei Fahrt auf ebener Strecke, die mit der mittleren Leistungsabgabe des Motors innerhalb der gegebenen Handlungsgrenzen abgeglichen wird (siehe Abbildung 60).

Mit der vorliegenden Implementierung kann die Funktion des gewählten Modellansatzes bewertet werden. Dabei zeigt sich die grundsätzliche Eignung des gewählten Modellansatzes, die oben definierten Ziele (Vorhersage von Gaspedalstellung und Schaltpunkten für einen Beschleunigungsvorgang) in ausreichender Form zu erfüllen.

Eine umfangreichere Implementierung wurde in den Programmumgebungen Matlab und GNU Octave realisiert. In diesem Fall erfolgt die Lösung des Optimierungsproblems über die Berechnung der Beschleunigungsdauer bei mehreren Gaspedalstellungen und die anschließende Interpolation zwischen den berechneten Punkten. Eine exemplarische Berechnung des Beschleunigungsvorgangs von 20 km/h auf 100 km/h für vier verschiedene Zieldauern wird in Abbildung 61 dargestellt. Die Methodik ermöglicht im Gegensatz zur vereinfachten Implementierung als Tabellenblatt auch die Berücksichtigung des Zeitbedarfs für die einzelnen Schaltvorgänge, des eingelegten Gangs zu Beginn der

Beschleunigungsphase und des Fahrtwiderstands durch die Steigung entlang der Fahrbahn.

Fahrzeugdaten

Masse	1500 kg (m)	Eingabe
Rollwiderstand	0.015 (μ)	wird berechnet
Fzg-Querschnitt	3 m ² (A)	
$cw \cdot A \cdot \rho / 2 =$	0.585	
Getr.spreizung	1.6 (i/i_vorher)	

Fahrerwunsch - Geschwindigkeitssprung

v1	20 km/h
v2	80 km/h
dt	20 s

Handlungsausführung - mittlere Drehzahl

n_mittel	1700 U/min
----------	------------

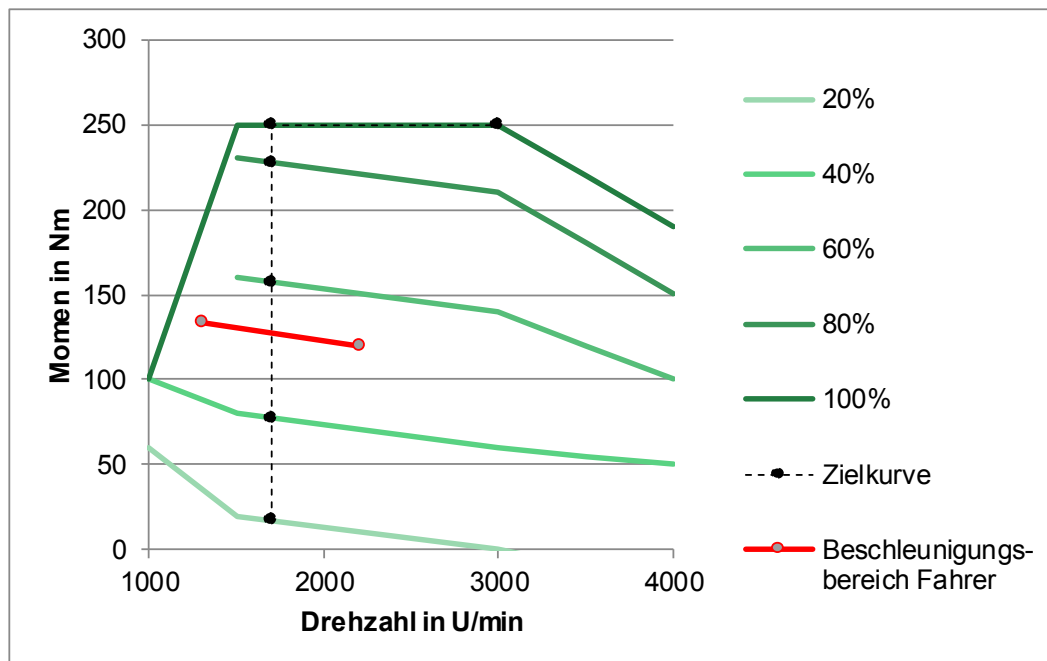


Abbildung 60: Implementierung des Beschleunigungsmodells als MS-Excel-Datenblatt. Nicht mit dargestellt ist die Eingabe des Motorkennfelds und die Berechnung der Gaspedalstellung des Fahrers, die durch die Lösung des Optimierungsproblems über die benötigte Energie für den Beschleunigungsvorgang erfolgt. Eine Dokumentation der Modellstruktur ist auch in Anhang D gegeben.

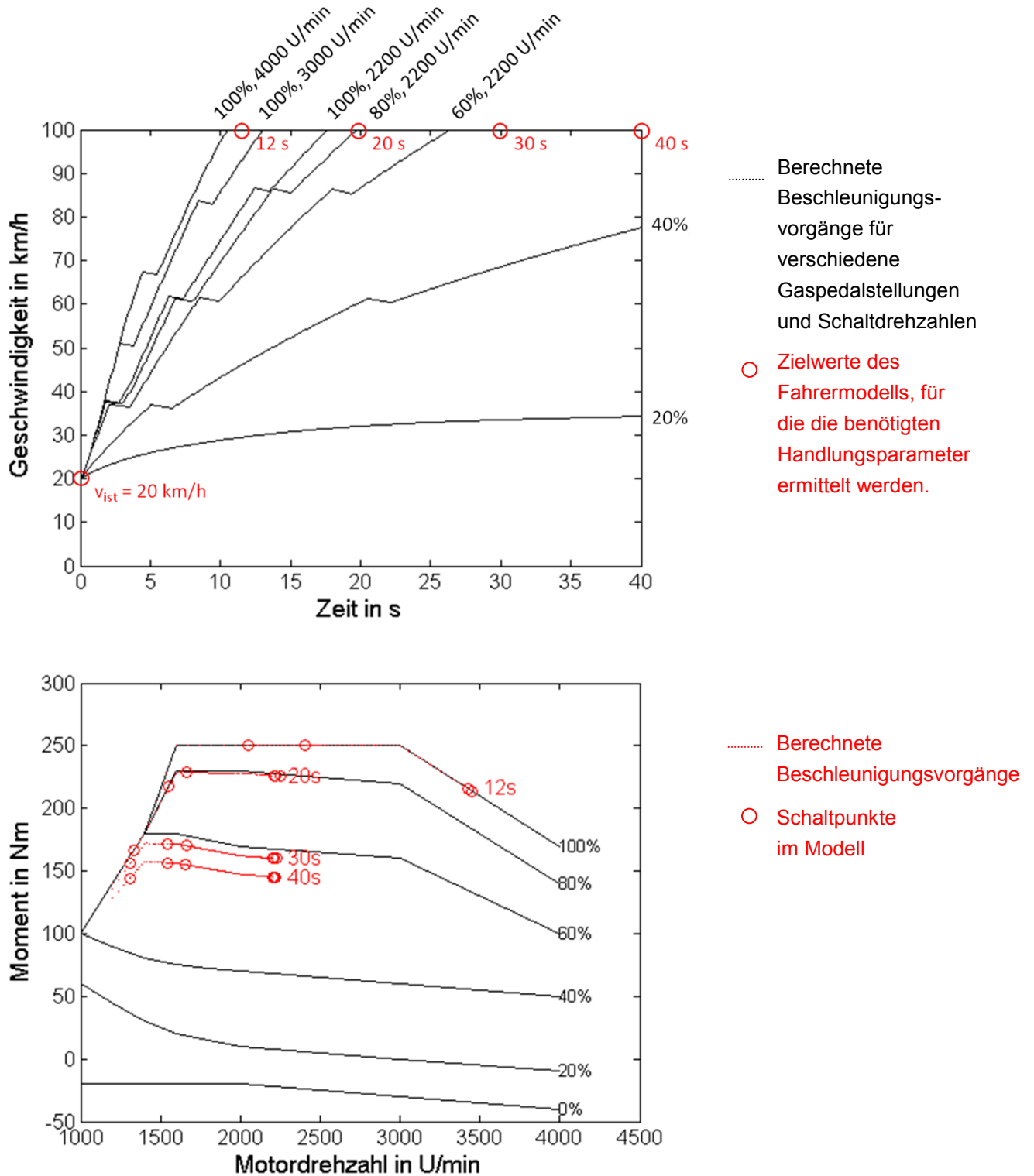


Abbildung 61: Grafische Darstellung zur Optimierungsrechnung der Modellimplementierung als Optimierungsschleife: Simulierte Beschleunigungsvorgänge für verschiedene Parametersätze (oben) und aus der Rechnung ermittelte Gaspedalstellungen und Schaltzeitpunkte für verschiedene Zielwerte (unten)

7.1.6 Validierung des Modells

Der Schritt *Tragweite analysieren* erfolgt anhand der Überprüfung einzelner Hypothesen, auf denen das Modell beruht, sowie der sich aus dem Modell ableitbaren Aussagen zum Beschleunigungsverhalten einzelner Fahrer bei Nutzung verschiedener Fahrzeuge. Dabei werden die beiden oben beschriebenen Referenzimplementierungen des Modells herangezogen und auf ihre Tragweite hin bewertet.

Im Vergleich zwischen der vereinfachten Implementierung über eine Energiebilanz und der umfangreicheren Implementierung als nichtlineares Optimierungsproblem (siehe Abbildung 60 und Abbildung 61) zeigt das vereinfachte Modell niedrigere berechnete Gaspedalwerte, die hauptsächlich der Vernachlässigung der Schaltdauern zugeschrieben werden.

Bei der Validierung wird auf die mit der VW-Golf-Anwendung ermittelten Messdaten zurückgegriffen. In dieser Anwendung wurden ca. 8200 km Messdaten für mehrere Fahrer ermittelt, die durchgehend eine Aufzeichnung von Motordrehzahl, Motorlast und Gaspedalstellung beinhalten.

Für die Betrachtung werden alle in den Messdaten beinhalteten Beschleunigungsvorgänge mit mindestens 30 km/h Geschwindigkeitsdifferenz analysiert, was die Anzahl betrachteter Beschleunigungsfahrten gegenüber der Begrenzung auf mindestens 50 km/h Differenz in der ursprünglichen Analyse erweitert. Aus dem ermittelten Zeitsignal werden jeweils die Zielwerte für das KoGaS-Beschleunigungsmodell (v_{ist} , v_{soll} , $\Delta t_{Beschleunigung}$) ermittelt und daraus neben dem gemessenen Beschleunigungsverlauf auch das aus dem KoGaS-Beschleunigungsmodell berechnete Verhalten von Fahrer und Fahrzeug ermittelt. Die Auswertung umfasst dabei ca. 1400 betrachtete Beschleunigungsmanöver.

Ein Auszug der erzeugten Grafiken wird in Abbildung 63 und Abbildung 63 dargestellt. Im Vergleich zeigt sich insgesamt eine – gemessen an dem sehr einfachen Aufbau des KoGaS-Modells – gute Vorhersagequalität des Modells.

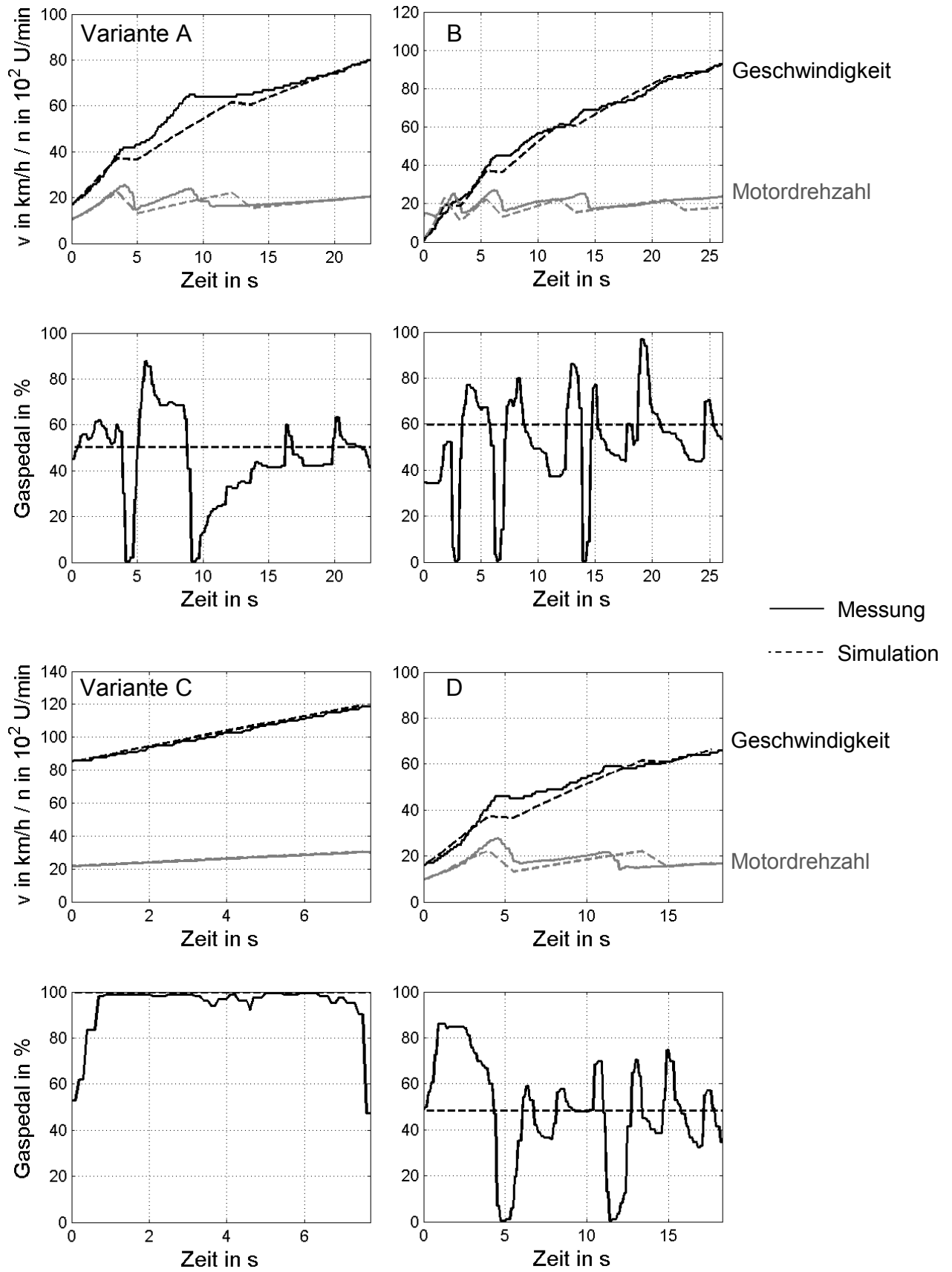


Abbildung 62: Darstellung des Vergleichs einzelner gemessener Beschleunigungsvorgänge mit den vom KoGaS-Modell vorhergesagten Werten

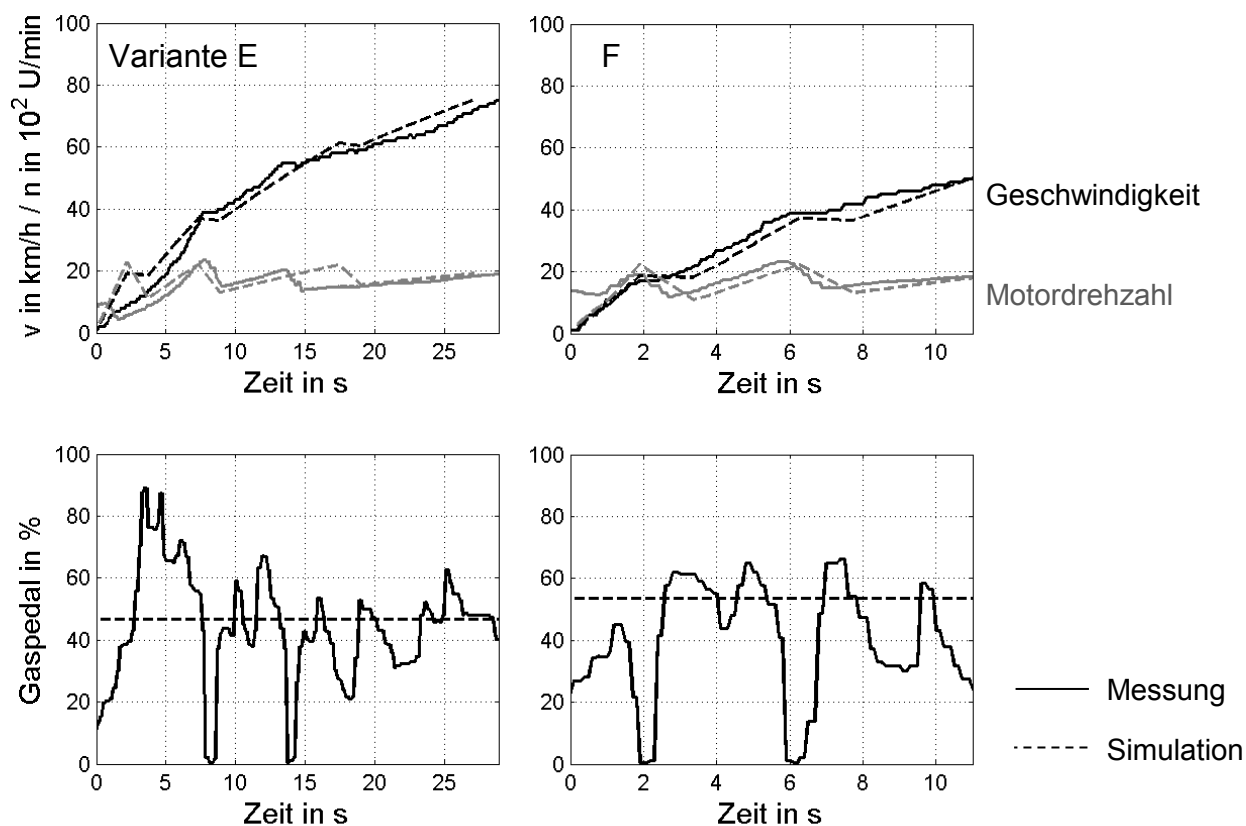


Abbildung 63: Darstellung des Vergleichs einzelner gemessener Beschleunigungsvorgänge mit den vom KoGaS-Modell vorhergesagten Werten

Abweichungen zwischen Messung und simuliertem Verhalten ergeben sich insbesondere in Bereichen, in denen sich die Hypothese einer konstanten Gaspedalstellung nicht mit dem Verhalten des Fahrers deckt (siehe die Varianten A, D & E in den Abbildungen). Diese Unterschiede können beispielsweise mit der bislang fehlenden Berücksichtigung des Verkehrsflusses um das betrachtete Fahrzeug herum erklärt werden, die den Fahrer teilweise zu einer Anpassung des ursprünglich gewünschten Fahrerverhaltens zwingen.

Des Weiteren bildet die Modellvorhersage bisher nicht das Schaltverhalten des Fahrers direkt ab, so dass sich gerade die Streuungen im Fahrerverhalten an den einzelnen Schaltpunkten in der Messung nicht mit der konstanten Vorhersage aus den Messdaten decken. Diese Lücke kann durch die Ergänzung eines Modells zur Abbildung des Schaltverhaltens des Fahrers geschlossen werden (siehe Kapitel 7.2).

Neben der Vorhersage direkter Zeitverläufe kann das KoGaS-Beschleunigungsmodell auch zu einer allgemeinen Analyse möglicher Fahrerhandlungen bei Beschleunigungsvorgängen genutzt werden. In der im vorherigen Kapitel gewählten Darstellung in Abbildung 61 können die

Fahrerhandlungen je nach vorgegebener Zieldauer für einen Beschleunigungsvorgang in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- a) Moderate Beschleunigung – in diesem Fall liegt die gewählte Gaspedalstellung im Bereich um ca. 50 % und die Motordrehzahl im Bereich 1500-2200 U/min
- b) Hohe Beschleunigung – in diesem Fall liegt die gewählte Gaspedalstellung bei 100% und die Motordrehzahl verschiebt sich hin zu höheren Werten

Die über das Modell getroffene Aussage deckt sich gut mit dem gemessenen Fahrerverhalten, aus dem die Darstellung der Gaspedalstellungswerte für die ca. 1400 ausgewerteten Beschleunigungsvorgänge ermittelt wird (siehe Abbildung 64).

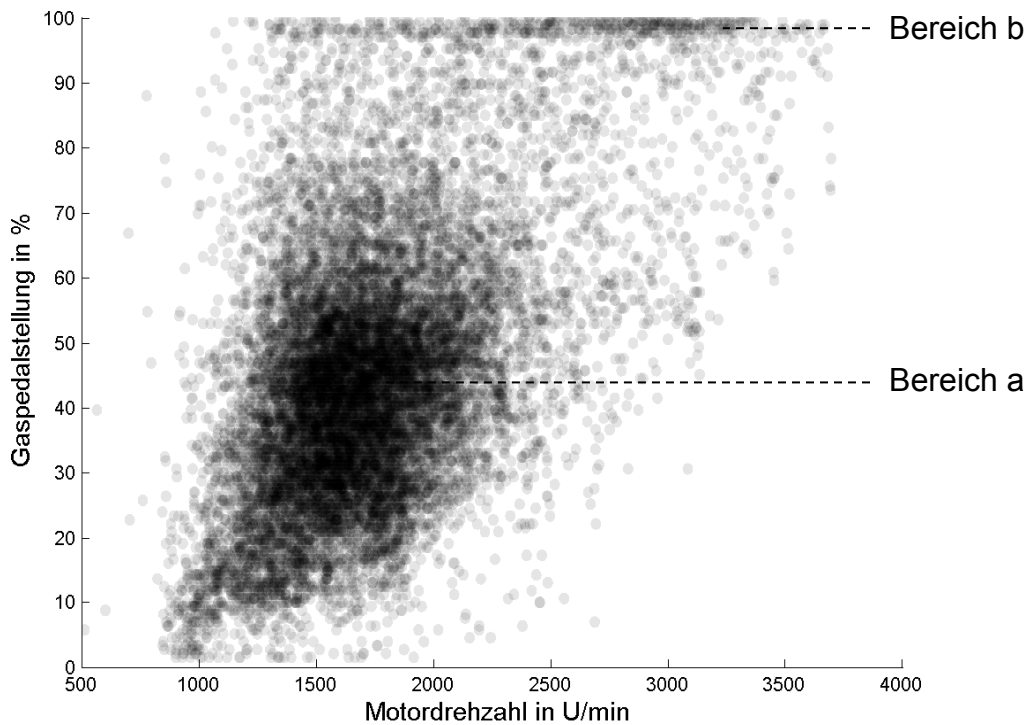


Abbildung 64: Gaspedalstellung in Abhängigkeit der Motordrehzahl für die betrachtete VW-Golf-Anwendung (ca. 1400 betrachtete Beschleunigungsvorgänge)

Im Vergleich mit den vorliegenden Messdaten wird an dieser Stelle die Vorhersagequalität des KoGaS-Modells als ausreichend gut bewertet, wobei diese Bewertung anhand der zum Beginn des Kapitels (siehe Abschnitt 7.1.1) aufgestellten Anforderungen für den Modellaufbau erfolgt.

7.1.7 Zusammenfassung und Diskussion

Ziel des vorliegenden Kapitels ist die exemplarische Ausführung der in Kapitel 5 vorgestellten Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen. Dementsprechend werden die bei der Modellbildung durchgeführten Schritte und getroffenen Entscheidungen ausführlich dokumentiert und diskutiert. Gleichzeitig ergibt sich mit dem entwickelten KoGaS-Beschleunigungsmodell eine kompakte Beschreibung des Fahrerverhaltens bei Beschleunigungsvorgängen, die in dieser Form in der Literatur bisher nicht bekannt ist. Der Gültigkeitsbereich des Modells und aus dem Modell resultierende Konsequenzen werden an dieser Stelle in kurzer Form diskutiert.

Das Modell beruht auf einigen vereinfachten Annahmen und Hypothesen. Diskutiert werden im Folgenden die Wahl der Beschleunigungsdauer als Fahrerwunsch, die Hypothese einer konstanten Gaspedalstellung während des kompletten Beschleunigungsvorgangs und die Vereinbarkeit des Modells mit dem Stand der Forschung zu Neurowissenschaften und Hirnforschung.

Die Verwendung der *Beschleunigungsdauer als Fahrerwunsch* kann aus verschiedenen Perspektiven kritisch hinterfragt werden. Der verwendete Wert kann prinzipiell nicht beliebig variieren, sondern liegt in einem bestimmten Bereich, den der jeweilige Fahrer als „wünschenswert“ empfindet. Es kann zudem angenommen werden, dass der „innere Fahrerwunsch“ für einen Fahrer nicht in einer exakten Zeitangabe, sondern eher in einer unscharfen Erwartungsmenge liegt („entspannte“, „normale“ und „schnelle“ Beschleunigung). Die in Kapitel 6.2.5 vorgestellten Messdatenauswertungen erlauben grundlegend die Annahme, dass eine Übertragung dieser Werte für einen Fahrer bei unterschiedlicher Fahrzeugbeladung und verschiedenen Fahrzeugen gerechtfertigt ist (siehe Abbildung 42). Damit entspricht das gewählte Vorgehen der gesetzten Zielstellung, erhebt jedoch keinen Anspruch auf durchgehende Gültigkeit und Übertragbarkeit im Kontext anderer Zielsetzungen.

Auch die *Annahme einer durchgehend konstanten Gaspedalstellung während des Beschleunigungsvorgangs* stellt eine ungefähre Annäherung an das tatsächliche Verhalten des Fahrers dar. Auf die auftretenden Streuungen im gemessenen Fahrerverhalten wird bei der Validierung des Modells ausführlich eingegangen (siehe Kapitel 7.1.6). Abhängig von dem Anwendungsbereich des Beschleunigungsmodells und der Sensibilität der Ergebnisse gegenüber den nicht beinhalteten Streuungen ist eine Prüfung erforderlich, in wie weit die zusätzlich auftretenden Streuungen in der Gaspedalstellung mit einer Modellerweiterung berücksichtigt werden müssen.

Beim Vergleich des aufgestellten Modells mit den in Kapitel 2.1 vorgestellten *Grundlagen im Bereich Neurowissenschaften* muss angemerkt werden, dass das vorgestellte Modell keine direkte Repräsentation der Vorgänge innerhalb des Gehirns des Fahrers darstellt. Vielmehr entspricht das KoGas-Beschleunigungsmodell einer sehr stark vereinfachten Abbildung des Ergebnisses eines Gewöhnungsvorgangs, der für den Fahrer über längere Zeit, besonders aber bei der Anpassung an ein neues Fahrzeug, stattfindet. Der abgeschlossene Gewöhnungsvorgang wird im Modell vorausgesetzt und der Verlauf der Gewöhnungsphase ist in der vorgenommenen Modellierung nicht mit abgebildet.

Die vorgestellten Überlegungen zur Validität des Modells sind relevante Einschränkungen, die bei der Anwendung des Modells berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf eine Erweiterung des Modells verzichtet, insbesondere weil dem Vorteil einer genaueren Modellierung der Nachteil einer zusätzlichen Komplexität des Modells gegenübersteht.

Mit dem KoGaS-Beschleunigungsmodell ergibt sich eine kompakte Beschreibung des Fahrerverhaltens bei Beschleunigungsvorgängen. Insbesondere ermöglicht es den direkten Vergleich des Verhaltens eines Fahrers bei verschiedenen Motoren und die Anpassung des Fahrerverhaltens an ein geändertes Motorkennfeld des Verbrennungsmotors im Fahrzeug. Demnach führt eine Erhöhung des Motormoments bei niedrigen Drehzahlen – sofern der Fahrbetrieb in diesem Bereich für den Fahrer aus Komfort- und Akustik-sicht akzeptabel erscheint – zu einer Reduzierung der Schaltdrehzahlen durch diesen Fahrer und somit einer Reduzierung der mittleren Motordrehzahl während des Fahrbetriebs. Die beschriebenen Mechanismen ermöglichen eine direkte Abbildung von Wechselwirkungen zwischen Motorkennfeld und Fahrerverhalten und damit auch die Abbildung der Bauteilbelastung, die sich durch einen geänderten Aufenthaltsbereich innerhalb des Motorkennfelds als Ergebnis dieser Wechselwirkungen ergibt.

Das aufgebaute Modell kann zur Bewertung von Bauteilbelastungen für das Manöver Beschleunigen verwendet werden. Diese Nutzung – in der vorgestellten Methodik den Bereichen *Einführen und umsetzen* sowie *Nachbereiten und lernen* zugeordnet – wird separat in Kapitel 8.2 behandelt.

7.2 Modellierung des Fahrerverhaltens für gesamte Fahrten

Im vorangegangenen Abschnitt ist die entwickelte Methodik zur Modellierung von Fahrerverhalten am Beispiel der Modellierung von Beschleunigungsvorgängen angewandt. Die dargestellte Methodik kann in ähnlicher Form auch zur Modellierung anderer Manöver verwendet werden, beispielsweise der Modellierung von Bremsvorgängen, Konstantfahrt oder von Anfahrvorgängen.

Im Folgenden wird der Aufbau eines Gesamtfahrermodells zur Modellierung kompletter Fahrzyklen vorgestellt. Die sich dabei ergebenden Änderungen und Auswirkungen auf die Modellbildung werden diskutiert.

Die Vorgehensweise folgt der entwickelten Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen und wird in Tabelle 13 dargestellt. Im Gegensatz zu der vorher beschriebenen Herleitung eines Fahrermodells für ein einzelnes Manöver (siehe Kapitel 7.1) wird hier keine Begrenzung des Modellumfangs auf ein einzelnes Manöver vorgenommen, sondern es werden verschiedene Manöver in Form eines Zustandsautomaten zusammengefasst. Dabei stellt die SPALTEN-Methodik ein geeignetes Werkzeug dar, um den Modellierungsprozess zu beschreiben und die notwendigen Änderungen abzubilden.

Tabelle 13: Beschreibung der verfolgten Methodik zur Synthese eines Fahrermodells für gesamte Fahrten

SPALTEN-Methodik	Durchgeführte Schritte (mit Angabe des Kapitels):
Situation analysieren	7.2: Festlegung der Zielsetzung (Fahrermodell für Fahrzeuglängsdynamik) und Überblick über die gewählte Vorgehensweise
Problem eingrenzen	7.2.1: Trennung der Fahrerhandlungen in einzelne Manöver, Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung
Alternativen aufzeigen	7.2.3: Aufbau des Fahrermodells (Wahl verschiedener Modellansätze für die einzelnen Manöver)
Lösung auswählen	
Tragweite analysieren	7.2.4: Implementierung von Fahrer- und Fahrzeugmodell 7.2.5: Validierung des Fahrermodells
Einführen und umsetzen	Anwendung des Beschleunigungsmodells im Rahmen von Kapitel 8
Nachbereiten und lernen	

Zielsetzung für das aufzubauende Fahrermodell ist an dieser Stelle die Modellierung der Längsdynamik im Antriebsstrang für die Simulation kompletter Fahrzyklen. Dies ermöglicht die Abbildung und Untersuchung komplexer Schädigungsmechanismen, die in ihrem Umfang nicht auf einzelne Manöver reduziert werden können. Eine Randbedingung für das aufzubauende Modell ist wiederum, eine möglichst kompakte Darstellung des Fahrerhaltens zu erhalten, ohne relevante Teile des Fahrerhaltens in der Längsdynamik zu vernachlässigen.

7.2.1 Trennung von Fahrerwunsch und Handlungsausführung

In Abbildung 65 ist ein einzelner Ausschnitte mit der gemessenen Längsdynamik aus den vorhandenen Messdaten zum Fahrerverhalten dargestellt. Dabei beinhaltet die Darstellung bereits die *Unterteilung des Fahrerhaltens in einzelne Manöver*, die vom Fahrer ausgeführt werden. Diese wurden als erster Schritt der *Problemeingrenzung* in der ausgewählten Messung markiert.

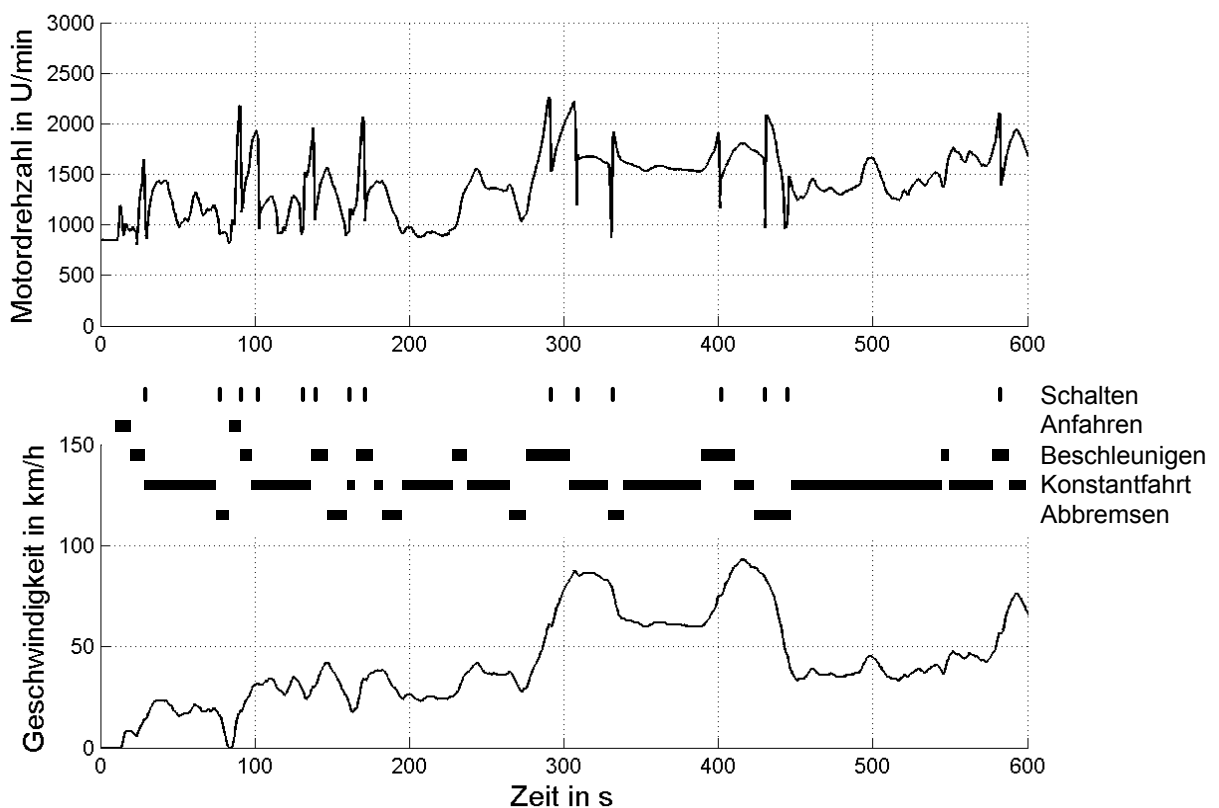


Abbildung 65: Bewertung eines gemessenen Fahrtabschnitts hinsichtlich auftretender Manöver. Die Markierung der Manöver wurde dabei über die Analyse der Geschwindigkeits- und Drehzahlverläufe dargestellt und ist somit eine Interpretation der untersuchten Messdaten

Bei der qualitativen Analyse der Fahrtdaten werden dabei fünf grundlegende Manöver unterschieden, die in der Fahrt wiederholt auftreten:

- Anfahren
- Beschleunigen
- Konstantfahrt
- Abbremsen / Verzögern
- Schalten

Dementsprechend muss das aufzubauende Fahrermodell die beschriebenen Manöver jeweils in einer geeigneten Modellgüte abbilden. Die Modellqualität misst sich somit sowohl an der Qualität der einzelnen Teilmodelle zur Beschreibung der jeweiligen Manöver als auch an der geeigneten Zusammenfassung zu gesamten Fahrzyklen. Zur Herleitung dieser Modellstruktur wird wieder eine *Auftrennung des Fahrerhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung* vorgenommen. Eine Auftrennung des kompletten Fahrerhaltens nach den beiden Kategorien wird in Tabelle 14 vorgenommen.

Tabelle 14: Auftrennung des betrachteten Fahrerhaltens nach Fahrerwunsch und Handlungsausführung.

Fahrerwunsch	Handlungsausführung
Vorgabe des vom Fahrer gewählten Geschwindigkeitsprofils, aus dem sich der Bedarf für die einzelnen Manöver ergibt.	Ausführung der einzelnen Manöver: Teilmodelle Anfahren, Beschleunigen, Konstantfahrt, Abbremsen und Schalten Übergang der einzelnen Manöver ineinander

Zur Vorgabe des Fahrerwunschs als Geschwindigkeitsprofil wird auf das Konzept des Orientierungsgeschwindigkeitsprofils (OGP) zurückgegriffen (siehe Kapitel 2.2.2). Dieses unterteilt das komplexe Fahrtgeschehen in eine Serie von Konstantfahrten, die durch Beschleunigungs- und Abbremsmanöver miteinander verbunden werden. Im Rahmen der vorgestellten Methodik eignet sich das Konzept des Orientierungsgeschwindigkeitsprofils zur Abbildung des Fahrerwunschs, ergänzt mit weiteren Kennwerten je nach Manöver. Die Menge der zur Abbildung des Fahrerwunsches verwendeten Werte ist in Abbildung 66 dargestellt.

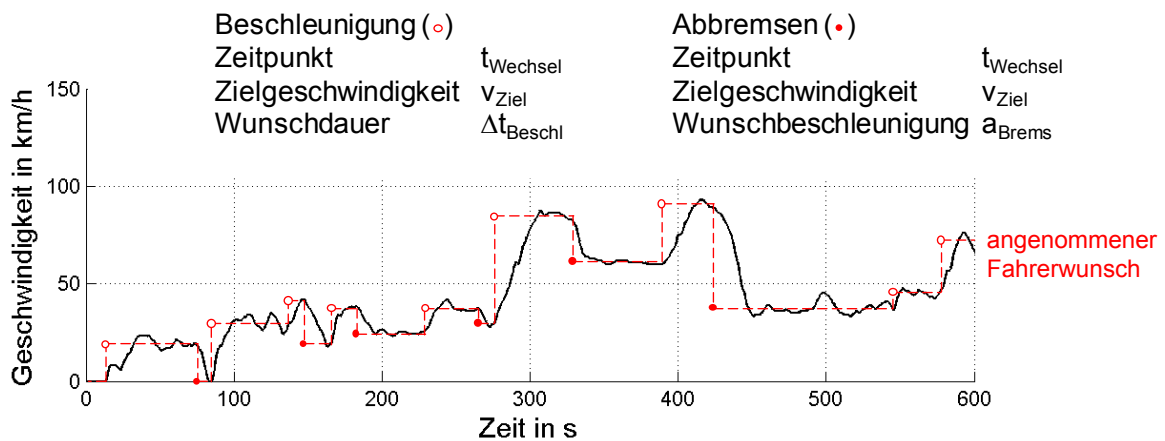


Abbildung 66: Für die Abbildung des Fahrerwunsches benötigte Kennwerte

7.2.2 Implementierung der Handlungsausführung als Zustandsautomat

Zur Umsetzung des Fahrerwunsches in der gewählten Form ist ein Wechsel zwischen verschiedenen Teilmodellen zur Beschreibung der einzelnen Manöver notwendig, da verschiedene Manöver wie Anfahren, Beschleunigen und Abbremsen nicht zwangsläufig mit dem gleichen Handlungsmodell abgebildet werden sollen. Ein Flussdiagramm zur Beschreibung der Abhängigkeit der einzelnen Manöver wird in Abbildung 67 dargestellt. Die Darstellung ist nach der hierarchische Struktur des Fahrerverhaltens in Manöver- und Kontrollebene getrennt (vergleiche Kapitel 2.2.1), wobei die Trennung auch in der Unterscheidung zwischen allgemein benötigten Handlungen (Manöverebene) und nur bei Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe benötigten Handlungen (Kontrollebene) motiviert ist.

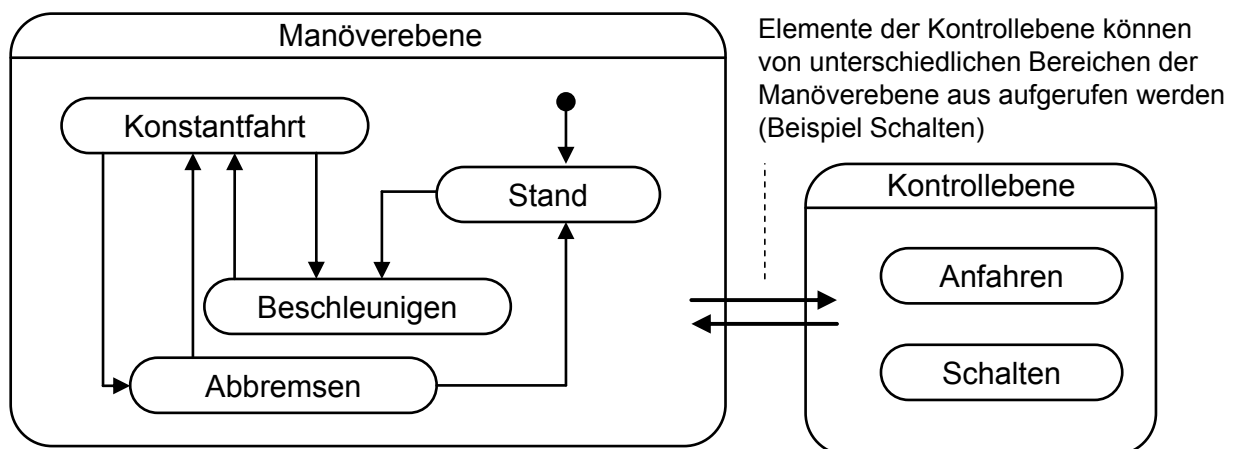


Abbildung 67: Schematische Beschreibung des Modells zur Handlungsausführung als Zustandsautomat (Darstellung ähnlich der UML-Notation für Zustandsautomaten).

Eine Abbildung des dargestellten Systems als Simulationsmodell ist über das Konstrukt des Zustandsautomaten möglich. Der Zustandsautomat (teilweise auch als „endlicher Automat“ und im Englischen als „Finite State Machine“ bezeichnet) modelliert ein System über eine endliche Menge verschiedener Zustände, von denen jeweils genau ein Zustand aktiv sein kann. Zustandsautomaten sind im Bereich der Informatik und Elektrotechnik weit verbreitet. Eine ausführliche Diskussion und Nutzung im Rahmen von Fahrermodellierung ist bislang nicht bekannt¹.

Zur Theorie und Anwendungspraxis von Zustandsautomaten sei an dieser Stelle auf die allgemeine Fachliteratur verwiesen². Bei Zustandsautomaten handelt es sich um *ergebnisdiskrete dynamische Systeme*, während die Beschreibung eines Fahrzeugantriebsstrangs über Differentialgleichungen als *kontinuierliches System* erfolgt. Die Kopplung von ergebnisdiskretem und kontinuierlichem System wird üblicherweise als *hybrides System* bezeichnet, für das sich bei der Implementierung als Simulationsmodell verschiedene Anforderungen zur Wahrung der Synchronität beider Modellteile ergeben³. Im Fall eines Fahrermodells handelt es sich um eine verhältnismäßig schwache Kopplung, da das ergebnisdiskrete Fahrermodell nur auf Stell- und Regelgrößen des kontinuierlichen Systems, nicht aber direkt auf Zustandsgrößen einwirkt (als Beispiel kann hier die Formulierung des Fahrer- und Fahrzeugmodells in Abbildung 71 herangezogen werden). Das diskrete Fahrermodell wird somit als vom kontinuierlichen Fahrzeugmodell aufgerufene Funktion implementiert, wobei diese einen eigenen Satz übertragener Zustandsgrößen sowie eine Erkennung für verworfene Berechnungsschritte des aufrufenden Fahrzeugmodells beinhaltet (Abbildung 68).

Die vorgeschlagene Einbindung des Zustandsautomaten als vom Mehrkörpermodell aufgerufene Unterfunktion ermöglicht die Verwendung des Fahrermodells innerhalb vorhandener Mehrkörpersimulationsumgebungen, ohne in diesen eine Erweiterung der Lösungsalgorithmen auf die Anforderungen hybrider Systeme zu erfordern. Damit stellt sie eine Implementierung dar, die den Anforderungen des Fahrermodells an Zustandswechsel und Modularität entspricht und gleichzeitig innerhalb vorhandener Simulationsumgebungen zur Modellierung von Fahrzeug und Antriebsstrang eingesetzt werden kann.

¹ Vergleiche auch die Literaturübersicht in Kapitel 2.2.

² Siehe beispielsweise Sanfelice et al 2014.

³ Siehe Sahbani und Pascal 2000 sowie Sanfelice et al. 2014.

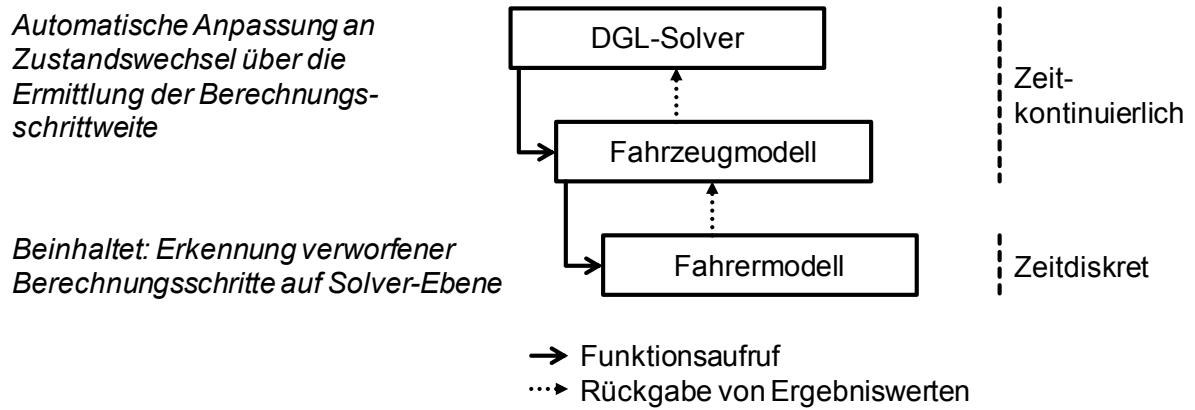


Abbildung 68: Darstellung der Programmstruktur von numerischem DGL-Solver, Fahrzeugmodell und Fahrermodell

7.2.3 Aufbau des Fahrermodells

Zur Abbildung der Handlungsausführung für das Fahrermodell ist eine Formulierung von Teilmodellen für die einzelnen Fahrmanöver notwendig, die den Schritten *Alternativen aufzeigen* und *Lösung auswählen* in der vorgestellten Methodik entspricht. Zur Beschreibung von Beschleunigungsmanövern wird das bereits in Kapitel 7.1 eingeführte KoGaS-Beschleunigungsmodell verwendet. Die Modelle für die Manöver Anfahren, Schalten, Konstantfahrt und Abbremsen wurden auf ähnliche Weise hergeleitet und werden im Folgenden in kurzer Form beschrieben.

Anfahren:

Für die Bestimmung von Gaspedalstellung und Kupplungsmomentenverlauf wird ein optimaltheoretisches Modell verwendet, das für beide Signale geeignete Zeitverläufe ermittelt. Diese werden vom Fahrermodell als Open-Loop-Manöver, also ohne Rückkopplung im Regelkreis, übernommen.

Tabelle 15: Beschreibung des für Anfahrvorgänge verwendeten optimaltheoretischen Fahrermodells

Fahrerwunsch	Handlungsausführung
Anfahren mit einer vorgegebenen Beschleunigung	Bestimmung von Gaspedal- und Kupplungsverläufen, die ein Anfahren mit der vom Fahrer gewünschten Beschleunigung ohne „Abwürgen“ oder „Hochtouren“ ermöglichen.

Schalten:

Das Auslösen von Schaltvorgängen erfolgt gesteuert über die Motordrehzahl. Im Fahrermodell sind Drehzahlschwellen vorgesehen, über bzw. unter denen Schaltvorgänge vorkommen können. Beim Über- bzw. Unterschreiten der Grenzwerte wird über die Differenz zwischen Motordrehzahl und Drehzahlschwelle integriert, bis ein vordefinierter Grenzwert überschritten wird, was den Schaltvorgang auslöst (siehe Abbildung 69). Die Bestimmung von Gaspedal- und Kupplungswerten erfolgt analog zur Vorgehensweise bei Anfahrvorgängen über ein optimaltheoretisches Modell, dessen Ausgabewerte als Open-Loop-Manöver übernommen werden.

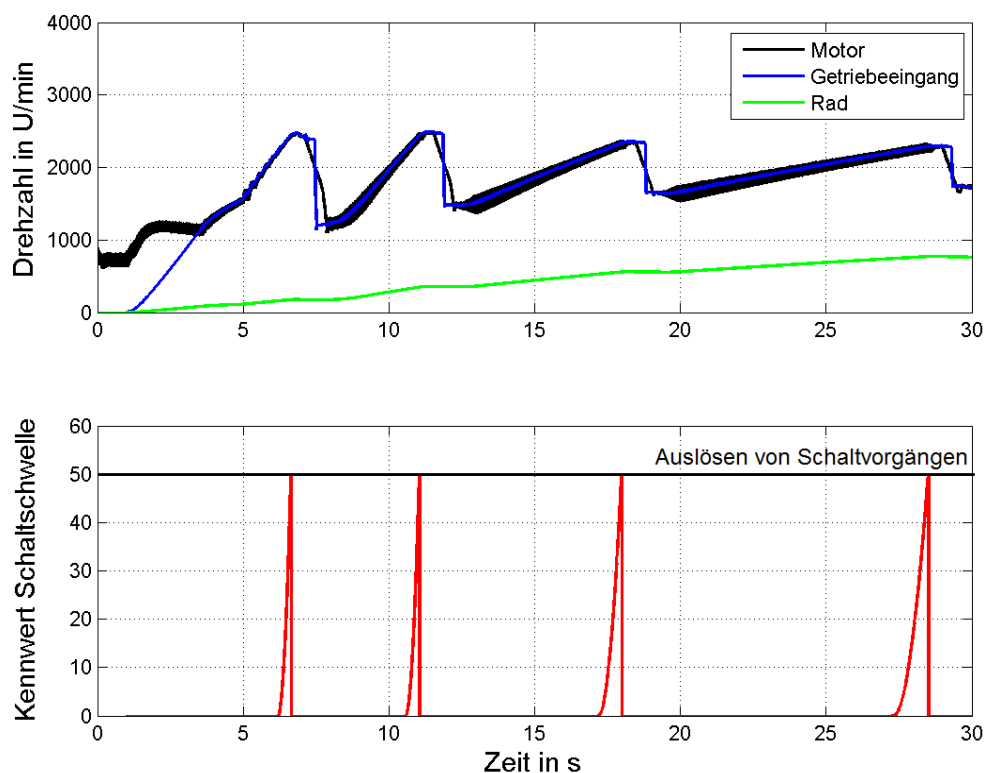


Abbildung 69: Modellierung von Schaltvorgängen über einen Kennwert (hier konstant angenommen)

Die Ermittlung der Schaltgrenze über den integrierten Kennwert orientiert sich an der Vorgehensweise innerhalb der PSI-Theorie¹ und ermöglicht eine Berücksichtigung der Gangabhängigkeit von Schaltvorgängen, die bei Beschleunigungsvorgängen festgestellt wurde (siehe Kapitel 7.1.2). Der Grenzwert für die Schwelle kann optional mit einer Streuung beaufschlagt werden, so dass über diesen Mechanismus die

¹ Siehe Dörner 1999.

Streuung des Fahrerverhaltens bei mehrfacher Wiederholung des gleichen Manövers abgebildet wird.

Konstantfahrt:

Während der Konstantfahrt wird als Fahrerwunschfunktion eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben, die beispielsweise über den Mittelwert der Fahrtgeschwindigkeit aus gemessenen Fahrtdaten vorgegeben werden kann. Gleichzeitig zeigen die Fahrtdaten durchgehend Abweichungen von der mittleren Geschwindigkeit, die zum Beispiel über die Verwendung eines PID-Reglers nicht abgebildet werden können.

Als gute Methode zur Abbildung der Handlungsausführung hat sich dabei die wiederholte Ermittlung einer geeigneten Gaspedalstellung erwiesen, bei der der Fahrer innerhalb eines vorgegebenen Zeitbereichs Δt die Wunschgeschwindigkeit erreicht. Auf die notwendige Beschleunigung a_{ideal} wird zur Abbildung der Unschärfe eine Streuung Δa_{Fehler} aufgeschlagen, die über eine normalverteilte Zufallsfunktion ermittelt wird. Diese Vorgehensweise wird nach Ablauf des Handlungsintervalls ΔT wiederholt. Kennwerte für das Fahrerverhalten des jeweiligen Fahrers sind dabei ausschließlich die Standardabweichung der Normalverteilung σ_a sowie das vom Fahrer gewählte Handlungsintervall Δt (siehe Abbildung 70). Ein Beispiel für die Ergebnisse in der Simulation wird in Abbildung 72 dargestellt.

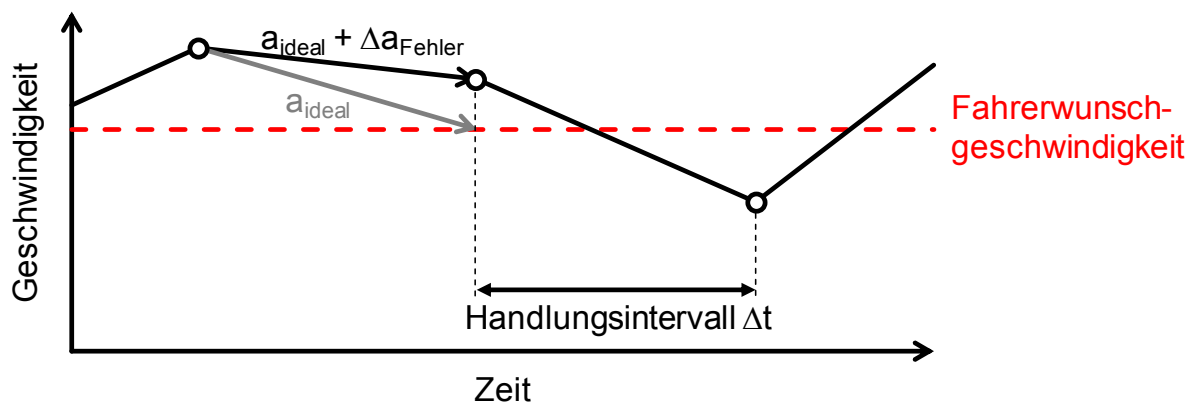


Abbildung 70: Modellierung einer Konstantfahrt als wiederholte Anpassung der Fahrzeugbeschleunigung unter jeweiliger Berücksichtigung eines zufällig gewählten Fehlers.

Abbremsen:

Zur Modellierung von Bremsvorgängen wird die von Müller-Kose eingeführte Modellierung übernommen¹. Demnach lässt der Fahrer das Fahrzeug ausrollen, bis die Differenz zwischen neuer Zielgeschwindigkeit und aktueller Geschwindigkeit so groß ist, dass ein Abbremsen mit einer vorgegebenen Beschleunigung notwendig wird, um die gewünschte Zielgeschwindigkeit zum vorgegebenen Zeitpunkt zu erreichen (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Beschreibung des für die Modellierung von Bremsvorgängen verwendeten Fahrermodells

Fahrerwunsch	Handlungsausführung
Begrenzung der Beschleunigung beim Bremsvorgang auf einen vorgegebenen Wert.	<p>So lange wie möglich: Ausrollen des Fahrzeugs (Ermittlung des notwendigen Zeitpunkts für Bremsvorgänge).</p> <p>Bei der Notwendigkeit von Bremsmanövern: Bremsen mit einer vorgegebenen Beschleunigung</p>

Zusammenfassung:

Mit den vorgestellten Teilmodellen liegen geeignete Manövermodelle vor, die in die in Kapitel 7.2.2 beschriebene Gesamtstruktur des Handlungsmodells in Form eines Zustandsautomaten eingebunden werden können. Dabei wurden mit Ausnahme des oben beschriebenen Modells für das Manöver Abbremsen, das an eine in der Literatur beschriebene Modellierung angelehnt ist, eigene Manövermodelle aufgebaut, für die keine vergleichbaren Modelle in der bekannten Literatur zu Fahrermodellierung verfügbar sind. Die entwickelte Struktur des Zustandsautomaten und des damit implementierten Fahrermodells wird in Anhang D ausführlicher beschrieben.

Mit der gewählten Modellstruktur liegt ein Lösungsansatz vor, der das Ziel der Modellierung des Fahrerverhaltens für die Fahrzeuglängsdynamik prinzipiell erfüllt. Eine Bewertung der Funktion des Modells (Schritt *Tragweite analysieren* in der SPALTEN-Methodik) erfordert dabei eine Beispielimplementierung des Modells.

¹ Müller-Kose 2002.

7.2.4 Implementierung von Fahrer- und Fahrzeugmodell

Zum Aufbau und zur Validierung des Fahrermodells wird ein geeignetes Fahrzeug- und Antriebsstrangmodell benötigt. Zum Erhalt einer weitreichenden Flexibilität erfolgt der Aufbau des Modells als Differentialgleichungssystem in Matlab und GNU Octave als Zustandsraumdarstellung. Die Struktur des aufgebauten Antriebsstrangmodells ist in Abbildung 71 dargestellt.

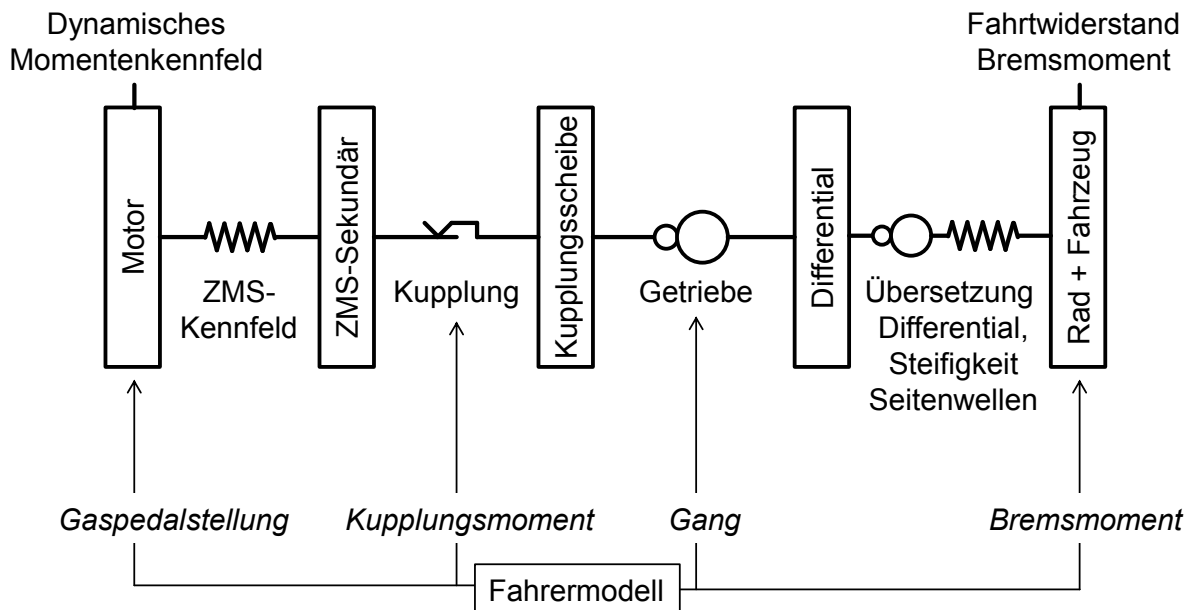


Abbildung 71: Struktur des als Zustandsgleichung in Matlab und GNU Octave modellierten Fahrzeugmodells

Das Fahrzeugmodell beinhaltet unter anderem die folgenden Elemente:

- Modellierung der Motorungleichförmigkeit durch ein dynamisches Momentenkennfeld
- Abbildung der Kupplung als Reibmodell mit Zustandswechseln zwischen Gleiten und Haften
- Berücksichtigung der Getriebeübersetzung mit Abbildung der Synchronisierung zwischen Gängen
- Berücksichtigung des Fahrtwiderstands über dynamische Berechnung des Roll- und Luftwiderstands

Das Modell kann für unterschiedliche Fahrzeug- und Motorparameter kalibriert werden. Die im Folgenden diskutierten Auswertungen werden durchgehend am Beispiel der bereits in Kapitel 7.1 betrachteten VW-Golf-Anwendung (1.9-l-4-Zylinder Dieselmotor) dargestellt.

Die einzelnen Teilmodelle des Fahrermodells sind in die in Kapitel 7.2.2 hergeleitete Struktur eines Zustandsautomaten implementiert, der als Unterfunktion über das Fahrzeugmodell aufgerufen wird. Die Beschreibung des aktuellen Fahrerzustands wird in einer globalen Variablen abgelegt, die die Übertragung des Zustands von einem Aufruf des Fahrermodells zum nächsten ermöglicht. Detektiert die Funktion zu Beginn des Aufrufs einen verworfenen Berechnungsschritt (angezeigt durch die übergebene Simulationszeit, $t_{sim} < t_{sim_vorheriger_Aufruf}$), wird der aktuelle Zustand des Fahrers verworfen und stattdessen der vorherige Zustand reaktiviert.

Die Ermittlung der Zufallswerte, die für die Ermittlung der Schwellwerte für Schaltgrenzen sowie für die Bestimmung des Fehlers bei der Sollbeschleunigungswahl während der Konstantfahrt benötigt werden, erfolgt über einen Satz zum Beginn der Simulation generierter Pseudozufallszahlen. Über diese Methode ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei wiederholter Berechnung gegeben, gleichzeitig bleibt die Möglichkeit zur Variation der Simulation durch Anpassung der Initialisierungsvariable für den Pseudozufallsgenerator gegeben (vergleiche Kapitel 5.4 sowie Abbildung 72).

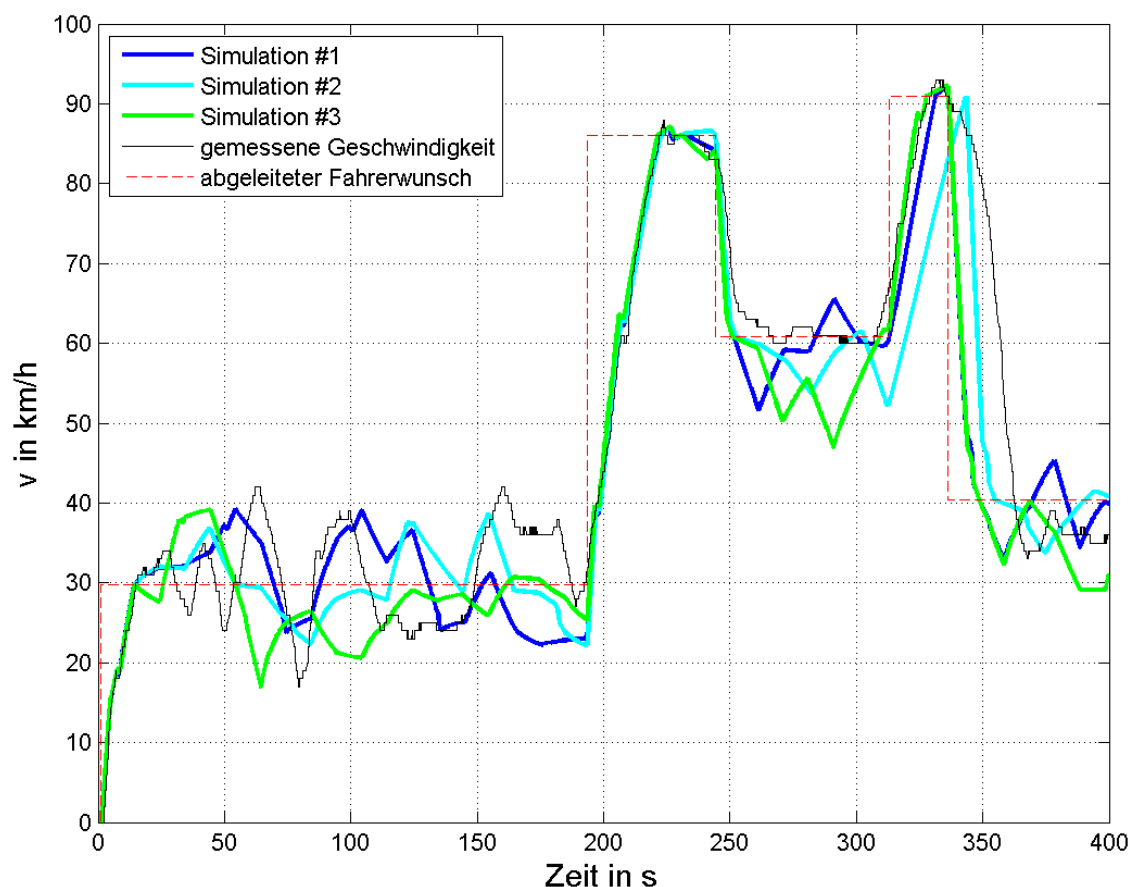


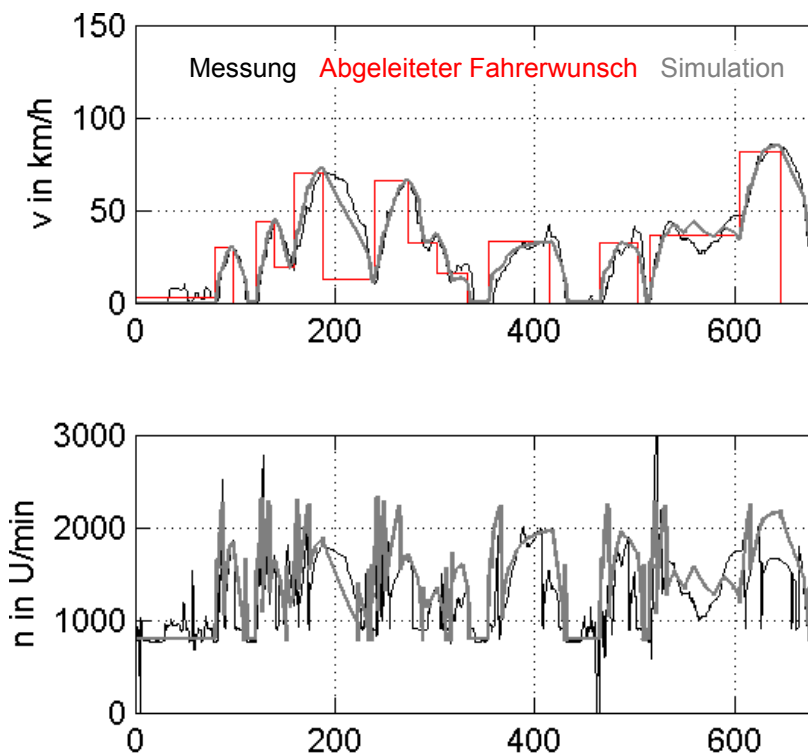
Abbildung 72: Darstellung von drei Simulationen mit identischen Eingangsbedingungen bei Simulation mit unterschiedlicher Initialisierung des Pseudozufallsgenerators.

7.2.5 Validierung des Fahrermodells

Die Validierung des Modells (Schritt *Tragweite Analysieren* in der SPALTEN-Methodik) erfolgt über die Abbildung gemessener Fahrten als Fahrerwunschfunktion und anschließende Reproduktion des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens durch eine Dynamiksimulation. Kriterien zur Bewertung des Fahrermodells sind

- Abbildung des gemessenen Fahrerverhaltens mit ausreichend hoher Modellgüte (Bewertung über einen qualitativen Vergleich der Ausgabegrößen)
- Abbildung der Kennwerte und statistischen Darstellungen zur Bewertung von Fahrtdaten (siehe Kapitel 6)
- Anwendbarkeit und Robustheit des Fahrermodells (stabile Simulation ohne Abstürze, flexible Anwendbarkeit des Fahrermodells auf unterschiedliche Manöver und Fahrtbereiche)

Die Validierung wird am Beispiel von mehreren Fahrten dargestellt, die insgesamt ca. 20 h Fahrt mit 800 km Fahrtstrecke umfassen. Für die simulierten Fahrten wurde durchgehend ein Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem Fahrzeugverhalten vorgenommen (automatische Erzeugung von Bilddateien zur anschließenden Bewertung, siehe auch Abbildung 73). Ein Auszug aus den Ergebnissen wird in Abbildung 74 und Abbildung 75 dargestellt.



Validierung des Simulationsmodells:
Die gemessene Fahrzeuggeschwindigkeit (schwarze Kurve) wird in ein OGP-Profil (rot dargestellt) umgewandelt. Anschließend wird eine Simulation mit Fahrer- und Fahrzeugmodell durchgeführt und die über die Simulation berechnete Fahrzeuggeschwindigkeit neben der ursprünglich gemessenen Geschwindigkeit dargestellt (graue Kurve).

Genauso wird im unteren Graph die in der Messung ermittelte Motordrehzahl mit der Motordrehzahl in der Simulation verglichen. Der Vergleich von gemessenen und simulierten Werten ermöglicht eine Bewertung der

Abbildung 73: Beschreibung der gewählten Vorgehensweise

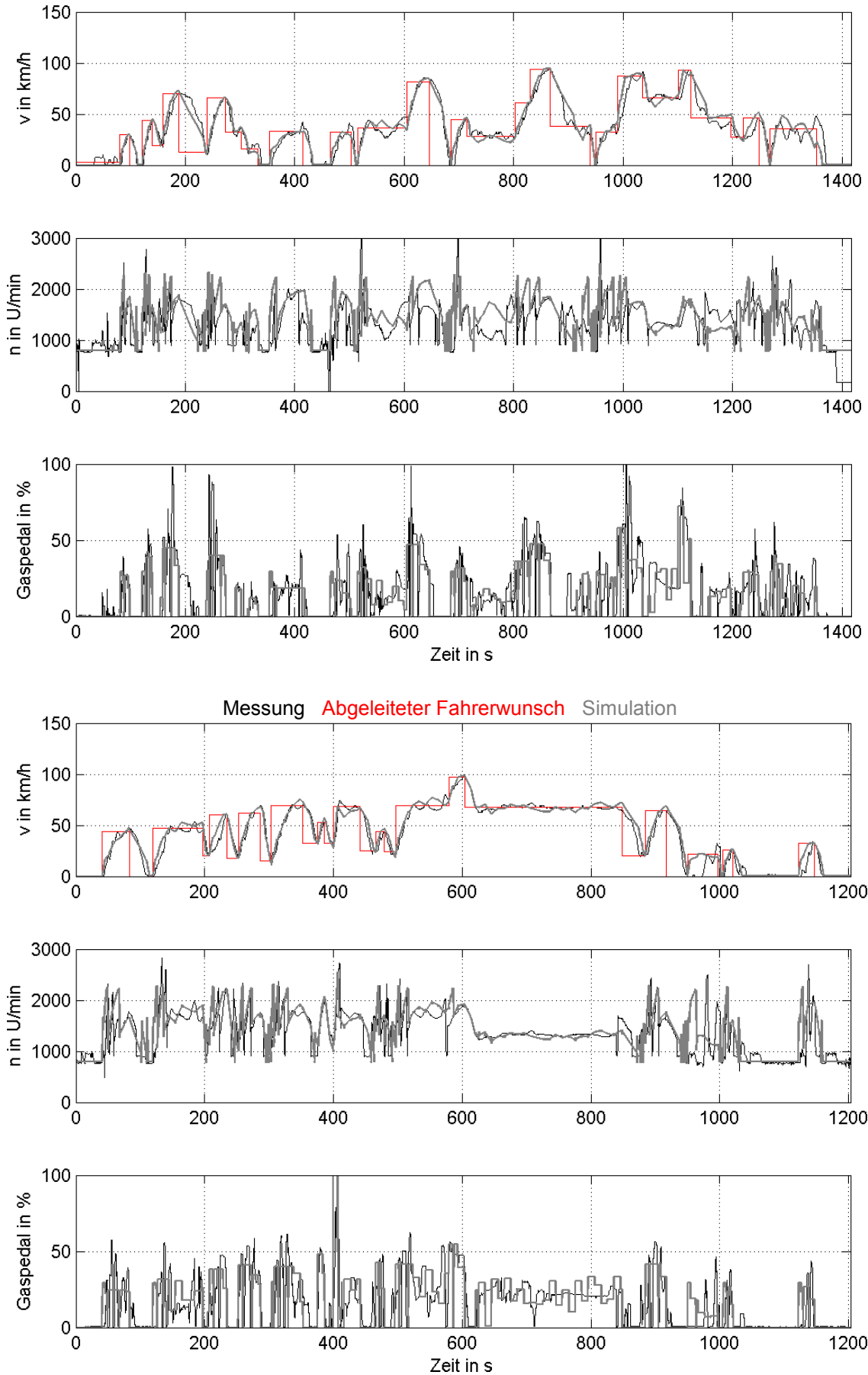


Abbildung 74: Vergleich von gemessenen und simulierten Fahrten

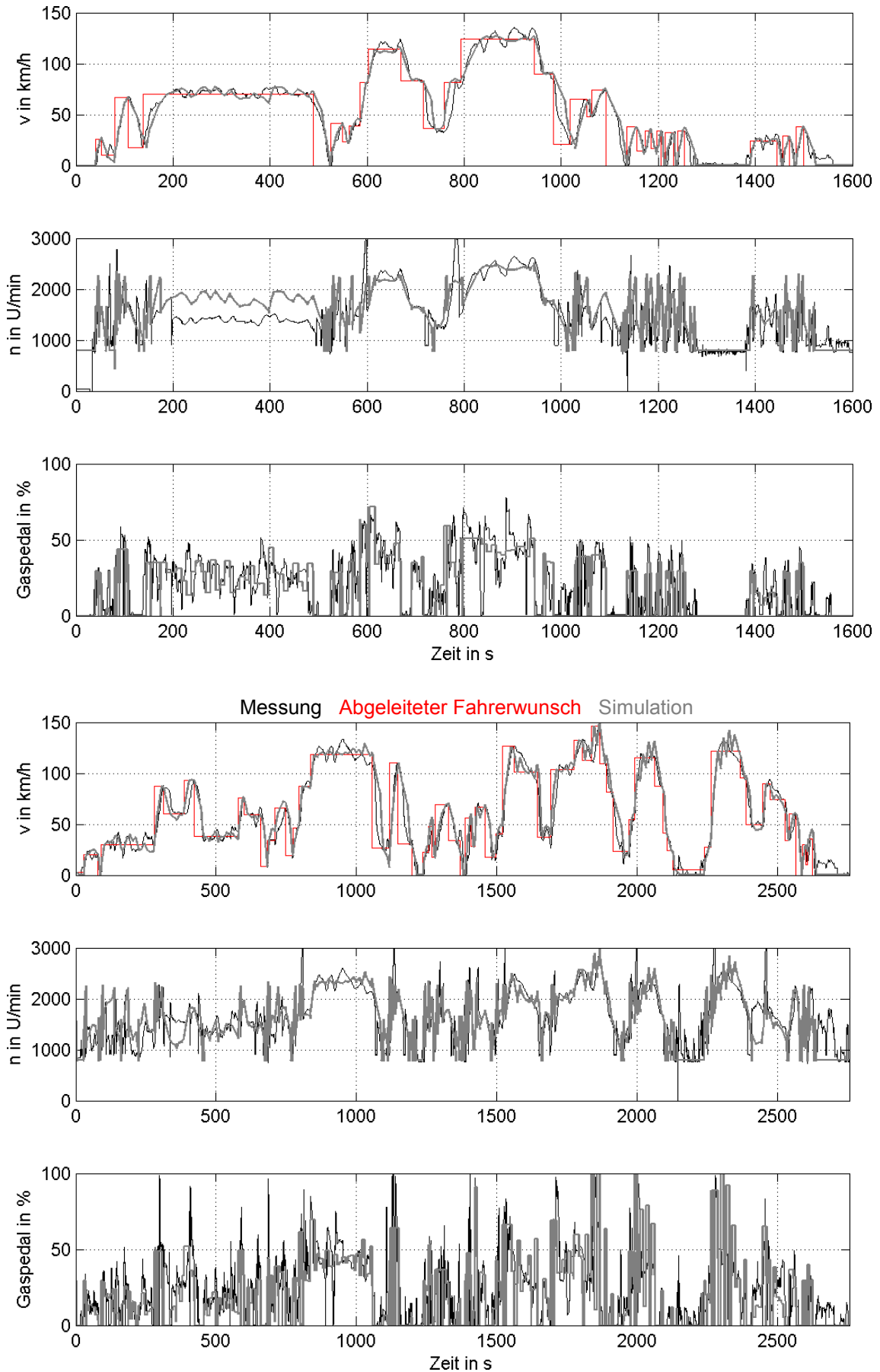


Abbildung 75: Vergleich von gemessenen und simulierten Fahrten

Im Vergleich können die oben definierten Kriterien für die Modellgüte als erfüllt angesehen werden. Das aufgebaute Fahrermodell liefert eine hinreichend gute Abbildung der Fahrzeuglängsdynamik und damit auch des Fahrerverhaltens und ermöglicht dem Benutzer gleichzeitig eine einfache Parametrisierung. Auch im direkten Vergleich mit statistischen Kenngrößen bezüglich Fahrerverhalten und Bauteilbelastung liefert das Modell eine hinreichend gute Ergebnisqualität (siehe Kapitel 8).

7.2.6 Diskussion der Ergebnisse

Im aktuellen Kapitel wird der Aufbau von Fahrermodellen für komplette Fahrten anhand der in Kapitel 5 hergeleiteten Methodik exemplarisch durchgeführt und diskutiert. Die vorgeschlagenen methodischen Werkzeuge, insbesondere die Trennung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung, finden auch hier wieder Anwendung. Bei der Wahl eines geeigneten Modells für die Handlungsausführung kann jedoch im Gegensatz zum Fahrermodell für ein abgegrenztes Manöver (siehe Kapitel 7.1) nicht mehr ein einzelnes Modell verwendet werden. Vielmehr erfolgt eine Verbindung mehrere Teilmodelle für die einzelnen auftretenden Manöver zu einem Gesamtmodell, die an dieser Stelle über das Konstrukt des Zustandsautomaten ermöglicht wird. Die verwendete Methode zur Synthese des Fahrermodells, insbesondere aber die Verwendung des Zustandsautomaten zur Verbindung mehrerer Teilmodelle, ist dabei prinzipiell auch für andere Anwendungsfelder der Fahrermodellierung, etwa den Anwendungsbereich der Querdynamik, geeignet.

Das aufgebaute Fahrermodell besteht aus den Anteilen Fahrerwunsch in Form eines Orientierungsgeschwindigkeitsprofils und der Handlungsausführung in Form eines Zustandsautomaten, der zwischen den einzelnen Teilmodellen für die Manöver Anfahren, Beschleunigen, Schalten, Konstantfahrt und Abbremsen wechselt. Die Struktur ist in der Lage, das Fahrerverhalten für komplette Fahrzyklen bezogen auf die Längsdynamik des Fahrzeugs und Torsionsbelastung im Fahrzeugantriebsstrang hinreichend genau abzubilden. Die Komplexität und der Umfang des Fahrermodells ist vergleichbar mit dem verwendeten Antriebsstrangmodell (gemessen an der Modellstruktur und des benötigten Programmcodes - jeweils ca. 400 Zeilen Programmcode). Die Struktur des aufgebauten Programmcodes und die verwendeten Parameter für die Simulationen sind in Anhang D dokumentiert.

Über das aufgebaute Fahrermodell ergibt sich eine starke Reduktion der Komplexität des Fahrerverhaltens, das komplett über die in Tabelle 16 angegebenen Kennwerte parametrisiert wird.

Tabelle 17: Zur Parametrisierung des Fahrermodells benötigte Kennwerte und Signale

Fahrerwunsch	Handlungsausführung
OGP-Profil (Zeitpunkte, neue Wunschgeschwindigkeit, Beschleunigungsdauer bei positiver Beschleunigung sowie maximale Bremsbeschleunigung bei Bremsvorgängen)	Aktualisierungsdauer ΔT und Beschleunigungsunschärfe σ_a bei Konstantfahrt

Durch die vorgenommene Reduktion auf den verwendeten Minimalsatz benötigter Kennwerte ergibt sich eine Vergleichbarkeit und Erklärbarkeit des Verhaltens verschiedener Fahrer und eine einfache Parametrisierung des Fahrermodells für verschiedene Fahrtbereiche (siehe den Aufbau erweiterter Fahrzyklen im folgenden Kapitel).

Mit den entwickelten Fahrermodellen für einzelne Manöver sowie für vollständige Fahrten ist eine geeignete Grundlage zur Bewertung von Bauteilbelastungen und Schädigungen gefunden. Die Auswirkungen bei der Anwendung der Fahrermodelle auf dieses Anwendungsgebiet werden im folgenden Kapitel ausführlicher betrachtet.

8 Ermittlung von Bauteillastkollektiven über Fahrersimulation

Die bisherigen Kapitel beschäftigen sich mit der grundlegenden Beschreibung des Fahrerverhaltens und geeigneten Methoden zur Herleitung von Fahrermodellen. Das nun folgende Kapitel behandelt die Übertragung und Anwendung der gefundenen Fahrermodelle auf die Lastkollektivermittlung. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf den bei der Anwendung der Fahrermodelle entstehenden Anforderungen und einer Beschreibung der erzielbaren Ergebnisse.

Die folgenden Inhalte können in der in Kapitel 5.5 beschriebenen Vorgehensweise nach der SPALTEN-Methodik den Bereichen *Einführen und Umsetzen* und *Nachbearbeiten und Lernen* zugeordnet werden: Sie beschreiben die bei erfolgreicher Implementierung erzielbaren Ergebnisse durch die Anwendung von Fahrermodellen zur Ermittlung von Bauteillastkollektiven (siehe Abbildung 76).

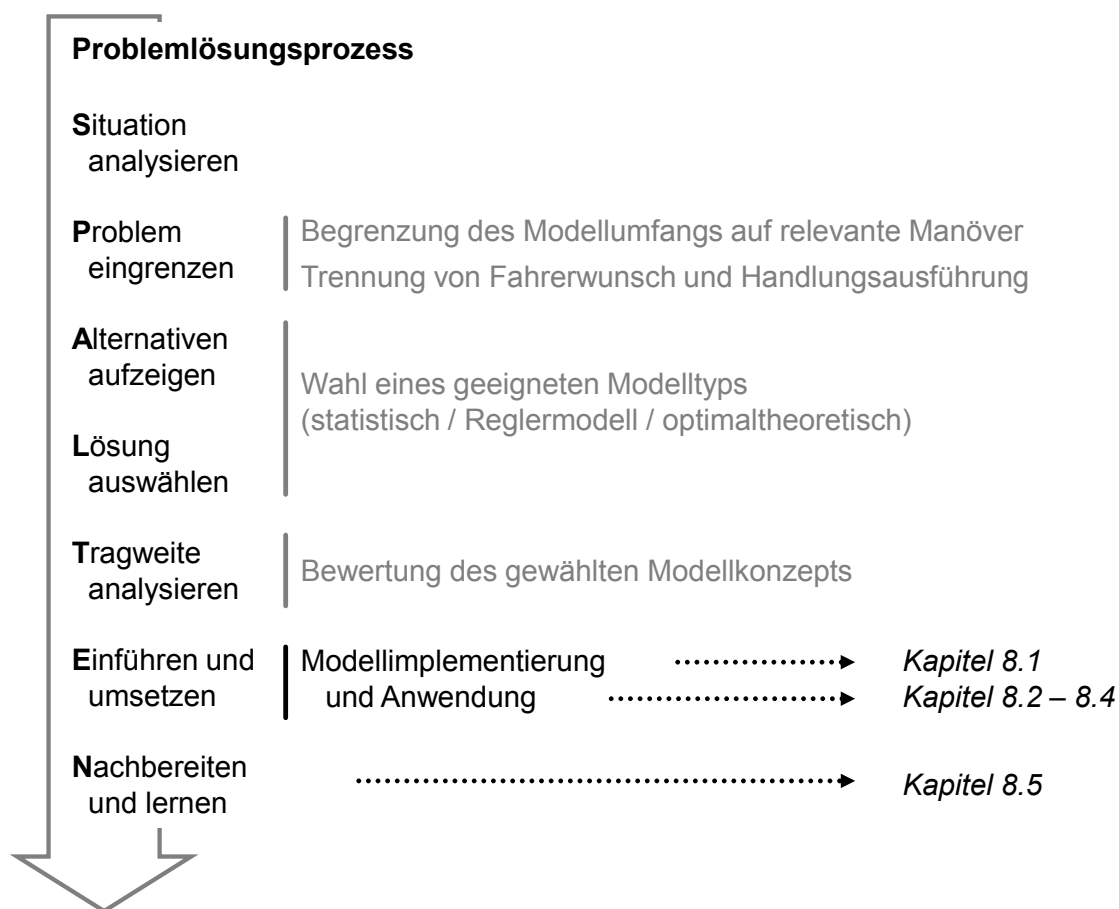


Abbildung 76: Einordnung der Inhalte in die entwickelte Methodik

Dieser Zielsetzung folgend wird zunächst die Kopplung der aufgebauten Fahrermodelle an gängige Simulationsumgebungen diskutiert. Anschließend wird die Vorgehensweise zur Bestimmung von Lastkollektiven über die Betrachtung einzelner Manöver sowie kompletter Fahrten beschrieben. Auf Basis der vorliegenden Implementierungen wird abschließend eine Erweiterung der Methodik hin zu einer allgemeinen Abbildung beliebiger Fahrzeugnutzung vorgenommen.

8.1 Implementierung von Fahrermodellen in Mehrkörpersimulationen

Zur Simulation von Bauteilbelastungen und Lastkollektiven wird ein geeignetes Modell des Antriebsstrangs im Fahrzeug benötigt. Dieses liefert – bei geeigneter Kopplung an Fahrzeug und Umwelt – Prognosen zur Belastung der einzelnen Bauteile.¹

Zur Durchführung umfangreicher Fahrtsimulationen ist eine Implementierung der entwickelten Fahrermodelle in gängigen Mehrkörpersimulationsumgebungen (MKS) sinnvoll.² Hierzu wird die Anbindung des Fahrermodells an die MKS-Umgebung als externe Programmbibliothek verfolgt (DLL unter Microsoft Windows). Das entwickelte Modul unterstützt dabei sowohl die Simulation von Beschleunigungsvorgängen über das KoGaS-Beschleunigungsmodell als auch die Simulation kompletter Fahrten.

Um eine flexible Anpassung des Modells durch den Anwender zu ermöglichen, werden Fahrerwunschfunktion und Zufallsfunktion über die MKS-Umgebung dem Fahrermodell bereitgestellt. Zusätzlich wird der aktuelle Fahrzeugzustand übergeben (Motordrehzahl, Fahrzeuggeschwindigkeit und Beschleunigung). Das Fahrermodell liefert darauf angepasste Ausgabewerte von Gaspedalstellung, Kupplungsmoment, Bremsmoment und gewähltem Gang (siehe Abbildung 77). Die so definierte Schnittstelle wird im Folgenden durchgängig beibehalten.

¹ siehe Kapitel 2.3 sowie Albers et al. 2013a

² Im vorangegangenen Kapitel wird diese Aufgabe über ein in Matlab als Zustandsform programmiertes Antriebsstrangmodell gelöst, das an das aufgebaute Fahrermodell angekoppelt ist. Während die einheitliche Modellierung in Matlab die Entwicklung und Validierung des Fahrermodells unterstützt, hat Matlab als interpretierte Programmiersprache deutliche Nachteile gegenüber in kompilierten Programmiersprachen aufgebauten MKS-Modellen. Im hier betrachteten Beispiel ermöglicht die verwendete MKS-Software Dyfasim eine etwa Faktor 10 schnellere Berechnung.

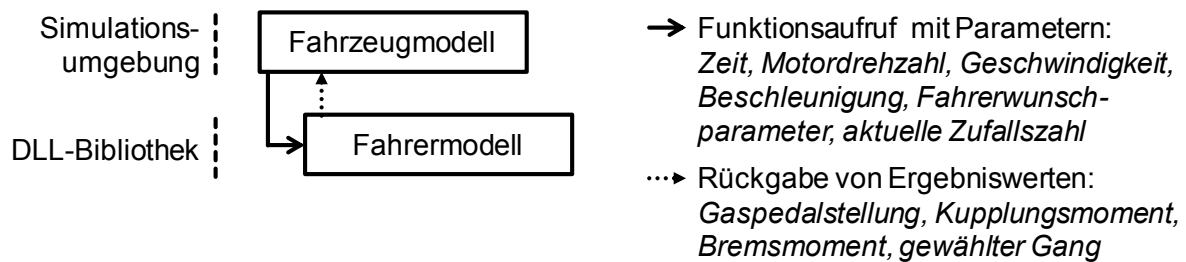


Abbildung 77: Einbindung des Fahrermodells als aufgerufene Bibliothek, siehe auch Anhang D

Als geeignete MKS-Umgebung wird die bei Schaeffler intern entwickelte MKS-Software Dyfasim (Dynamische Fahrzeugsimulation) verwendet. Das verwendete Konzept kann analog auch mit anderen MKS-Paketen wie beispielsweise AMESim, SimulationX oder Simscape angewendet werden. Das Fahrermodell ist als DLL-Funktion in Microsoft Visual Studio C++ implementiert und wird als kompilierte Programmbibliothek an die MKS-Umgebung angebunden. Die gewählte Struktur trägt dabei dem Ansatz des XiL-Frameworks Rechnung: Das entwickelte Fahrermodell ist neben der Kopplung an ein rein virtuelles Fahrzeugmodell auch für die Anbindung an physische Komponenten am Fahrzeug- oder Komponentenprüfstand geeignet. Somit stellt die Implementierung einen Anwendungsfall des Frameworks dar, bei dem das Fahrerverhalten nicht durch einen realen Fahrer, sondern durch ein virtuelles Fahrermodell abgebildet wird (vergleiche Kapitel 2.3.2). Die im Framework verwendeten Begriffe von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt sowie System in Development können auch in der aufgebauten Softwarestruktur zugeordnet werden und vereinheitlichen die Struktur des aufgebauten Modells (siehe Abbildung 78).

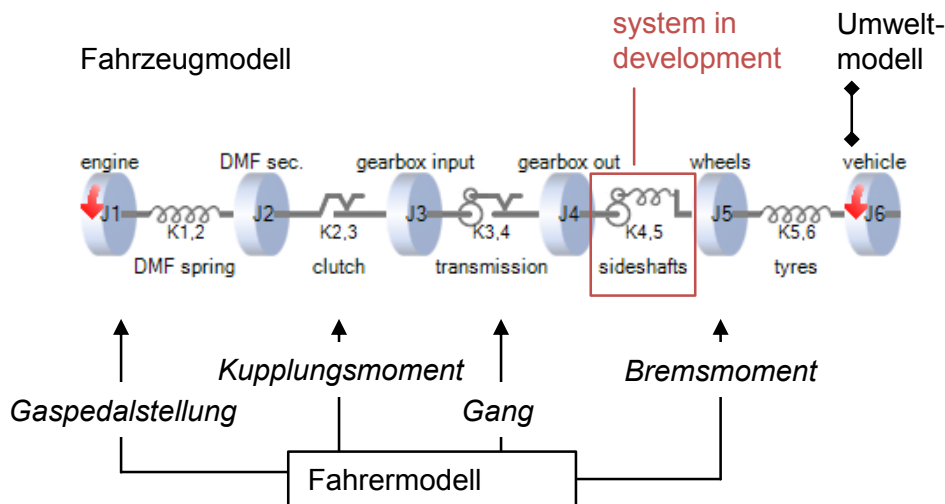


Abbildung 78: Einordnung des aufgebauten Fahrer- und Fahrzeugmodells in die Struktur des X-in-the-Loop-Frameworks

Mit der aufgebauten Struktur liegen Modelle zur Simulation von Beschleunigungsrampen über das KoGaS-Beschleunigungsmodell sowie der Simulation vollständiger Fahrten über das in Kapitel 7.2 aufgebaute Gesamtfahrzyklusmodell vor. Die Betrachtung von Lastkollektiven und Bauteilbelastungen erfolgt am Beispiel der Fahrzeugseitenwellen. Dabei wird in der Betrachtung ausschließlich die Längsdynamik des Fahrzeugs bewertet und der zusätzliche Einfluss von Kurvenfahrten nicht mit berücksichtigt.

Die Betrachtung wird exemplarisch an einem Opel Astra H (Kombi, Baujahr 2004) mit 1,7l Dieselmotor (4 Zylinder, 240 Nm, 74 kW) und einem 5-Gang-Handschaltgetriebe durchgeführt. Für das Fahrzeug liegen Fahrtmessungen mit der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Smartphone-Messtechnik (siehe Kapitel 6.1) sowie im industriellen Umfeld durchgeführte Lastkollektivmessungen für mehrere Fahrer vor. Die Dynamik des Fahrzeugantriebsstrang wird über ein ebenfalls bereits vorliegendes, mit Fahrzeugmessungen abgeglichenes Simulationsmodell in Dyfasim abgebildet.

Die Daten des betrachteten Fahrzeugs und die Struktur des zugehörigen MKS-Modells sind in Abbildung 79 angegeben. Die für das Fahrzeug vorliegenden Fahrt Daten, die sowohl aus Automotive-Lastkollektivmessungen und aus den im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Messdaten stammen, werden in Tabelle 18 aufgelistet. Bei den betrachteten Automotive-Lastkollektivmessungen handelt es sich um Messungen zur Erfassung von Bauteillastkollektiven, die auf einer vorgegebenen Fahrtstrecke im realen Straßenverkehr mit mehreren realen Fahrern durchgeführt werden.

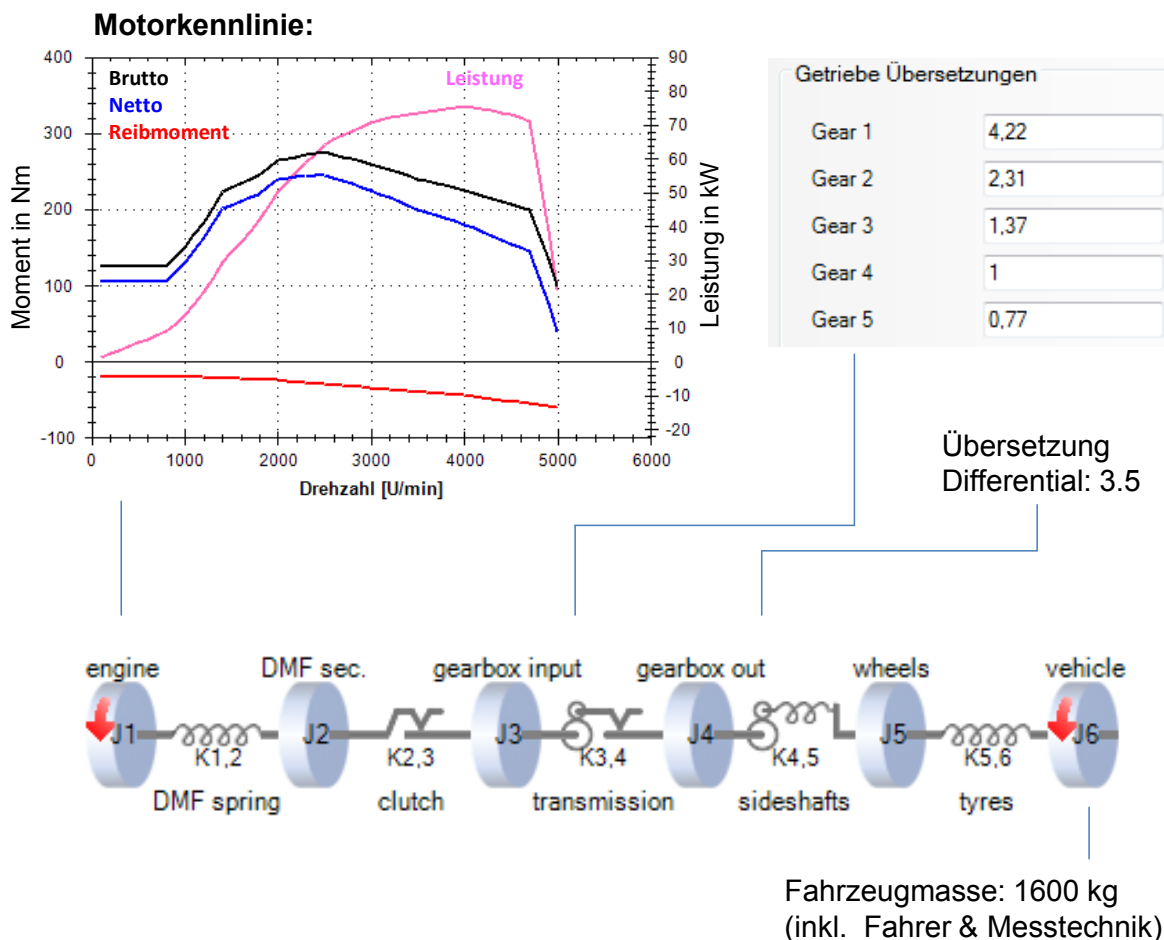


Abbildung 79: Darstellung der vom Fahrzeugmodell verwendeten Parameter und des verwendeten Antriebsstrangmodells

Tabelle 18: Überblick über die für das Fahrzeug vorliegenden Messdaten. Die Lastkollektiv-Messungen wurden bei Schaeffler mit mehreren Fahrern im realen Straßenverkehr erhoben, wobei Fahrer jeweils angewiesen sind, ihren normalen Fahrstil für die Messungen beizubehalten.

	Stadtverkehr	Landstraße	Autobahn
Lastkollektiv Fahrer 1:	10.6 km	38.9 km	36.9 km
Lastkollektiv Fahrer 2:	13.0 km	38.8 km	37.0 km
Lastkollektiv Fahrer 3:	7.7 km	38.9 km	36.9 km
Lastkollektiv Fahrer 4:	11.7 km	45.6 km	37.5 km
Fahrtdatenbank (siehe Kapitel 6)	722 km (1 Fahrer)		

8.2 Ermittlung von Lastkollektiven für einzelne Fahrmanöver

Mit der vorliegenden Anbindung des KoGaS-Beschleunigungsmodells an eine Mehrkörpersimulationsumgebung kann die Ermittlung von Lastkollektiven für einzelne Fahrmanöver beschrieben und diskutiert werden.

Das Vorgehen zur Ermittlung des Bauteillastkollektivs ist in Abbildung 80 dargestellt. Über das KoGaS-Beschleunigungsmodell und die MKS-Simulation wird ein Kennfeld berechnet, welches alle im Rahmen des Modells denkbaren Beschleunigungsvorgänge abbildet. Die Rückführung auf die in den Fahrten auftretenden Beschleunigungen erfolgt anschließend über einen Abgleich des Beschleunigungsmodells mit dem Fahrerwunsch, der in Form einer Häufigkeitsverteilung abgebildet wird. Statt einer virtuellen Ermittlung des Manöverkennfelds kann auch eine Ermittlung des Kennfelds am physischen System Fahrzeug durchgeführt werden, so dass die im XiL-Framework angestrebte Kopplung virtueller und physischer Erprobung unterstützt wird.

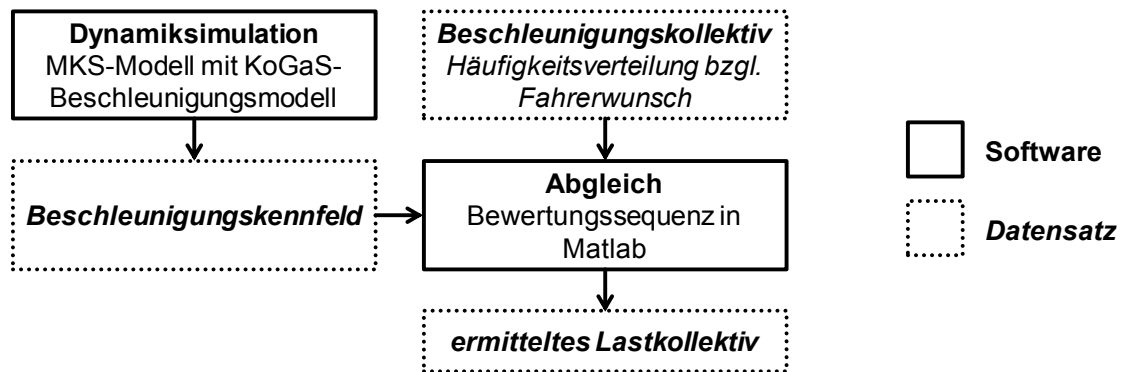


Abbildung 80: Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Bauteilbelastung über das KoGaS-Beschleunigungsmodell (siehe auch Anhang D)

Zur Ermittlung geeigneter Lastdaten ist die Bewertung der Anzahl und des Parameterbereichs für Beschleunigungsvorgänge während der Gesamttätigkeit Autofahren notwendig. Hierzu wird der Algorithmus, der bereits zur Validierung des KoGas-Beschleunigungsmodells in Kapitel 7.1.6 verwendet wurde, zur Bewertung der Beschleunigungshäufigkeit und –parameter für die vorliegenden Automotive-Lastkollektivmessungen herangezogen (vergleiche Tabelle 18).

Unter diesen Randbedingungen kann für die für verschiedene Fahrer vorliegenden Fahrdaten eine Häufigkeits- und Parameterverteilung von Beschleunigungsvorgängen ermittelt werden. Die für die betrachteten Fahrer aus den Fahrtemessungen ermittelten Parameter sind in Abbildung 81 dargestellt.

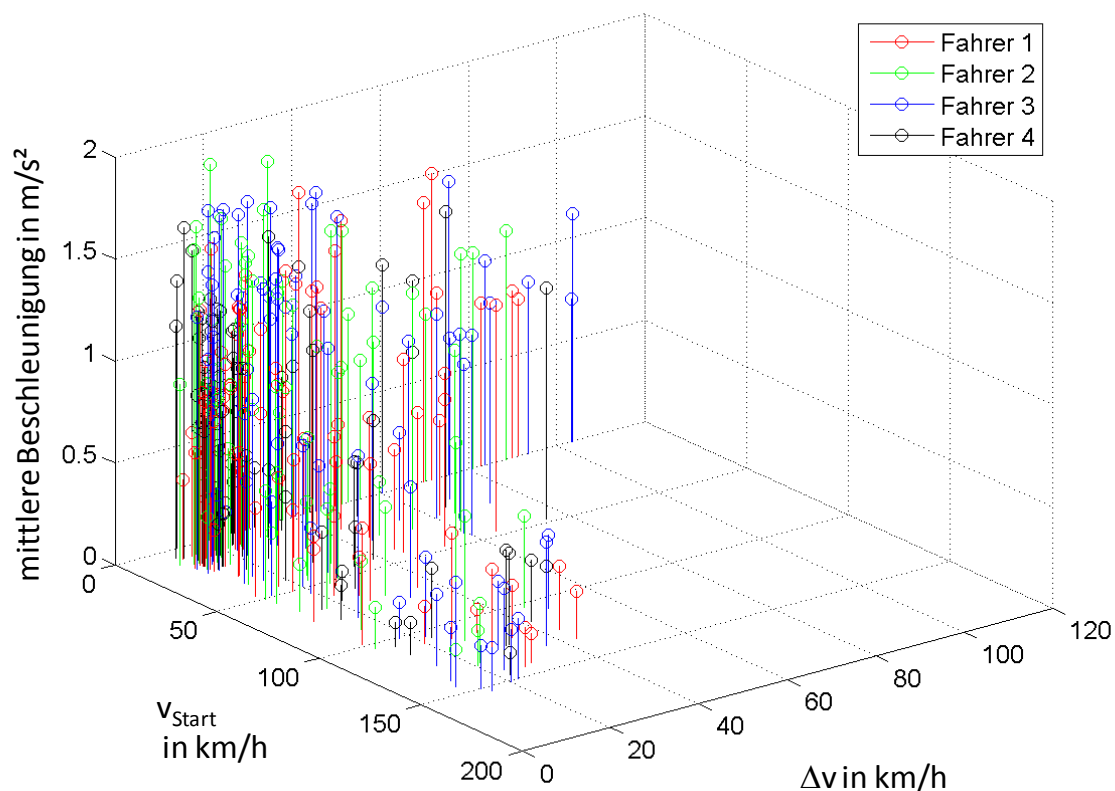


Abbildung 81: Visualisierung aller Beschleunigungsvorgänge für die vier betrachteten Fahrer (vergleiche Tabelle 18). Dargestellt sind jeweils der hinterlegte Wert sowie die Projektion auf die X-Y-Ebene.

Die über diese Methode ermittelten Belastungen der Seitenwellen werden in Abbildung 82 dargestellt, wobei als Vergleichsgröße die Häufigkeitsverteilung des Moments in den Seitenwellen auf einen Fahrkilometer normiert wird. Eine Validierung des Modells erfolgt über die vorliegenden Fahrtmessungen, für die das über die Seitenwellen übertragene Moment aus den vorliegenden Messdaten ermittelt werden kann (siehe Abbildung 83). Für die Bewertung der Bauteilbelastung ist der Bereich hoher Momente relevant, was die Reduzierung des Fahrerverhaltens auf das Manöver Beschleunigen begründet. Im für die Bauteilbelastung potentiell relevanten Wertebereich größer 500 Nm ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Bauteilbelastungen.

Die gewählte Darstellung stellt eine kompakte Abbildung der Bauteilbelastungen dar. Ein Vergleich ermittelter Daten erfolgt entweder durch die Darstellung mehrerer Varianten im gleichen Diagramm (hier für mehrere Fahrer) oder durch den Vergleich mehrerer Diagramme (hier der Vergleich zwischen Simulation und Messdaten).

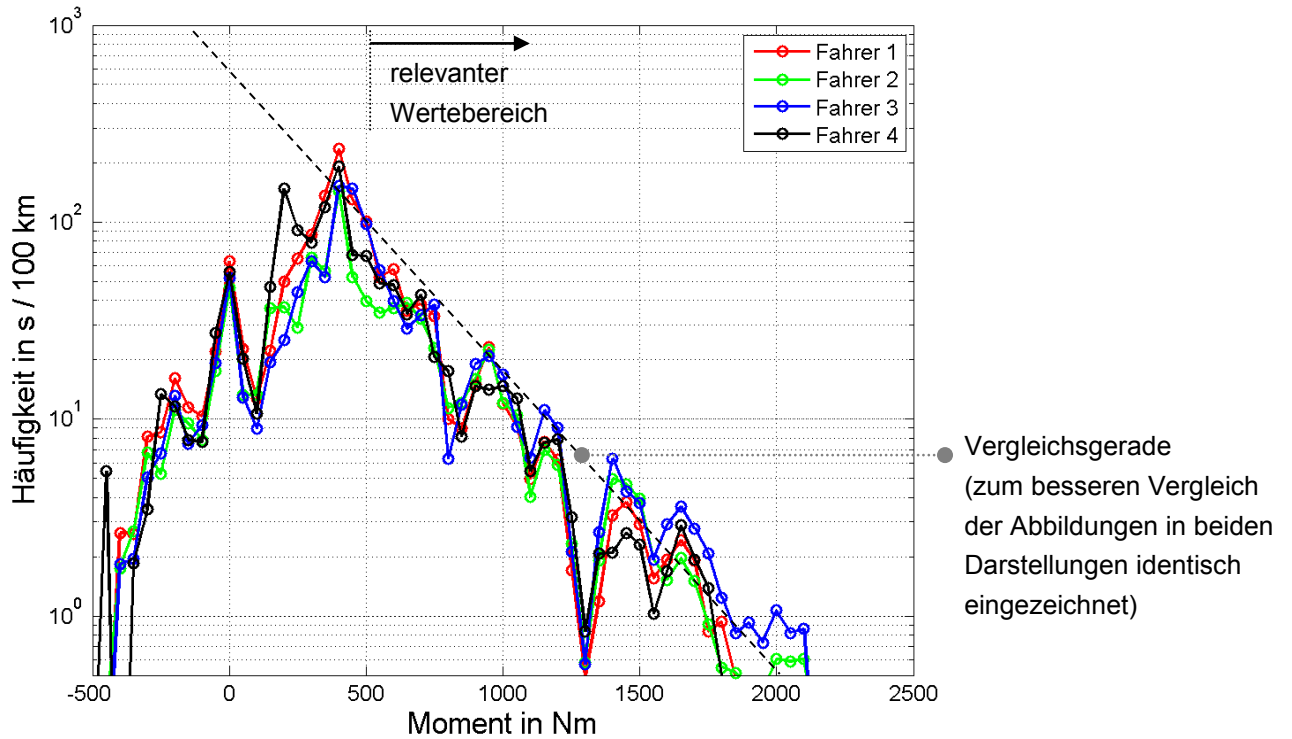


Abbildung 82: Häufigkeitsverteilung des Moments an den Fahrzeugseitenwellen über alle betrachteten Beschleunigungsvorgänge für die vier verschiedenen Fahrer

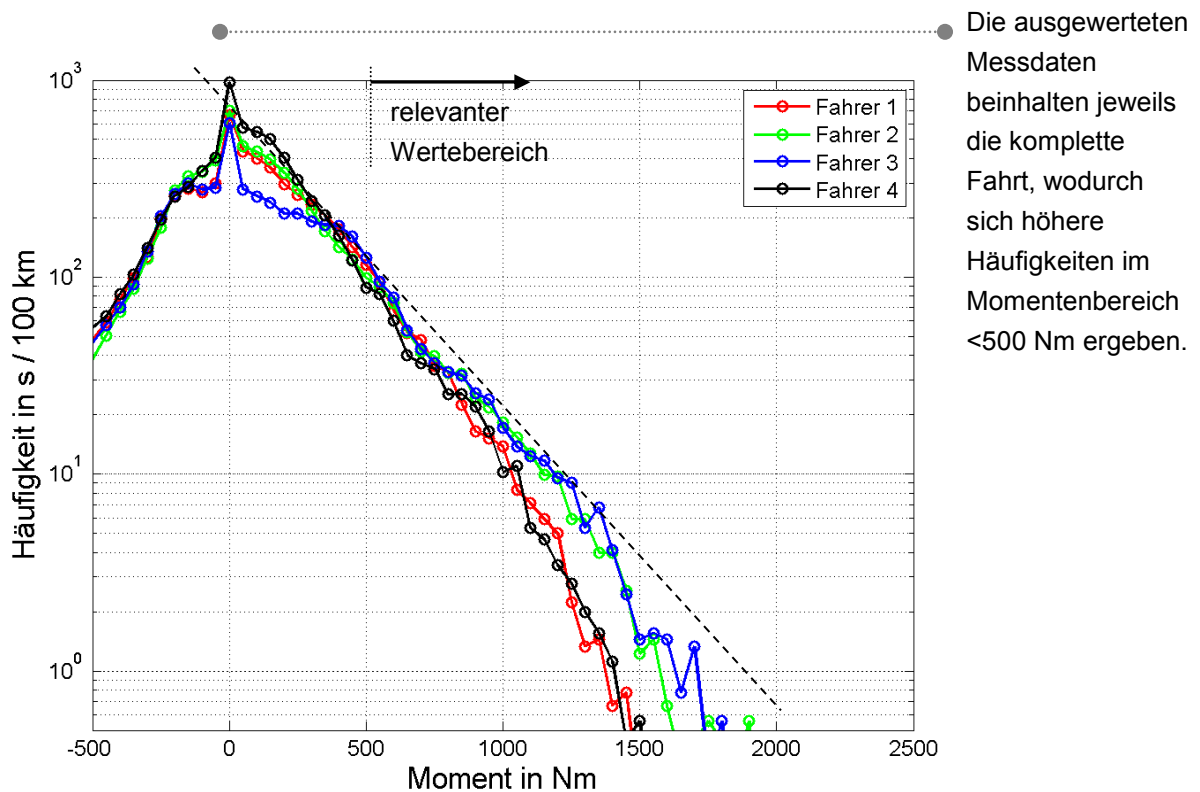


Abbildung 83: Aus den Fahrtmessungen ermittelte Häufigkeitsverteilungen für das von den Seitenwellen übertragene Moment.

Die betrachteten Lastkollektivmessungen weisen für die vier betrachteten Fahrer sehr ähnliche Belastungsprofile der Seitenwellen auf. Lediglich im Bereich hoher Momente sind leichte Unterschiede zwischen den Fahrern erkennbar. Zum besseren Vergleich der Diagramme miteinander ist in den Abbildungen sowie allen noch folgenden Auswertungen zur Häufigkeitsverteilung in den Seitenwellen jeweils eine Vergleichsgerade eingezeichnet.

Somit kann festgehalten werden, dass die vorgestellte Methode zur Anwendung des KoGaS-Beschleunigungsmodells zur Ermittlung von Lastkollektiven für die Fahrzeugseitenwellen valide Ergebnisse liefert. Die Unterschiede zwischen gemessener und simulierter Momentenverteilung (beispielsweise der Einbruch in den Simulationsergebnissen bei 1300 Nm) können durch die Abbildung als Beschleunigungskennfeld mit der dadurch entstehenden Diskretisierung erklärt werden und werden als hinnehmbar eingestuft. Hiermit erscheint auch die Reduzierung der Lastkollektive auf das Manöver Beschleunigen gerechtfertigt.

Für die bisher betrachteten und zur Validierung des Modells verwendeten Lastkollektivmessungen ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen den vier erfassten Fahrern. Diese Messungen wurden im Rahmen von Fahrzeugerprobungen auf einer vorgegebenen Fahrtstrecke, jedoch mit realem Umgebungsverkehr, ermittelt (vergleiche Tabelle 18).

Ein deutlich differenziertes Bild ergibt sich, wenn statt der bisher betrachteten Lastkollektivmessungen die im Rahmen der Fahrtdatenbank erhobenen Fahrprofile berücksichtigt werden. Dabei werden die für die Fahrer erfassten Fahrdaten jeweils in ein Beschleunigungskollektiv umgewandelt, das den im Rahmen des KoGaS-Beschleunigungsmodells berücksichtigten Fahrerwunsch abbildet. Die über die oben beschriebene Berechnungsmethode für die einzelnen Fahrer ermittelten Häufigkeitsverteilungen für das Moment an den Fahrzeugseitenwellen sind in Abbildung 84 dargestellt. Die Betrachtung ist auf Fahrer begrenzt, deren Fahrzeugnutzung für den betrachteten Mittelklasse-PKW relevant ist (keine Berücksichtigung von Fahrern mit deutlich abweichenden Fahrzeugklassen wie beispielsweise Transportern oder sehr sportlichen Fahrzeugen) und berücksichtigt nur Fahrer, für die mindestens 200 km Fahrtmessung vorliegen.

Die real erfassten Fahrer weisen fast durchgängig eine geringere Bauteilbelastung auf als die Fahrer der Lastkollektivmessungen. Nur für einen der untersuchten Fahrer (F4108521417) liegt mit der für ihn ermittelten Belastung im Bereich der bisher untersuchten Lastkollektivmessungen. Die oben betrachteten Lastkollektivmessungen bilden also vor dem Hintergrund der Menge vorliegender Fahrdaten durchgängig die Belastungen für kritische Fahrer ab, stellen jedoch keine Abbildung der für reale Fahrer zu erwartenden Lastkollektivverteilungen dar.

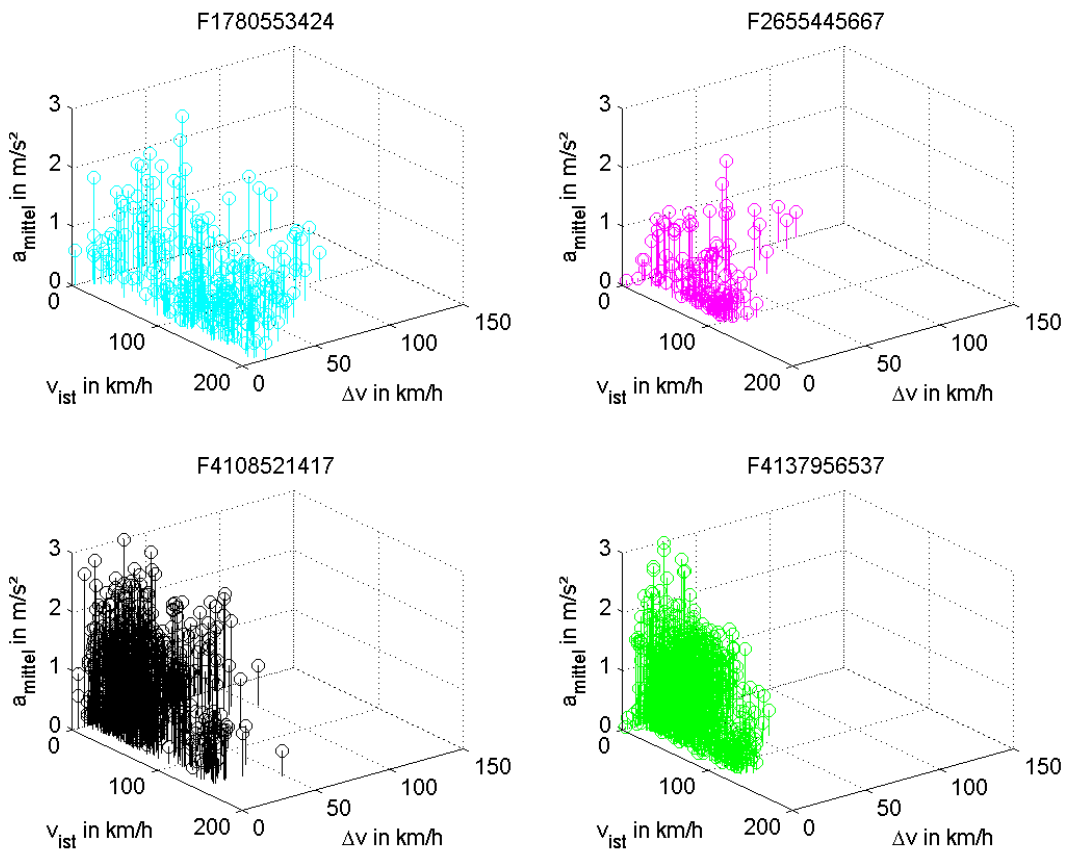
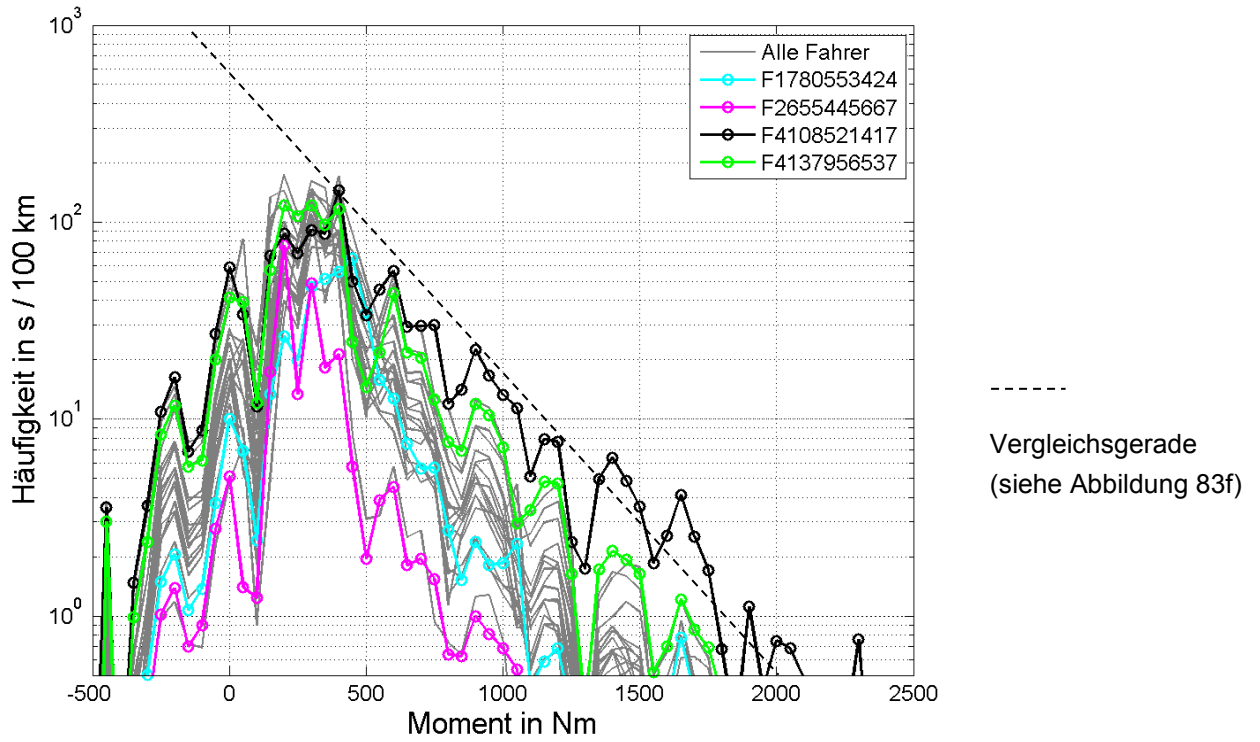


Abbildung 84: Bewertung der Bauteilbelastung der Seitenwellen bei Beschleunigungsvorgängen für verschiedene Fahrer mit Hervorhebung einzelner Fahrer

Die Anwendung des entwickelten Fahrermodells ermöglicht somit die *zeiteffiziente, rechnerische Ermittlung von Bauteilbelastungen unter Berücksichtigung verschiedener Fahrer, Fahrstile und Streckennutzungen*.¹ Im Gegensatz zur direkten Durchführung von Lastkollektivmessungen ermöglicht diese Herangehensweise eine deutliche Vergrößerung des Spektrums unterschiedlicher Fahrer und Fahrstile und kann schon zu frühen Zeitpunkten der Produktentwicklung, zu denen noch kein realer Prototyp vorliegt, angewendet werden.

8.3 Bestimmung von Lastkollektiven für Gesamtfahrtsimulationen

Die Simulation kompletter Fahrten erfordert eine umfangreichere Anbindung zwischen Fahrermodell und Antriebsstrangmodell. Die in Abbildung 85 beschriebene Kopplung zeigt die hierzu aufgebaute Programmstruktur zur Simulation kompletter Fahrten.

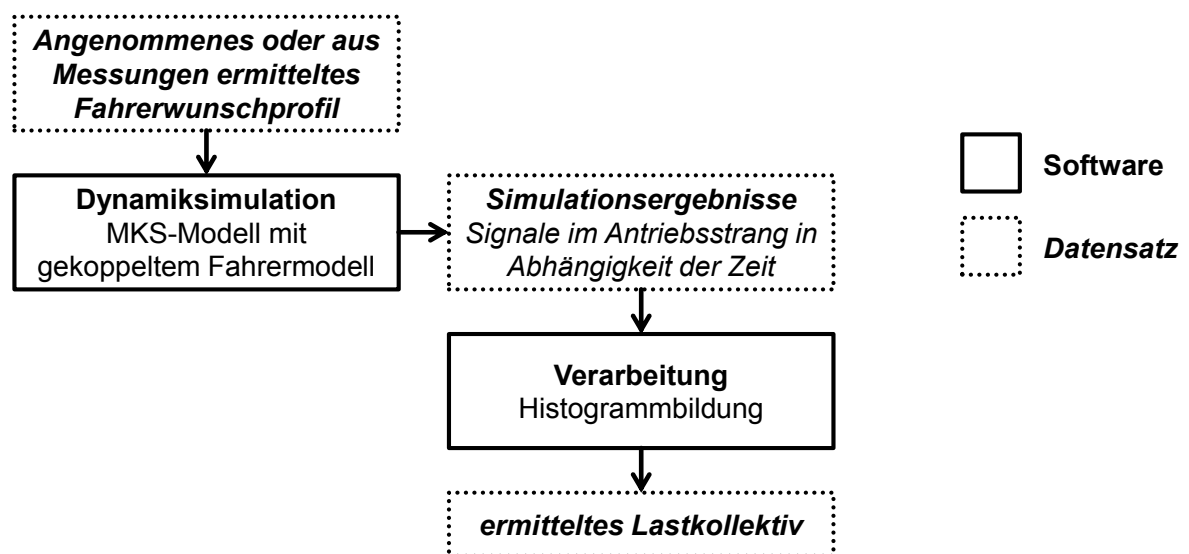


Abbildung 85: Berechnungsverfahren zur Ermittlung von Lastkollektiven über Gesamtfahrtsimulationen

¹ Der Begriff „zeiteffizient“ kann wie folgt quantifiziert werden: Im hier betrachteten Beispiel erfolgt die Ermittlung des Beschleunigungskennfelds in weniger als 30 Minuten Berechnungsdauer. Die Rechenoperationen für die anschließende Bewertung der Häufigkeitsverteilung benötigen für die betrachteten Fahrer jeweils weniger als eine Sekunde Rechendauer.

Im Gegensatz zur oben verfolgten Abbildung der Fahrzeugdynamik über ein ermitteltes Kennfeld, welches das Spektrum der denkbaren Fahrerhandlungen beinhaltet, erfolgt die Simulation stattdessen über eine durchgängig gekoppelte Berechnung von Fahrer- und Fahrzeugmodell, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Die Simulation liefert eine detaillierte Beschreibung der Dynamik im Antriebsstrang während der Fahrt. Eine Beschreibung der Berechnungsergebnisse erfolgt in Abbildung 86, ein umfangreicherer Auszug aus den simulierten Fahrzyklen ist in Abbildung 87 dargestellt. Dabei beinhaltet die Darstellung der Fahrtgeschwindigkeit auch eine Visualisierung der vorgegebenen Fahrerwunschfunktion (vergleiche Kapitel 7.2.1), die im MKS-Modell hinterlegt ist. Das Moment der Seitenwellen ist in der Darstellung um die Differentialübersetzung reduziert (Übersetzungsfaktor 3.5), um eine ähnliche Skala wie Kupplungs- und Motormoment zu erreichen.

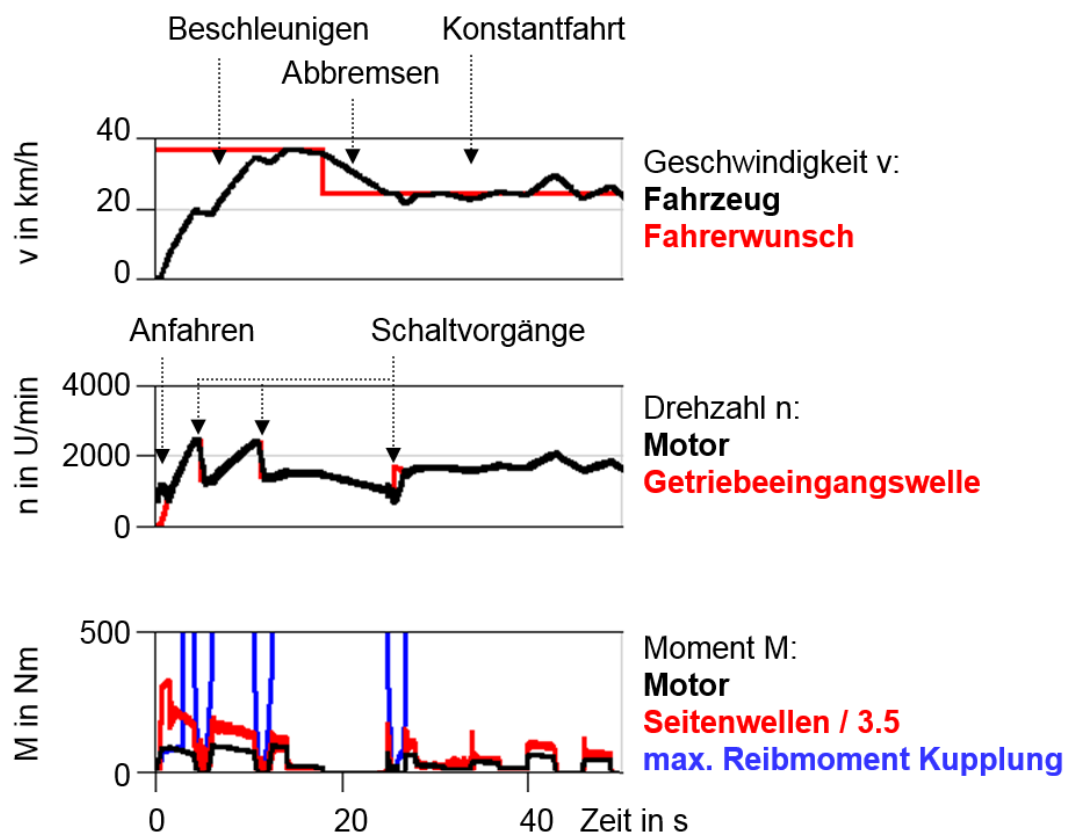


Abbildung 86: Auszug aus den durchgeführten Fahrtsimulationen. Dargestellt sind der für die Simulation vorgegebene Fahrerwunsch (als Geschwindigkeitsprofil) und die Ausgabe des Simulationsmodells als Geschwindigkeits-, Drehzahl- und Momentensignale. Die einzelnen Manöver sind zusätzlich markiert (gepunktete Pfeile).

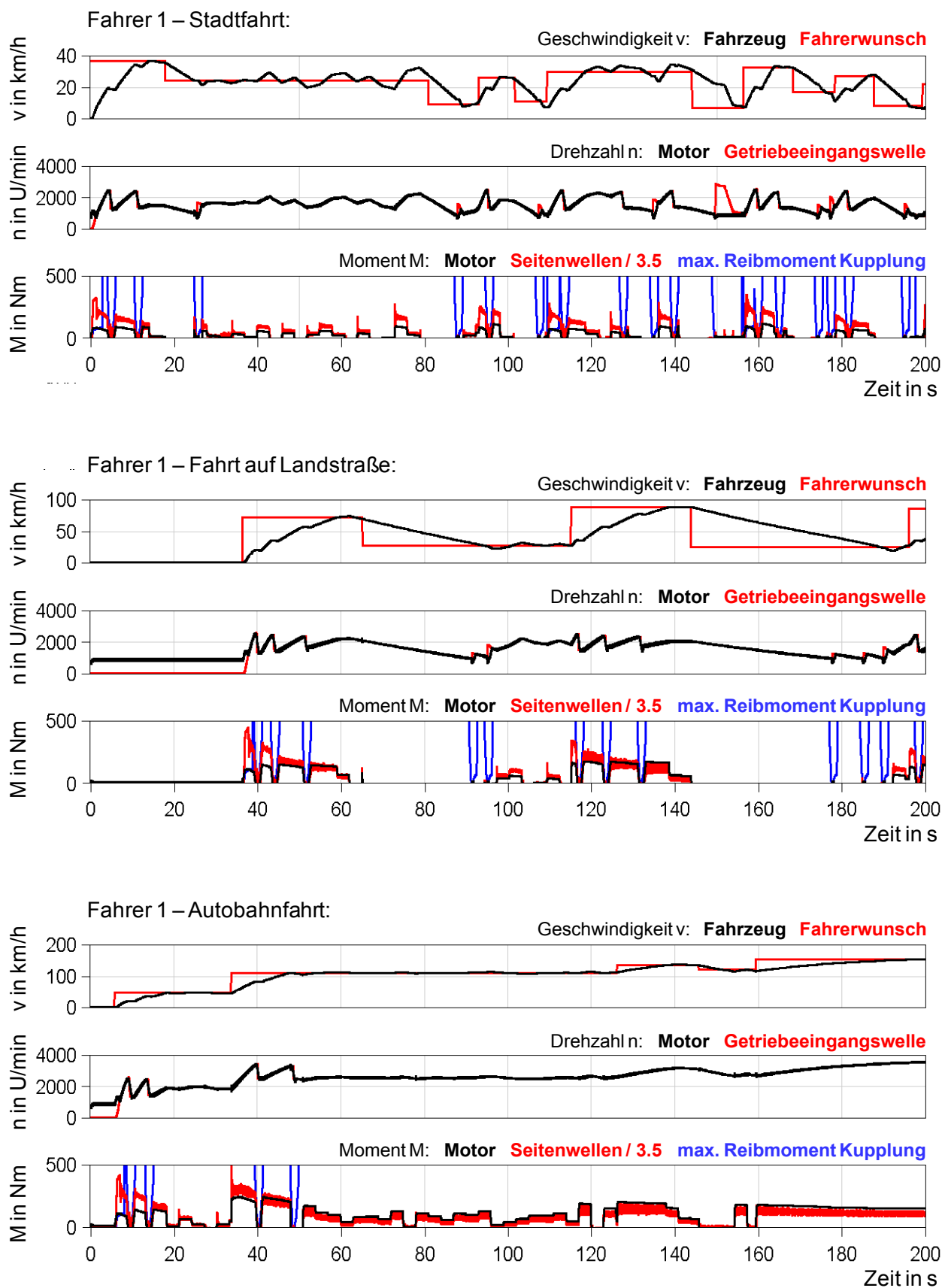


Abbildung 87: Darstellung eines Auszugs der Simulationsergebnisse für Fahrer 1

Die in der Simulation ermittelten dynamischen Lasten können über geeignete statistische Methoden wie Histogrammauswertungen oder das Rainflow-Verfahren in Lastkollektiven zusammengefasst werden. Im Folgenden werden als exemplarische Ergebnisgrößen das Drehmoment in den Fahrzeugseitenwellen, Histogramme für den Verbrennungsmotorbetriebsbereich und der im verbauten Zweimassenschwungrad (ZMS) zurückgelegte Lagerweg betrachtet.

Die in Abbildung 88 dargestellte Häufigkeitsverteilung des übertragenen Moments an den Seitenwellen stellt eine Ergänzung zu den im vorangegangenen Abschnitt vorgenommenen Auswertungen dar. Die Fahrtsimulation zeigt eine insgesamt gute Übereinstimmung zu den gemessenen Seitenwellenbelastungen (vergleiche Abbildung 82).

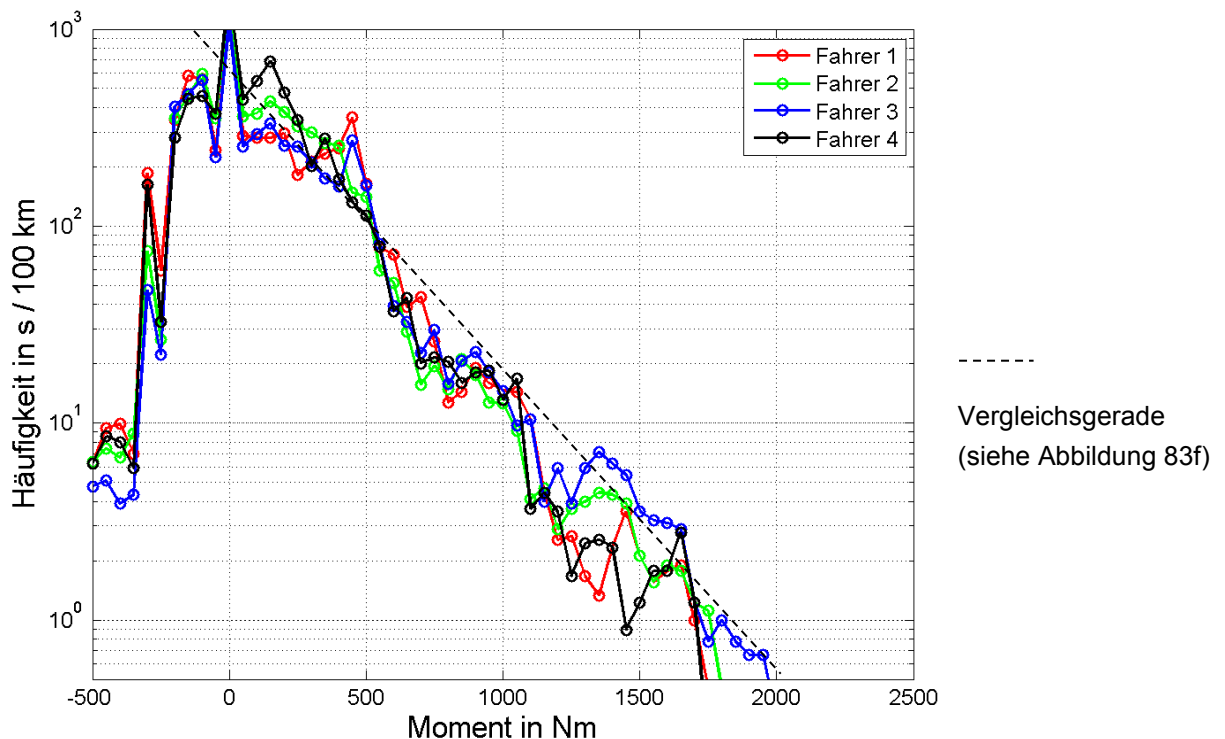


Abbildung 88: Aus der Fahrtzyklussimulation ermittelte Häufigkeitsverteilungen für das von den Seitenwellen übertragene Moment.

Eine weitere Bewertung der erzielten Ergebnisse erfolgt über die Darstellung von Histogrammen für den Verbrennungsmotorbetriebsbereich. Die Darstellungsform wird anhand einer gemessenen Fahrt für den untersuchten Dieselmotor in Abbildung 89 beschrieben.

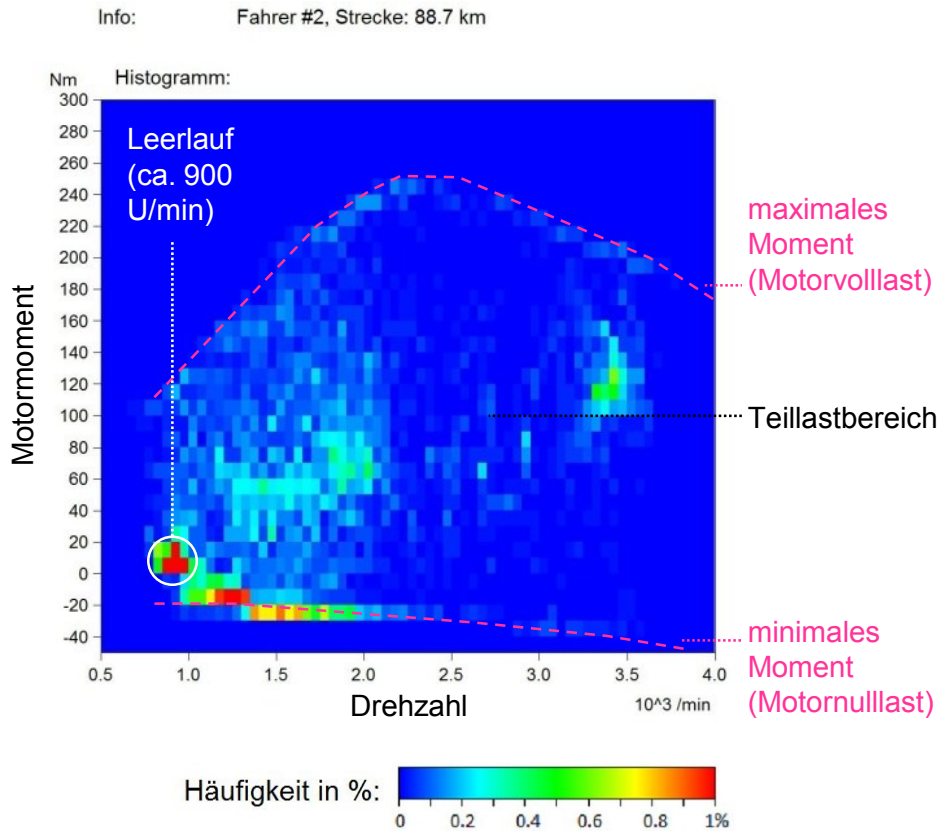


Abbildung 89: Betriebsbereich des Verbrennungsmotors als Histogrammdarstellung. Anhand der Häufigkeitsdarstellung kann der durch die Fahrerhandlungen gewählte Drehzahl- und Momentenbereich visualisiert werden.

Die Betrachtung des Motorbetriebsbereichs ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen den verschiedenen Fahrern sowie zwischen gemessenem und simuliertem Verhalten. Dieser Vergleich wird in Abbildung 90 dargestellt und zeigt für das betrachtete Modell eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten. Unterschiede ergeben sich in der Abbildung des Motornulllastbereichs, die dem verwendeten MKS-Modell zugeschrieben werden können.

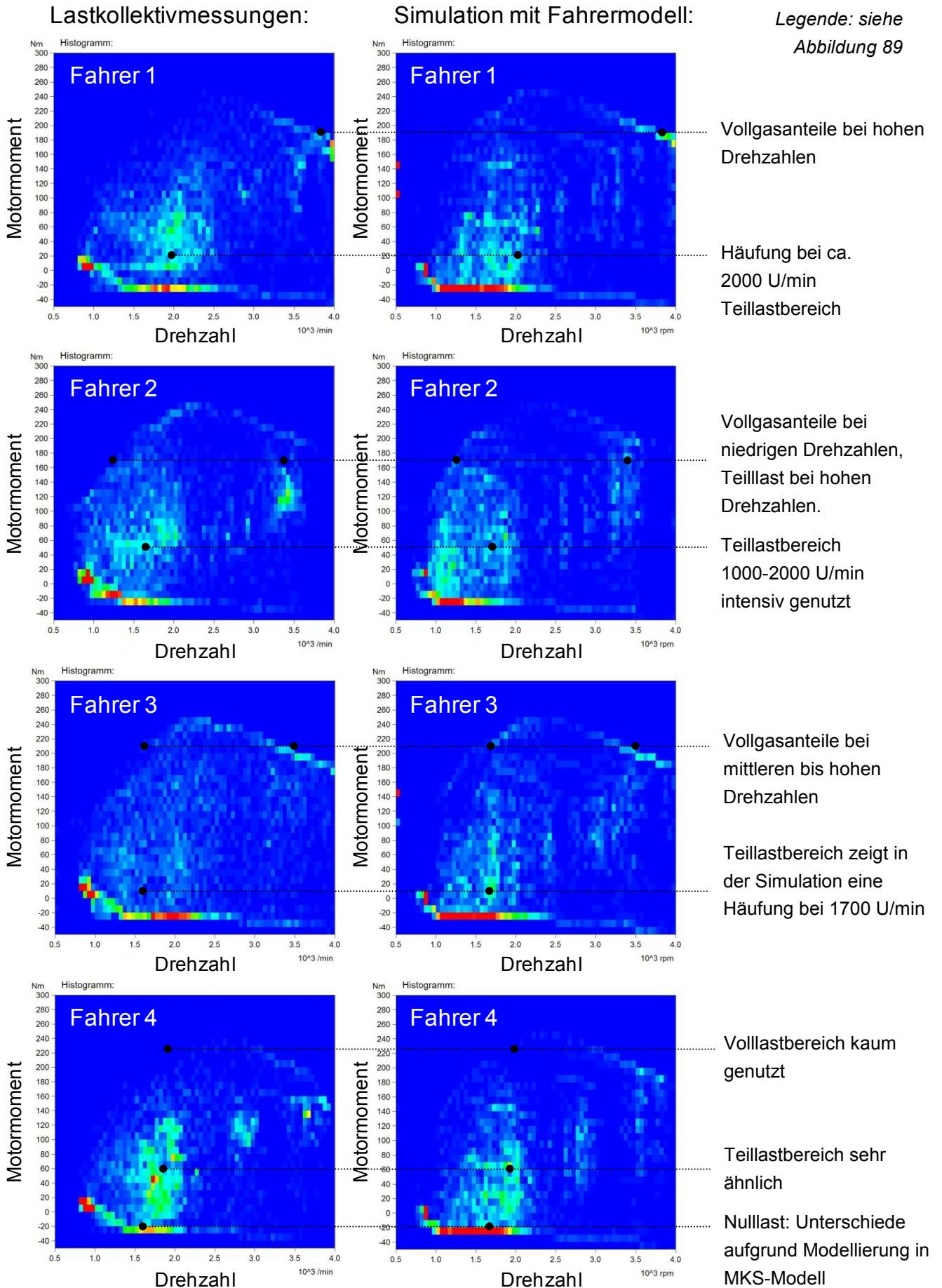


Abbildung 90: Vergleich von gemessenen und simulierten Motorhistogrammen

Da das oben betrachtete Moment in den Seitenwellen auch über die Reduzierung der Betrachtung auf einen Teil der Gesamtfahrt gut bewertet werden kann (siehe Abschnitt 8.2) bietet sich die Betrachtung zusätzlicher Bauteilbelastungskennwerte zur Validierung des Modells an. Hierzu wird der Reibweg des Gleitlagers für das im Fahrzeug verbaute ZMS ausgewertet, für den sich eine deutlich gleichmäßigere Verteilung über die komplette Fahrt ergibt (siehe Abbildung 91).

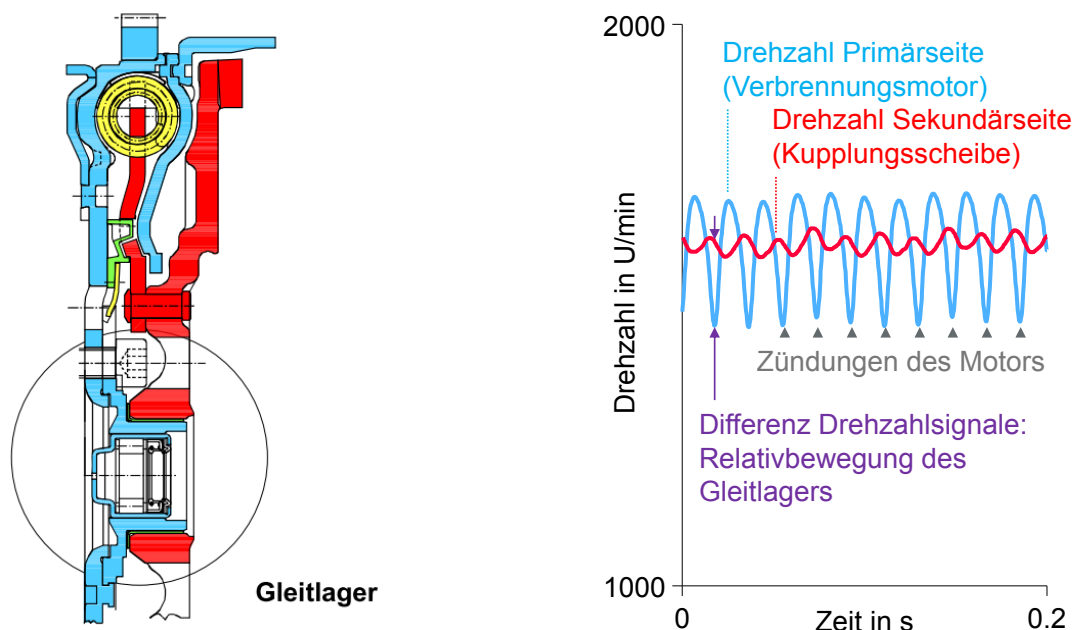


Abbildung 91: Abbildung eines Zweimassenschwungrads (ZMS) mit Gleitlager (links)¹ und Auszug aus den Fahrtmessdaten (rechts, Betrieb des Dieselmotors bei 1600 U/min). Das Zweimassenschwungrad wirkt als mechanischer Tiefpass und isoliert das Getriebe von den Drehzahlschwankungen des Verbrennungsmotors. Die Relativbewegungen der beiden Seiten zueinander belasten das verbaute Gleitlager.

Ein Überblick über die während der Fahrt stattfindende Lagerbelastung wird in Abbildung 92 gegeben. Dabei beinhaltet die Darstellung neben der simulierten Antriebsstrangdynamik auch die Messdaten aus der Fahrtmessung. Dieser Vergleich zeigt – ähnlich wie schon die Betrachtung in Kapitel 7.2.5 – kein direkt deckungsgleiches Verhalten von Messung und Simulation, da das menschliche Verhalten nicht vollständig im Simulationsmodell abgebildet wird (siehe Hypothese H3 in Kapitel 3.2). Stattdessen ergibt sich eine *statistische Vergleichbarkeit* des auftretenden Verhaltens, nach der die Bandbreite realer vorkommender menschlicher Handlungen auch in der Simulation abgebildet wird.

¹ Aus Reik et al. 1998

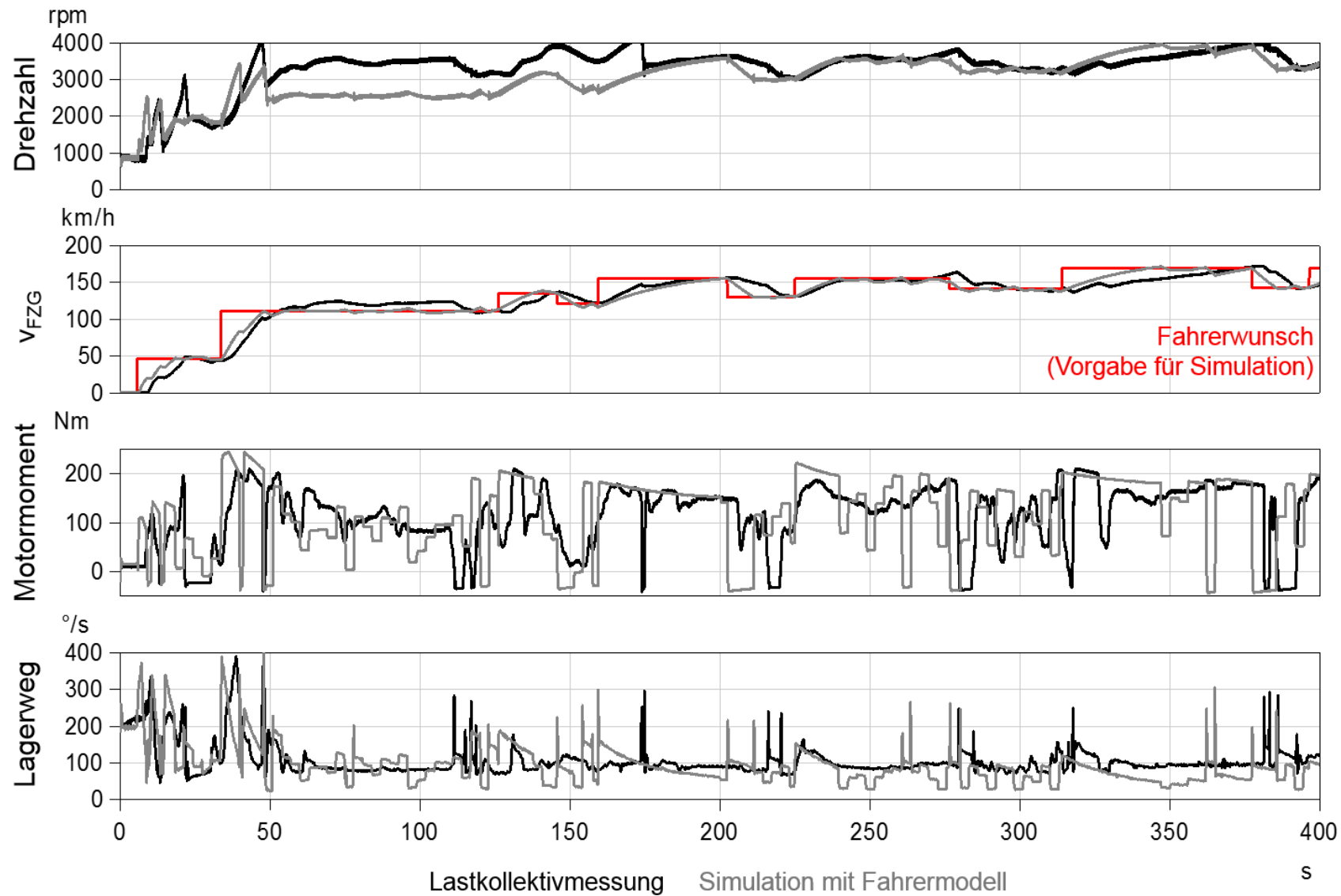


Abbildung 92: Auszug aus den Fahrtsimulationen mit einem Vergleich zwischen gemessener und simulierter Fahrt (Autobahnfahrt Fahrer 1, vergleiche Tabelle 18 auf Seite 134)

Als geeignete Kenngröße zur Bewertung der ZMS-Lagerbelastung wird an dieser Stelle der auftretende Lagerweg (aufsummierter Schwingwinkel zwischen Primär- und Sekundärseite) pro Fahrkilometer für die verschiedenen Fahrer und Fahrtstrecken betrachtet. Die ermittelten Kennwerte werden in Abbildung 93 dargestellt und zeigen wiederum eine gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Werten.

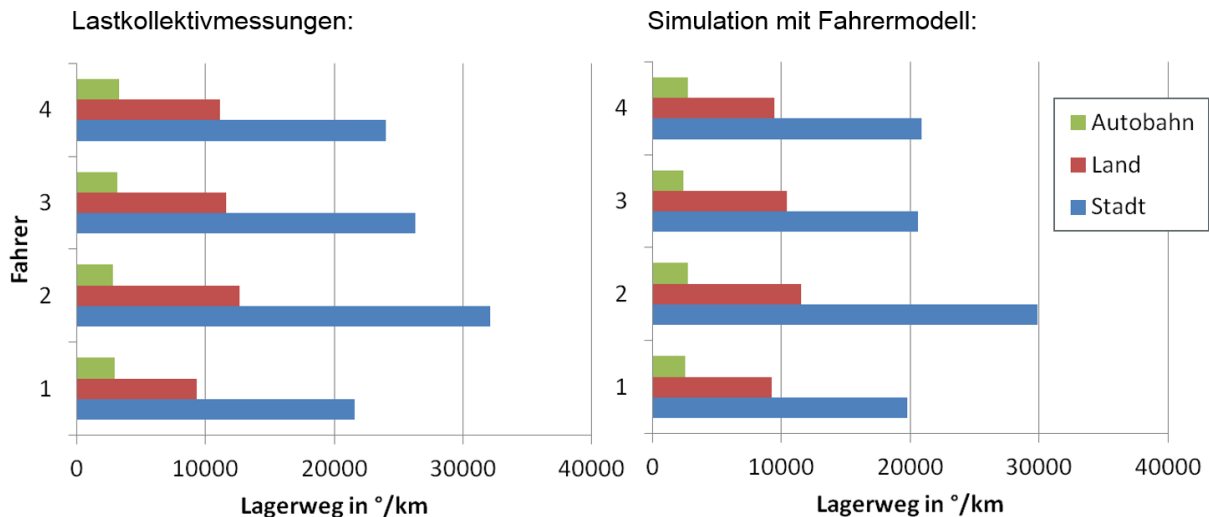


Abbildung 93: Gemessener und simulierter Weg des Gleitlagers im Zweimassenschwungrad

Insgesamt kann eine gute Eignung des verwendeten Fahrermodells zur Abbildung von Fahrt- und Belastungsgrößen wie Momentenverteilungen, Reibwegen, dem Betriebsbereich des Verbrennungsmotors und anderen Belastungsgrößen festgehalten werden. Die an dieser Stelle vorgenommene Bewertung ersetzt jedoch nicht die individuelle Bewertung und eventuelle Anpassung des Fahrermodells bei der Betrachtung anderer Bauteilbelastungen und Kennwerte (siehe Hypothese H1 in Kapitel 3.2).

Damit ermöglicht das vorliegende Fahrermodell die durchgängige Simulation von Fahrten mit Abbildung der Antriebsstrangdynamik, für die jedoch Referenzmessungen zur Ermittlung der jeweiligen Fahrerwunschfunktion notwendig sind. Als Alternative zur diesem Rückgriff auf gemessene Fahrten bietet sich eine synthetische Generierung von Fahrerwunschprofilen an, die im folgenden Abschnitt behandelt wird.

8.4 Erweiterung des Fahrermodells auf allgemeine Fahrtstrecken

Die Simulation von Bauteillastkollektiven erfordert über die Vorgabe geeigneter Randbedingungen. Wie in Abbildung 94 dargestellt beruht die Simulation auf dem Vorliegen geeigneter Daten, die Fahrerwunsch, Fahrtstrecke und Zustand des Fahrzeugs beschreiben (vergleiche auch Abbildung 85).

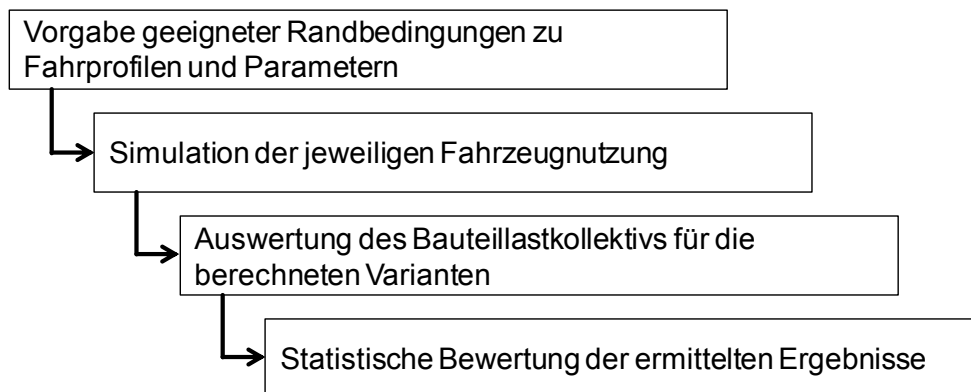


Abbildung 94: Schematische Darstellung des Prozesses zur Ermittlung von Bauteillastkollektiven

Für einzelne Fahrten und bekannte Fahrer können die Daten zur Abbildung des Fahrerwunsches aus gemessenen Fahrten geschätzt werden. Diese Methode wurde für den Aufbau von Fahrermodellen bisher durchgehend angewendet, auch wenn die geschätzten Werte teilweise auf einer enorm großen Menge an Fahrtdaten beruhen können (wie die Analyse von ca. 30.000 km Fahrtstrecke über das KoGaS-Beschleunigungsmodell in Abbildung 84).

Für die Anwendung in der Produktentwicklung bedeutet dies, dass auf geeignete Messdaten zurückgegriffen werden muss, die je nach Fragestellung erst aufwändig erzeugt und eingestuft werden müssen. Im Gegensatz dazu bietet die Verwendung generalisierter Fahrtprofile einen Vorteil, da standardisierte Fahrtprofile und Fahrertypen eine einfachere Auswertung als die Auswahl einer Menge gemessener Fahrer ermöglichen. Als Teil der Implementierung der entwickelten Fahrermodelle (Bereich *Einführen und Umsetzen* in der beschriebenen Vorgehensweise nach der SPALTEN-Methodik) wird ein Ansatz zur allgemeinen Erzeugung generalisierter Fahrtprofile auf Basis der vorliegenden Fahrtdaten entwickelt.

Als Anforderungen für eine allgemeine Erzeugung von Fahrtprofilen kann genannt werden:

- Möglichkeit zur Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrtstrecken, Fahrstile und Fahrzeugbeladungen,
- Abbildung der im Feld vorkommenden Bandbreite verschiedener Fahrweisen,
- direkte Anwendbarkeit der generierten Profile für die Fahrtsimulation einzelner Manöver und gesamter Fahrten.

Es gilt also eine Möglichkeit zu finden, Fahrerwunschprofile zu erzeugen, die in ihrer Gesamtheit eine genauso große Streuung und Varianz wie die Gesamtheit aller real existierenden Fahrer im Feld aufweisen, die aber in der Auswahl auf einzelne Fahrer und Nutzungsarten eingegrenzt werden können. Dieses Ziel wird im Folgenden über die systematische Analyse der vorliegenden Fahrtdaten und die anschließenden Synthese eines Werkzeugs zur Erzeugung allgemeiner Fahrerwunschprofile angegangen.

Zur statistischen Analyse werden die vollständigen vorliegenden Fahrtmessungen in allgemeine Fahrerwunschprofile nach der in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Struktur umgewandelt. Das Fahrerwunschprofil stellt eine enorme Reduzierung der in einer Fahrt enthaltenen Informationen dar und bildet näherungsweise die vom Fahrer in der jeweiligen Fahrtsituation bewusst gewählten Handlungen ab. Die ermittelten Fahrerwunschprofile werden an dieser Stelle in verschiedenen statistischen Auswertungen zusammengefasst und verglichen. Dabei orientiert sich die Wahl der Darstellung teilweise an den von Müller-Kose verwendeten Visualisierungen von OGP-Profilen¹. Ein Auszug aus den erzeugten Darstellungen ist in Abbildung 95 dargestellt.

Die dargestellten Auswertungen ermöglichen die Bewertung der Häufigkeitsverteilungen hinsichtlich möglicher Abhängigkeiten. Aus den vorliegenden Daten werden folgende Annahmen abgeleitet:

- Die Verteilung der gewählten Zielgeschwindigkeiten und Dauern der jeweiligen Fahrt ist maßgeblich von der gewählten Fahrtstrecke abhängig. Bei Autobahnfahrten ergibt sich zusätzlich eine Abhängigkeit vom Fahrstil.
- Die Verteilung verschiedener Beschleunigungszielwerte ist hauptsächlich vom Fahrstil des jeweiligen Fahrers abhängig, nicht jedoch von der Beladung oder dem Typ des Fahrzeugs (siehe hierzu Kapitel 6.2.5)
- Es wird eine Abhängigkeit zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der Gesamtdauer für eine bestimmte Wunschgeschwindigkeit unterstellt, nach der

¹ Müller-Kose 2002.

große Geschwindigkeitssprünge auch zu einer längeren Dauer bis zum nächsten Geschwindigkeitswechsel führen.

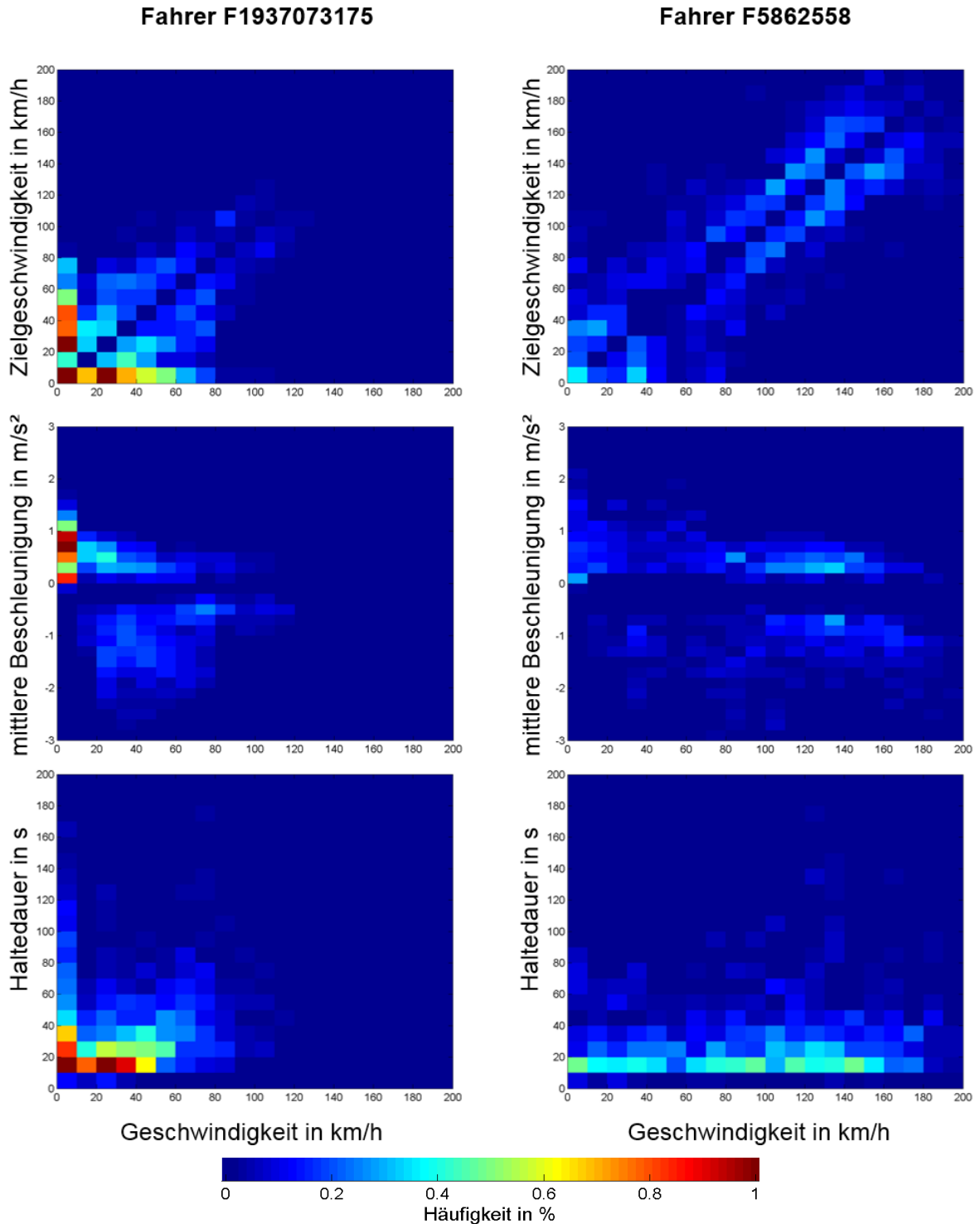


Abbildung 95: Vergleich von statistischen Kennwerten zu den Fahrerwunschprofilen für zwei Fahrer

Auf Basis dieser Annahmen und Angabe geeigneter statistischer Verteilung kann eine allgemeine Generierung synthetischer Fahrprofile vorgenommen werden. Hierfür wurde ein geeignetes Verfahren entwickelt, das sich an der von BREZGER

beschriebenen Methode zur Erzeugung von Erprobungsprofilen orientiert¹ und als Implementierung in Microsoft Excel vorliegt. Diese Implementierung ermöglicht dem Anwender die Erzeugung einzelner oder vieler synthetischer Fahrerwunschprofile, die den oben aufgeführten Hypothesen zur Häufigkeitsverteilung entsprechen (siehe Abbildung 96).

Synthese von Fahrerwunschprofilen:

Version 1.0

Benutzerangaben:
Fahrtstrecke: Allgemein
Fahrstil: sportlich

Exportreferenz: 28236

Häufigkeit = $f(v_{ist}, v_{ziel})$

	0	10	20
0	0	1876	2707
10	2082	0	695
20	2849	682	0
30	1869	1077	647
40	1457	755	991
50	788	265	502
60	485	231	356
70	342	156	239
80	207	86	114
90	102	50	60
100	62	16	22
110	34	13	15
120	52	2	7
130	13	3	3
140	9	2	0
150	5	0	1
160	0	2	0
170	0	0	0
180	4	1	0
190	0	0	0
200	0	0	0

Aktuelles Fahrprofil exportieren

20 Fahrprofile exportieren

Abbildung 96: Oberfläche zur Generierung synthetischer Fahrerwunschprofile in Microsoft Excel. Die Struktur des verwendeten Berechnungsmechanismus ist in Anhang D beschrieben.

¹ Siehe Brezger 2013.

Über die vorhandene Benutzerschnittstelle können Fahrerwunschprofile für die in den vorangegangenen Kapiteln erzeugten Fahrermodelle erzeugt werden. Dabei wird der in Excel implementierte Zufallszahlengenerator für die Erzeugung der Fahrerwunschprofile verwendet, so dass eine mehrfache Anwendung des Programms unterschiedliche Fahrerwunschprofile erzeugt. Bei ausreichender Länge des betrachteten Fahrprofils ergibt sich jedoch eine Konvergenz der erzeugten statistischen Kennwerte.

Für die hier aufgeführten Auswertungen werden durchgehend 1000 Handlungspunkte des Fahrers berücksichtigt. Eine entsprechende Auswertung von 20 erzeugten generischen Fahrprofilen mit dem KoGaS-Beschleunigungsmodell hinsichtlich der Momentenverteilung für die Seitenwellen ist in Abbildung 97 dargestellt. Die beschriebene, nur noch geringe Abweichung der einzelnen Fahrprofile ist in der Darstellung gut erkennbar.

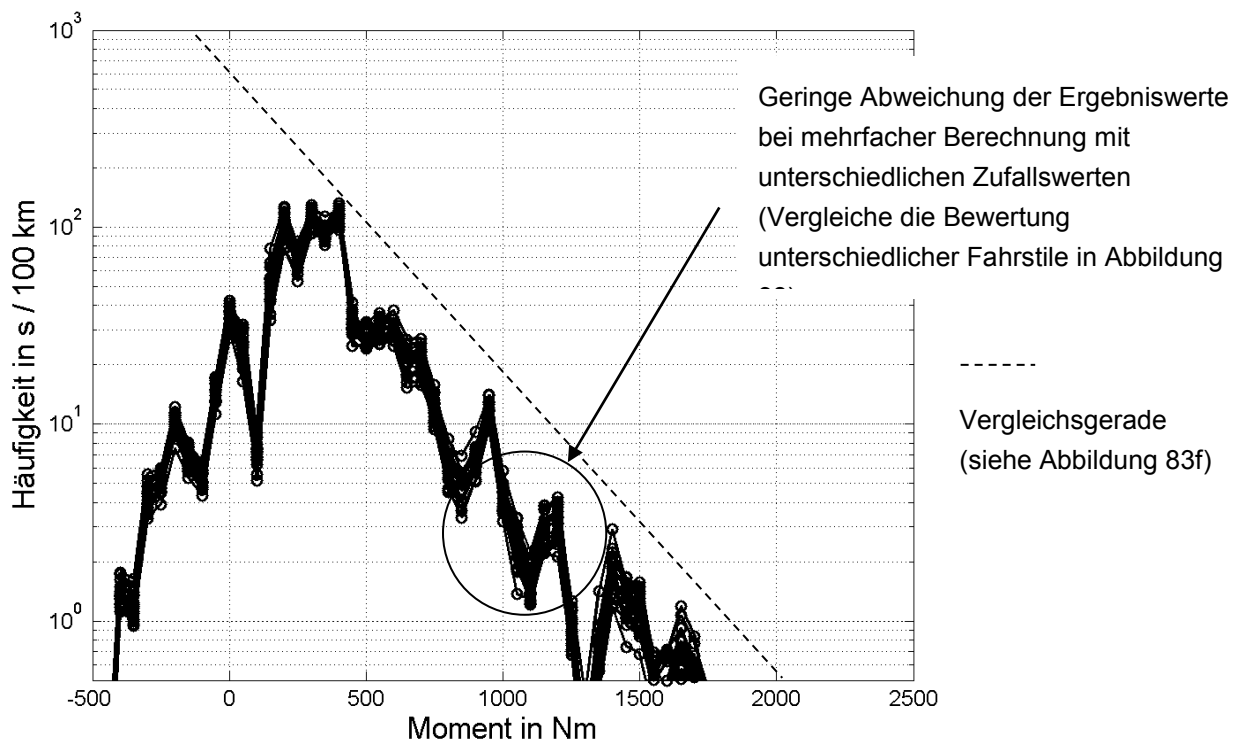


Abbildung 97: Vergleich von 20 generisch erzeugten Fahrprofilen (normaler Fahrstil, allgemeine Fahrtstrecke) mit jeweils 1000 berücksichtigten Werten zum Fahrerwunschprofil (entspricht ca. 800 km Fahrtstrecke) hinsichtlich der Belastung der Seitenwellen über das KoGaS-Beschleunigungsmodell

Mit der Methode zur Erzeugung synthetischer Fahrerwunschprofile liegt nun eine Alternative zum Rückgriff auf vorliegende Messdaten zur Erzeugung von Fahrerwunschprofilen vor. Stattdessen kann das Fahrerverhalten direkt in

Abhängigkeit unterschiedlicher Fahrstile und Strecken bewertet werden. Eine entsprechende Bewertung ist für das KoGaS-Beschleunigungsmodell in Abbildung 98 dargestellt. Die Darstellung ähnelt der in Kapitel 8.2 gefundenen Darstellung für die unterschiedlichen Fahrer aus der Fahrtdatenbank (vergleiche hierzu Abbildung 84), ermöglicht aber eine direkte Bewertung der Bauteilbelastung in Abhängigkeit von Fahrstil und Strecke.

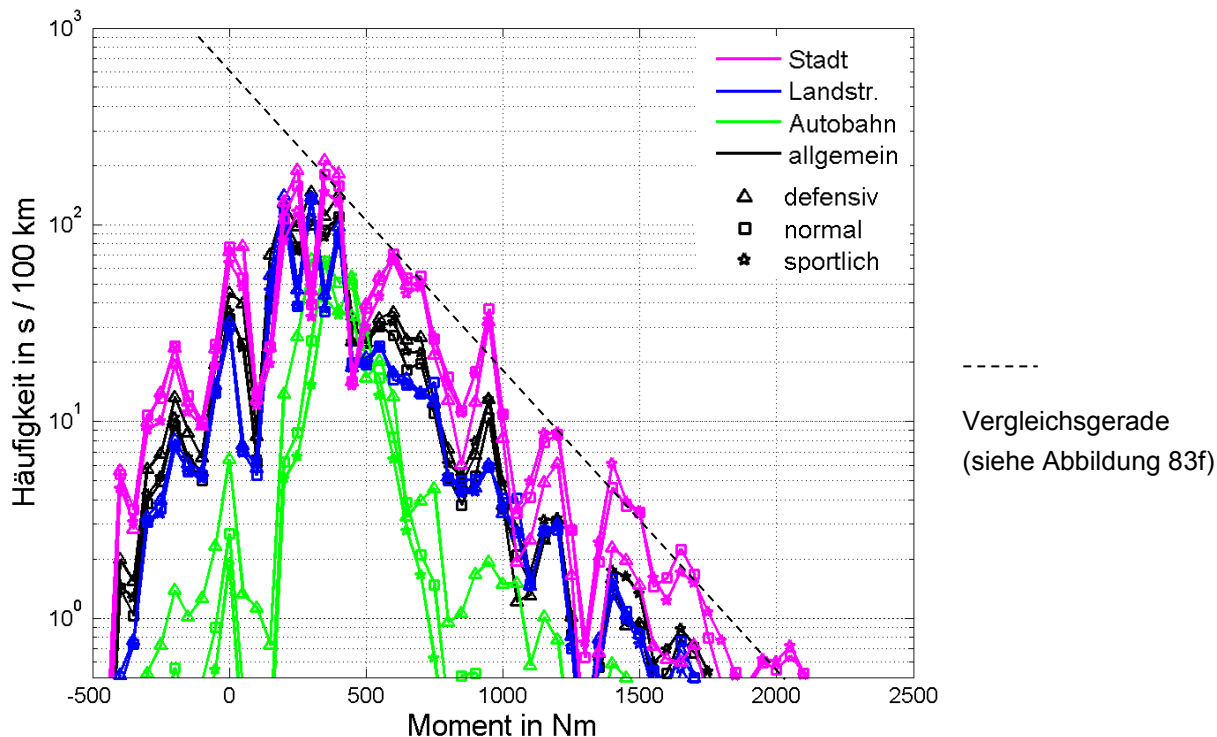


Abbildung 98: Vergleich der Seitenwellenbelastung durch Bewertung von Beschleunigungsvorgängen über das KoGaS-Beschleunigungsmodell in Abhängigkeit von Fahrstrecke und Fahrstil

In der Auswertung zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Seitenwellenbelastung von der gefahrenen Strecke: Für Stadtfahrten mit den häufig erfolgenden Anfahrvorgängen ergibt sich die höchste Belastung, während Autobahnfahrten vergleichsweise unkritisch für die Seitenwellenbelastung sind. Im Gegensatz hierzu ergibt die Variation des Fahrstils einen deutlich niedrigeren Effekt.

Damit liefern die Ergebnisse nicht nur eine Aussage zu den zu erwartenden Bauteilbelastungen für verschiedene Fahrer, sondern liefern auch wichtige Hinweise für eine Validierung am physischen System: Diese sollte sinnvollerweise in den Bereichen stattfinden, die für das Bauteil besonders kritisch sind – im Fall der betrachteten Seitenwellen also mit einem Fokus auf Stadtverkehr und sportlichem Fahrstil.

8.5 Diskussion der Ergebnisse

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, wie die aufgebauten Fahrermodelle in eine Form gebracht werden können, die die Bewertung von Bauteilbelastungen über Fahrer-Fahrzeug-Simulation innerhalb der Produktentwicklung ermöglicht. Mit den aufgebauten Modellen und entwickelten Methoden wird somit die Verbindung zwischen den vorangegangenen, grundlegenden Betrachtungen zum Aufbau von Fahrermodellen und den Anforderungen der Produktentwicklung hinsichtlich der Bewertung von Bauteillastkollektiven hergestellt.

Die durchgeführten Betrachtungen behandeln:

- die Anbindung aufgebauter Fahrermodelle an gängige Mehrkörpersimulationsumgebungen,
- die Implementierung und Validierung von Simulationsmodellen zur zeiteffizienten Ermittlung von Bauteillastkollektiven und
- die Entwicklung eines Werkzeugs zur Bereitstellung allgemeiner Fahrerwunschfunktionen, die die Durchführung von Fahrtsimulationen für unterschiedliche Fahrer-, Strecken- und Fahrzeugtypen unabhängig vom Vorliegen realer Fahrtrmessdaten ermöglichen.

Diese Punkte können als entscheidend für die Einbeziehung von Fahrermodellen in die Anforderungen und Prozesse der Produktentwicklung betrachtet werden. Validierte Fahrermodelle, die in anwendbarer Form im Rahmen der Produktentwicklung zur Verfügung stehen, ermöglichen eine frühzeitige Berücksichtigung des Fahrerverhaltens in den Entwicklungsprozess. Gleichzeitig werden in späteren Phasen der Produktentwicklung – hauptsächlich in den Aktivitäten der Validierung, Einführung und Nutzungsanalyse – neue Erkenntnisse über die verwendeten Fahrermodelle erzeugt. Damit liegen für die nächste Produktgeneration verbesserte Fahrermodelle vor, die wiederum verwendet werden können. Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 99 verdeutlicht.

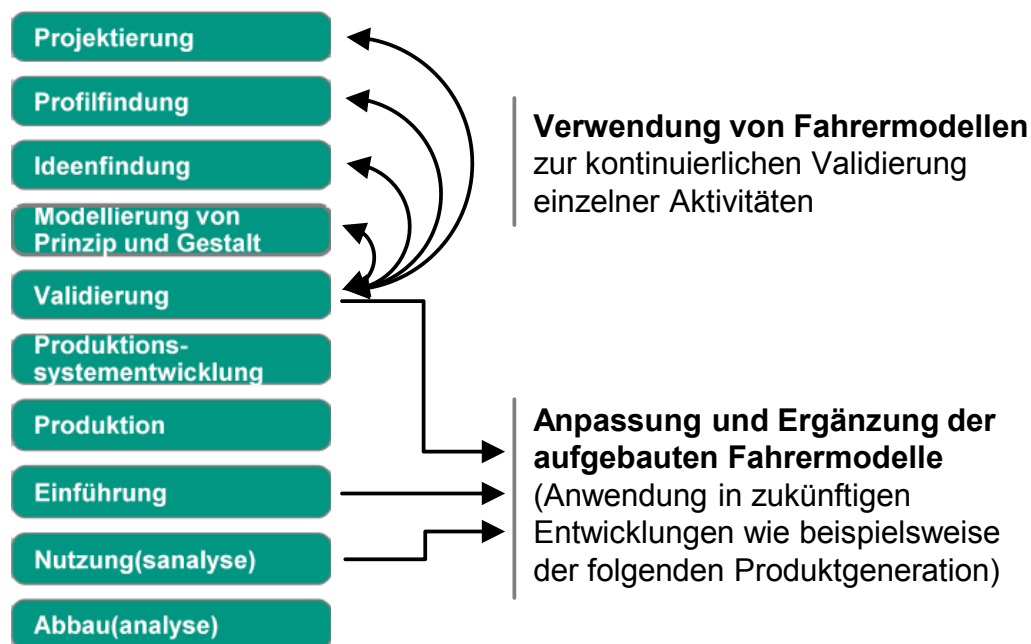


Abbildung 99: Schematische Einordnung der Nutzung von Fahrermodellen für die Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten anhand der IPEM-Makroaktivitäten

Nach dem oben beschriebenen Verständnis werden Fahrermodelle verwendet, um vor allem in frühen Phasen der Produktentwicklung eine *Validierung* des jeweiligen Entwicklungsstands zu erreichen. Dabei beschreibt der Begriff der Validierung idealerweise einen kontinuierlich erfolgenden Abgleich zwischen dem aktuellen Entwicklungsstand (dem aktuell vorliegenden Objektsystem) und den aktuell bekannten Anforderungen (Zielsystem), die auch eine ausreichend hohe Gebrauchsdauer für das entstandene Produkt beinhalten¹. Der Schritt der Validierung erfolgt allgemein als bewusst wahrgenommene Aktivität (beispielsweise eine zusätzlich durchgeführte Simulation mit einem vorliegenden Fahrermodell zur Ermittlung von Bauteillastkollektiven), kann aber teilweise auch eingebettet in anderen Makroaktivitäten erfolgen. So kann eine Software zur Auslegung von Bauteilen auch eine "live" erfolgende Berechnung von Bauteillastkollektiven über ein hinterlegtes Fahrer- und Fahrzeugmodell beinhalten, solange diese - wie für die oben vorgestellte Implementierung des Kogas-Beschleunigungsmodells - mit hoher Automatisierung und ohne für den Benutzer bemerkbaren Dauer abläuft. In diesem Fall erfolgt der Schritt der Validierung zu diesem Zeitpunkt direkt eingebettet in die Aktivität der Modellierung von Gestalt und Funktion.

¹ Zum Begriff von Objekt- und Zielsystem vergleiche Kapitel 2.3.2. Zur Bedeutung einer kontinuierlich erfolgenden Validierung siehe auch Albers et al. 2016.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Methoden zur Simulation von Fahrerverhalten zur Durchführung von Last- und Verschleißuntersuchungen.

Als Kern der Arbeit werden mehrere methodische Werkzeuge entwickelt, die beim Aufbau von Fahrermodellen angewendet werden können (Kapitel 5):

- Begrenzung des Gültigkeitsbereichs (Trennung zwischen Gesamtfahrt und Manövern)
- Aufteilung des Fahrerverhaltens in Fahrerwunsch und Handlungsausführung
- Unterteilung der Fahrermodelle in statistische Modelle, Reglermodelle und optimaltheoretische Modelle

Diese methodischen Werkzeuge vereinfachen und unterstützen den Prozess des Aufbaus von Fahrermodellen, die individuell auf einzelne Zielstellungen und Anwendungsbereiche zugeschnitten sind.

Parallel wird eine umfangreiche Analyse von im Feld gesammelten Fahrtdaten vorgestellt. Auf dieser Basis wird anhand verschiedener exemplarisch aufgebauter Fahrermodelle die Anwendung der Methodik zum Aufbau von Fahrermodellen demonstriert und validiert (vergleiche Kapitel 6 und Kapitel 7).

Die vorgestellte Methodik in Kombination mit erfassten Messdaten und entsprechend aufgebauten Fahrermodellen ermöglicht die Ermittlung von Bauteillastkollektiven und damit die umfassende Bewertung und Berücksichtigung der Bauteillebensdauer in frühen Phasen der Produktentwicklung.

9.2 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen finden neben dem allgemeinen Trend zu kürzer werdenden Entwicklungszeiten und beschleunigter Produktzyklen auch vor der zunehmenden Möglichkeit zur *Vermessung und Erfassung menschlichen Verhaltens* statt. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die erzielten Ergebnisse diskutiert und mit anderen, parallel stattfindenden Entwicklungen in Relation gesetzt.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Erfassung von Fahrtdaten (vergleiche Kapitel 6) als verhältnismäßig umfangreiche Studie, die mit begrenztem finanziellen Aufwand durchgeführt werden konnte (die eingesetzte Technik beruht auf im normalen Handel verfügbarer Hard- und Software, die Stand 2015 noch bei etwa 50 € liegt). Gleichzeitig zeigt sich auch im industriellen Umfeld eine starke Zunahme der Menge erfasster Daten (Beispielsweise wird bei der Erprobung von Fahrzeugen heute von vielen OEMs standardmäßig eine Erfassung des CAN-Busses über den kompletten Erprobungszeitraum durchgeführt) sowie eine allgemeine Zunahme der bei Autofahrten erfassbaren Daten über Motorsteuergerät, Smartphone, Navigationsgerät und Dashcam.

Für die Entwicklungspraxis und den darin handelnden Produktentwickler bedeutet die Zunahme erfasster Daten auch, dass deutlich mehr Daten bewertet und interpretiert werden müssen. Automatisierte Auswerteroutinen sind hier unumgänglich, um eine Reduzierung der umfangreichen Daten auf eine für den Menschen erfassbare Menge zu erreichen (vergleiche hierzu die in Kapitel 6 entwickelten Programmroutinen zur Bewertung von Fahrstil und Schaltverhalten). Bei geeigneter Nutzung ermöglichen die erfassten Daten dem Produktentwickler, eine zielgerichtete und gleichzeitig schnelle Entwicklung von Bauteilen durchzuführen (was gleichzeitig das Risiko von Fehlern während der beschleunigten Produktentwicklung bei unzureichender oder falscher Interpretation der vorliegenden Daten erhöht).

Geeignete Modelle zur Reduktion von Fahrtdaten ermöglichen die *Bewertbarkeit* und teilweise auch *Erklärbarkeit* der Handlungen des jeweiligen Fahrers. Eine zunehmende Bewertbarkeit des Fahrstils zeigt sich auch an verschiedenen heute verfügbaren Fahrzeugen, welche dem Fahrer eine Benotung seines Fahrstils bezüglich des Spritverbrauchs anbieten und dem Aufkommen von Versicherungsangeboten, bei denen der Versicherungsbeitrag anteilig durch eine Bewertung des Fahrstils festgelegt wird (siehe Abbildung 100). In den hier beschriebenen Fällen ist der Bewertungsschlüssel für den Fahrer weitestgehend transparent und die ermittelte Note einsehbar.



Abbildung 100: Scoring-Tabelle für das Versicherungsangebot „S-Drive“ der SV Sparkassenversicherung, das seit Anfang 2014 mit einer begrenzten Teilnehmerzahl getestet wird¹

Während die Bewertbarkeit erfasster Fahrtdaten prinzipiell gegeben ist und auch in den oben genannten Beispielen genutzt wird, zeigt sich im Rahmen der Ergebnisse dieser Arbeit, dass eine eindeutige Erklärbarkeit gemessenen Fahrerverhaltens nicht immer erwartet werden kann. So beruhen die hier verwendeten Fahrermodelle im Allgemeinen auf einem aus den Fahrtdaten *geschätzten* Fahrerwunsch, der somit nicht immer dem real existierenden Fahrerwunsch entspricht. Auch eine Identifikation einzelner Fahrer kann mit den in dieser Arbeit entwickelten Metriken nicht gewährleistet werden (wäre aber durch eine Ergänzung ausreichend vieler Fahrtdaten mit GPS-Ortskoordinaten realisierbar).

Neben der zunehmenden Erfassung von Fahrtdaten in Fahrzeugen und der auch in dieser Arbeit verfolgten Entwicklung von Handlungsmodellen zur Anwendung in der Simulation ist in den letzten Jahren auch ein starker Fortschritt im Bereich des maschinellen Lernens festzuhalten. Die als *deep learning* bezeichnete Methode leistet die Erfassung von Merkmalen über neuronale Netze und bietet bei

¹ Quelle: <http://www.sparkassen-direkt.de/telematik>, aufgerufen am 8. August 2014

Verwendung einer ausreichenden Menge an unsortierten Rohdaten eine weitgehend unabhängig vom menschlichen Bediener erfolgende Aufschlüsselung und Kategorisierung von Daten. Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Methoden ermöglichen künstliche neuronale Netze jedoch keine direkt dem Menschen zugängliche Beschreibung des hinterlegten Bewertungsschlüssels. Der fehlenden Transparenz der Methode stehen jedoch enorme Performancegewinne auf verschiedenen Anwendungsgebieten entgegen, beispielsweise bei Speech-to-Text-Anwendungen (Transkription von Tonaufnahmen durch den Computer) oder der Erkennung von Bildern.

Vor diesem Hintergrund ist nicht klar vorhersagbar, welche der diskutierten Methoden sich in Zukunft durchsetzen wird – die direkte Erfassung und statistische Auswertung von Messdaten, der Aufbau von handelnden Fahrermodellen über darin geschulte Anwender oder die automatisierte Erstellung von Fahrermodellen durch maschinelles Lernen. In allen betrachteten Fällen ergibt sich jedoch das grundlegende Potenzial, bei Fehlbedienung oder Fehlinterpretation folgenschwere Fehler für Mensch und Technik auszulösen. Gleichzeitig ergeben sich für den individuellen Fahrer durch die zunehmende Erfassung und Bewertung seines Fahrverhaltens ungeklärte Auswirkungen – gerade auch bei der Bewertung von Haftungsfragen bei Garantieansprüchen, der Kopplung des Fahrverhaltens an Versicherungsprämien oder der Nutzung von Miet- und Carsharingangeboten.

Die sich aus dieser Entwicklung ergebenden Folgen können nur gesamtgesellschaftlich unter Einbeziehung von Politik und gesetzlichen Regularien sinnvoll angegangen werden. Gleichzeitig betreffen sie aber auch den handelnden Produktentwickler, der bei der Erfassung und Nutzung von Fahrtdaten und der Verwendung von Fahrerhandlungsmodellen entsprechend vorsichtig mit den jeweils verwendeten Daten umgehen und die Folgen seines Handelns abschätzen muss. Dies betrifft sowohl die Nutzung von Fahrerdaten und -modellen zur Belastungsanalyse von Bauteilen als auch die Gestaltung und Entwicklung von Systemen, die eine direkte Erfassung und Bewertung von Fahrerdaten als Teil des Produkts vorsehen.

Zusammenfassend kann auf Basis der vorliegenden Daten und Überlegungen gefordert werden, dass dem betroffenen Fahrer die Erfassung der jeweiligen Daten und Ermittlung von Bewertungen bewusst angezeigt werden muss. Erfolgt eine Rückkopplung der erhobenen Bewertungen auf den jeweiligen Fahrer (auch nur im unwahrscheinlichen Fall eines Schadens im Rahmen von Produkthaftungen), so sollten die über den Fahrer ermittelten Bewertungen und darauf verfügbaren Schlussfolgerungen auch für ihn einsehbar sein.

9.3 Ausblick

Sowohl direkt aus dieser Arbeit als auch aus benachbarten Themenfeldern ergeben sich denkbare weiterführende Forschungsansätze. Die folgende Diskussion unterteilt sich dabei in verschiedene Bereiche.

Anwendung und Weiterentwicklung der in dieser Arbeit entwickelten Methoden und Modelle

Die entwickelte Grundmethodik zum Aufbau von Fahrermodellen bietet ein geeignetes Werkzeug zur Synthese von Fahrermodellen. Diese Synthese erfolgt idealerweise individuell in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung.

Damit ergeben sich als mögliche Bereiche für fortführende Arbeiten sowohl die Anwendung der entwickelten Methodik auf weitere Fragestellungen der Produktentwicklung als auch die direkte Einbindung der entwickelten Fahrermodelle in verschiedene Methoden und Prozesse der Produktentwicklung. Denkbar ist beispielsweise die Anbindung und Integration der entwickelten Fahrermodelle für Implementierung des XiL-Frameworks mit physischen Systemanteilen (etwa die Anbindung und Anwendung des Fahrermodells für Gesamtfahrten an einem Fahrzeugrollenprüfstand).

Betrachtung der Auswirkungen von zeiteffizienten Werkzeugen zur Abbildung der Bauteillebensdauer auf den Produktentwicklungsprozess

Aus den aufgebauten Methoden und Modellen ergeben sich verschiedene Auswirkungen für den Ablauf des Produktentwicklungsprozesses, die aus entwicklungsmethodischer Sicht diskutiert werden können. Im Folgenden wird ein kurzer Anriss der verschiedenen Auswirkungen gegeben.

Die entwickelten und beschriebenen Methoden ermöglichen teilweise eine sehr zeiteffiziente Ermittlung von Bauteilbelastungen. Im Fall der in Kapitel 8.2 beschriebenen Implementierung des KoGaS-Beschleunigungsmodells ergibt sich bei hinterlegtem Beschleunigungskennfeld eine Ermittlung des Bauteillastkollektivs für große Fahrtstrecken in einer Berechnungsdauer von etwa einer Sekunde. Die Bereitstellung solcher Werkzeuge im Rahmen der Produktentwicklung ermöglicht eine Einbeziehung von Lastabschätzungen direkt in die Aktivität der Modellierung von Gestalt und Form anstelle in der getrennt oder parallel erfolgenden Aktivität der Validierung.

Die Anwendung von Fahrermodellen kann auch vor dem Hintergrund der *Produktgenerationsentwicklung* diskutiert werden¹. Entsprechend der Terminologie erfolgt heute eine Auslegung von Produkten in der Praxis oftmals über die Anwendung vorliegender Lastkollektive und Validierungsergebnisse einer Produktgeneration auf die Entwicklung der jeweils folgenden Generation. Als Alternative hierzu bietet sich die Parametrisierung und Validierung von Fahrermodellen an den Erprobungsergebnissen der vorangegangenen Produktgeneration und die anschließende Auslegung der folgenden Produktgeneration über die Anwendung der erzeugten Fahrermodelle an. Der Phase der Validierung kommt somit nicht mehr die Aufgabe der vollständigen Abprüfung der Lebensdauer im Feld zu, sondern vielmehr eine Validierung der Gültigkeit der an der vorangegangenen Produktgeneration entwickelten Fahrermodelle auf die Struktur der neuen Produktgeneration.

Forschungsbedarf hinsichtlich der Vereinheitlichung und Übertragbarkeit von Fahrermodellen

Der Bereich möglicher Einsatzbereiche von Fahrermodellen ist heute breiter denn je und bietet den unterschiedlichen Anwendungsbereichen entsprechend auch sehr unterschiedliche Lösungen und Modellansätze². Hier sind Ansätze zur sinnvollen Unterteilung, zum Vergleich, zur Übertragbarkeit und zur Kombination verschiedener Fahrermodelle von entscheidender Bedeutung.

Als erste Lösungsansätze bieten sich die Entwicklung allgemeiner Kennwerte und Darstellung zur Bewertung des Fahrstils (einzelne Ansätze finden sich in Kapitel 6.2.3) und die Kombination verschiedener Fahrermodelle über das Konstrukt des Zustandsautomaten (siehe Kapitel 7.2.2) an. Die entsprechende Anwendung dieser Werkzeuge wird ausführlicher in einer separaten Veröffentlichung behandelt¹ und bietet einen möglichen Anknüpfungspunkt für weiterführende Arbeiten.

Neue Forschungsbereiche im Themenfeld Fahrermodellierung

Allgemein ergeben sich im Bereich Fahrermodellierung neue Möglichkeiten durch aktuelle Methoden, wie die im Bereich neuronaler Netze erzielten Fortschritte und den allgemeinen Trend zur Erfassung und Auswertung deutlich größerer Mengen an

¹ Siehe Albers et al. 2015a zum Begriff der Produktgenerationsentwicklung.

² Ein Überblick über die aktuelle Vielfalt an Anwendungsfällen und Modelltypen wird beispielsweise in Jürgensohn 2013 gegeben.

Daten. Diese Ergebnisse ermöglichen neue Forschungsansätze für die Bereiche der Objektivierung von Kundenbewertungen und Komfortbewertung sowie der Modellierung von Fahrerhandlungen.

Aus Sicht des Autors stellen sich hiermit auch neu zu bewertende Fragen an die Auswirkung und Konsequenzen dieser Methoden, die möglicherweise auch dem Forschungsbereich der Technikfolgenabschätzung zugeordnet werden können (siehe zu dieser Thematik auch den vorangegangenen Abschnitt). Vor diesem Hintergrund kann das Zitat von BROOKS zum Eingang dieser Arbeit verwiesen werden, das sich auf den Trend der Erfassung und Auswertung von Daten zum menschlichen Verhalten bezieht. Die dort erzielten Fortschritte wirken sich auch auf Fragestellungen der Fahrermodellierung aus und versprechen neue Ansätze und erzielbare Erkenntnisse, erfordern aber auch eine intensive Begleitung und Bewertung durch die Forschung.

¹ Siehe Albers et al. 2015b.

10 Literaturverzeichnis

Albers 2010

Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: Horváth, I. (Hg.). Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010: Virtual Engineering for Competitiveness (Ancona 2010). Delft: Faculty of Industrial Design Engineering Univ. of Technology, 2010.

Albers und Albrecht 2002

Albers, A.; Albrecht, M.: Vorhersage subjektiver Komforturteile mittels künstlicher neuronaler Netze. VDI-Tagung: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, 11. Internationaler Kongress, Würzburg, 01.-02. Oktober 2002. Tagungsband: VDI-Berichte 1701, VDI-Verlag Düsseldorf, 2002, S. 401-420

Albers und Albrecht 2004

Albers, A.; Albrecht, M.: Einsatz künstlicher neuronaler Netze zur objektiven Beurteilung des Schwingungskomforts am Beispiel des automatisierten Anfahrens. In: VDI-Tagung Humanschwingungen. Tagungsband VDI-Berichte Nr. 1821, Darmstadt, 17.-18. März 2004. Düsseldorf: VDI-Verlag, Bd. 1821, 2004, S. 159–182

Albers und Albrecht 2005

Albers, A.; Albrecht, M.: Abbildung der individuellen subjektiven Komfortbeurteilung von Kunden aus objektiven Messwerten am Beispiel des automatisierten Anfahrens. 5. Tagung Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben, Haus der Technik, Augsburg, 01.-02.03.2005. Tagungsbuch: Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik, Bd.3, Expert Verlag, Renningen, 2005, S.30-47

Albers und Braun 2011

Albers, A.; Braun, A.: Der Prozess der Produktentstehung. In: Henning, Frank (Hrsg.); Moeller, Elvira (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München, Germany : Carl Hanser Verlag, 2011. – ISBN 978–3–446–42891–1, S. 5–30

Albers und Düser 2008

Albers, A. ; Düser, T: X-in-the-Loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In: Haus der Technik: 8. Tagung Hardware-in-the-Loop-simulation (2008), Nr. 8, 2008

Albers und Düser 2011

Albers, A. ; Düser, T.: Validierung im Produktentstehungsprozess. Handbuch Leichtbau. In: Henning, F. und Moeller, E. (Hg.): Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Hanser Verlag 2011, S. 133–142.

Albers und Lerspalungsanti 2010

Albers, A.; Lerspalungsanti, S.: Method and Tool of Human Sensation Modeling for Comfort Evaluation of NVH Phenomenon on the Example of Gear Rattle. In: International Federation of Automotive Engineering Societies (FISITA), Nr. 135, 2010

Albers und Meboldt 2007

Albers, A.; Meboldt, M.: IPEMM - Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: Bocquet, J.-C. (Hg.). International Conference on Engineering Design - ICED 07: Proceedings (Paris 2007): Design Society, 2007.

Albers et al. 2005

Albers, A.; Burkardt, N.; Meboldt, M.; Saak, M.: SPALTEN problem solving methodology in the product development. In: Samuel, A. (Hrsg.); Lewis, W. (Hrsg.): Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design – ICED’05, 2005.

Albers et al. 2010

Albers, A.; Brezger, F.; Geier, M.: The impact of peripheral components on gear development concerning investigation of comfort relevant maneuvers; VDI Getriebe in Fahrzeugen; Friedrichshafen 2010

Albers et al. 2012

Albers, A.; Ebel, B.; Lohmeyer, Q.: Systems of objectives in complex product development; Proceedings of TMCE 2012; Karlsruhe 2012

Albers et al. 2013a

Albers, A.; Behrendt, M.; Schroeter, J.; Ott, S.; Klingler, S.: X-in-the-Loop: A framework for supporting central engineering activities and contracting complexity in product engineering processes, In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), 2013.

Albers et al. 2013b

Albers, A.; Heinrich, D.; Brezger, F.: Ein Ansatz zur Fahrermodellierung bei Lastuntersuchungen von Fahrzeugkomponenten. In: Jürgensohn, T. & Kolrep, H. (Hrsg.). Fahrermodellierung in Wirtschaft und Wissenschaft – 4. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung, S. 45-56, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013

Albers et al. 2013c

Albers, A.; Stier, C.; Geier, M.: Herausforderungen von Kupplungssystemen in modernen Antriebssystemen. In: VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2013

Albers et al. 2014

Albers, A.; Behrendt, M.; Matros, K.; Holzer, H.; Bohne, W.: Development of hybrid-powertrains by means of X-in-the-Loop-Approach. 11. Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Braunschweig, 18./19. Februar 2014

Albers et al. 2015a

Albers, A.; Bursac, N., Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP), 2015

Albers et al. 2015b

Albers, A.; Heinrich, D.; Brezger, F.: Methoden zum Vergleich und zur Kombination von Fahrermodellen vor dem Hintergrund von Lastuntersuchungen im Fahrzeugantriebsstrang. 5. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung, Veröffentlichung für Ende 2015 erwartet.

Albers et al. 2016

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. 2016

Albrecht 2005

Albrecht, M.: Modellierung der Komfortbeurteilung aus Kundensicht am Beispiel des automatisierten Anfahrens, In: Albers, A (Hrsg): Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Band 18, Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2005

André 2004

André, M.: Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles. *Report INRETS-LTE 0411, Juni 2004*

Berger 2007

Berger, A.: Fahrermodellierung für Schienenfahrzeuge unter Berücksichtigung kognitiver Prozesse im menschlichen Gehirn, VDI-Fortschritt-Berichte Nr. 666, 2007 – ISSN 0178-9449

Bleile 1999

Bleile, T.: Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens im innerstädtischen Pkw-Verkehr, VDI Fortschritt-Berichte Nr. 395, 1999 – ISBN 3183395126

Braun 2013

Braun, A.: Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung - Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM), In: Albers, A (Hrsg): Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Band 72, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2013

Brezger 2013

Brezger, F.: Neue Methoden für die Weiterentwicklung von hybriden Triebsträngen zur Steigerung der Energieeffizienz, In: Albers, A (Hrsg): Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Band 69, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2013

Brembs et al. 2002

Brembs, B., Lorenzetti, F., Reyes, F., Baxter, D.A., Byrne, J.H. Operant reward learning in Aplysia: Neuronal correlates and mechanisms. Science 296, 2002, S. 1706–1709

Butz 2005

Butz, T.: Optimaltheoretische Modellierung und Identifizierung von Fahrereigenschaften, VDI Fortschritt-Berichte Nr. 1080, 2005 – ISBN 3185080084

Deml et al. 2007

Deml, B.; Freyer, J.; Färber, B.: Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils, In: Fahrer im 21. Jahrhundert (VDI-Fortschritt-Berichte), Düsseldorf: VDI-Verlag, 2015, S. 47-60

Deml et al. 2008

Deml, B., Neumann, H., Müller, A., Wünsche, H.J.: Fahrermodellierung im Kontext kognitiver Automobile, Automatisierungstechnik (56), 2008, S. 601–608

Dillmann 2015

Dillmann, R., Persönliche Diskussion im Rahmen der Vorlesung Kognitive Systeme, KIT SS 2015

Dörner 1999

Dörner, D.: Bauplan für eine Seele. Rowohlt Verlag, Reinbek 1999 – ISBN 3498012886

Düser 2010

Düser, T.: X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen, In: Albers, A (Hrsg): Forschungsberichte des IPEK -

Institut für Produktentwicklung, Band 47, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2010

Fischer et al. 2009

Fischer, R., Butz, T., Ehmann, M., Irmischer, M.: Fahrermodellierung für Fahrdynamik und Verbrauchsberechnungen, In: Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft / 2. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung 19./20. Juni 2008. Thomas Jürgensohn und Harald Kolrep (Hrsg.), Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009

Harding 2007

Harding, J.: Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs, Dissertation, Heft 29: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 2007, ISSN 1437-8299

Herculano-Houzel 2009

Herculano-Houzel, S.: The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in Human Neuroscience* 3(31), S. 1-11, 2009

Irmischer 2001

Irmischer, M.: Modellierung und Simulation von Motivationseinflüssen auf das Fahrerverhalten, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 22 Nr 6, 2001 – ISBN 3183006227

Janßen 2007

Janßen, A.: Repräsentative Lastkollektive für Fahrwerkkomponenten, In: Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, Aachen: Shaker Verlag, Dissertation, 2007

Jürgensohn 1997

Jürgensohn, T.: Hybride Fahrermodelle, Reihe: ZMMS Spektrum Bd. 4, Pro-Universitate-Verlag, 1997 – ISBN 3932490223

Jürgensohn 2013

Jürgensohn, T.: Renaissance der Fahrermodellierung – neue industrielle Anwendungsfelder. In: Jürgensohn, T. & Kolrep, H. (Hrsg.). Fahrermodellierung in Wirtschaft und Wissenschaft – 4. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung, S. 41-44, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013

Jürgensohn und Kupschik 2008

Jürgensohn, T.; Kupschick, S.: Parametergeregelte Fahrermodelle für Standardmanöver. In: Jürgensohn, T., & Kolrep, H. (Hrsg.). Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 15-34., 2008

Kassel 2009

Kassel, T.: Optimale Ganganzahl und Schaltkollektive für Fahrzeuggetriebe, In:

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, Aachen:
Shaker Verlag, Dissertation, 2007

Koch 2011

Koch, C.: The Neurobiology and Mathematics of Consciousness, Vortrag zur
„Singularity Summit 2011“, 2011

Küçükay und Kassel 2007

Küçükay, F.; Kassel, T.: Anforderungsoptimierung für Getriebe und
Komponenten. ATZ, Ausgabe 2007-09, Jahrgang 109, S. 812-819, 2007

Lemke 2003

Lemke, B.: Nichtbewusste Informationsverarbeitungsprozesse und deren
Bedeutung für das Lernen Erwachsener. In: Literatur- und Forschungsreport
Weiterbildung, Report 3/2003, 26. Jahrgang. Bielefeld, S. 71-83, 2003

Liebe et al. 2011

Liebe, C.; Mahnke, R.; Kuhne, R.; Wang, H.: Traffic Flow Prospectives: From
Fundamental Diagram to Energy Balance. In: Transportation Research Circular,
No. E-C149, 2011

MacAdam 2003

MacAdam, C. C.: Understanding and Modeling the Human Driver, In: Vehicle
System Dynamics, Vol. 40, 2003, S. 101-134

Matthiesen et al. 2015

Matthiesen, S.; Schäfer, T.; Schmidt, S.: Zielgerichtete und kundenorientierte
Produktentwicklung – von der Anwendungsanalyse zur Validierung In:
Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015, 2015

Meboldt 2008

Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als
Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). In: Albers, A
(Hrsg): Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, Band 29,
Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2008

Michon 1985

Michon, J. A.: A critical view of driver behavior models: What do we know, what
should we do? In: Human Behavior and Traffic Safety, Plenum Press, 1985, S.
485–520

Müller-Kose 2002

Müller-Kose, J.-P.: Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe Aachen:
Shaker Verlag, Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU
Braunschweig, Dissertation, 2002

O'Shea 2006

O'Shea, M.: The Brain – a very short introduction, Oxford University Press, ISBN 0192853929, 2006

Deutsche Übersetzung: O'Shea, M. (Autor), Weltecke, M. (Übersetzer): Das Gehirn: Eine Einführung, Reclam, ISBN 3150184770, 2008

Panou et al. 2007

Panou, M., Bekiaris, E., Papakostopoulos, V.: Modelling driver behaviour in EU and international projects. In: Modelling driver behaviour in automotive environments: critical issues in driver interactions with intelligent transport systems (Hrsg. Cacciabue, P. C.), London: Springer, 2007, S. 17-25

Pelops 2007

Pelops Whitepaper, http://www.fka.de/pdf/pelops_whitepaper.pdf, 2007, Aufgerufen am 5. Juni 2011

Plöchl und Edelmann 2007

Plöchl, M.; Edelmann, J.: Driver models in automobile dynamics application. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Wien, 2007

Rasmussen 1983

Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, vol. SMC-13, NO. 3, may / june 1983, S. 257-266

Ranney 1994

Ranney, T. A.: Models of driving behavior: A review of their evolution, In : Accident Analysis and Prevention, Vol. 26 / No. 6, Elsevier, 1983, S. 733-750

Reik et al 1998

Reik, W.; Seebacher, R.; Kooy, A.: Das Zweimassenschwungrad, In : LuK Kolloquium 1998, 1998, S. 69-94

Sahbani und Pascal 2000

Sahbani, A. & Pascal, J.-C.: Simulation of Hybrid Systems using Stateflow. In: Proceedings of the 14th European Simulation Multiconference on Simulation and Modelling: Enablers for a Better Quality of Life, 2000, S. 271-275, ISBN: 1-56555-204-0

Salvucci 2006

Salvucci, D. D.: Modeling Driver Behavior in a Cognitive Architecture, Human Factors (48), 2006, S. 362-380

Sanfelice et al 2014

Sanfelice, R.; Copp, D.; Nanez, P.: Hybrid equations (HyEQ) Toolbox v2.02: A Toolbox for simulating hybrid systems in Matlab / Simulink; <https://hybrid.soe.ucsc.edu/software>, 2014, aufgerufen am 9. Oktober 2015

Schreiner 1999

Schreiner, F.: Automatische Führung des Kraftfahrzeugs mit fahreradaptiven Eigenschaften, VDI Fortschritt-Berichte Nr. 404, 1999

Tutuianu et al 2013

Tutuianu, M.; Marotta, A.; Steven, H.; Ericsson, E., Haniu, T., Ichikawa, N., Ishii, H.: Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC), Draft Technical Report, UN/ECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG DHC subgroup, 1st November, 2013

Welke 2010

Welke, S.: Neuronale Indikatoren des Lenkbeginns – Mentale Chronometrie untersucht im modifizierten Spurwechseltest, In: Kolrep, H. & Jürgensohn, T. (Hrsg.): Fahrermodellierung – zwischen kinematischen Menschmodellen und dynamisch-kognitiven Verhaltensmodellen (3. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung). Düsseldorf: VDI-Verlag, Fortschritt-Berichte Reihe 22, Nr. 32, S. 15-34, 2010

Wilde 1982

Wilde, G. J. S.: The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health, Risk Analysis, Vol. 2, No. 4, 1982, S. 209-225

Wilde 2007

Wilde, G. J. S.: Risk homeostasis: accept, reject or modify? Vortragsfolien, ICTCT Workshop, Valencia, Spain, Oct. 25-26, 2007

Wurster und Schick 2010

Wurster, U.; Schick, B.: Substantial Progress of Virtual Driver Skills in Interaction with Advanced Control Systems to meet the new Challenges of Vehicle Dynamics Simulation, AVEC 2010

Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Vom Autor betreute Abschlussarbeiten. Alle Abschlussarbeiten wurden in Kooperation mit der Firma LuK GmbH & Co. KG in Bühl durchgeführt.

Heizmann, 2013:

Heizmann, J.: Entwicklung von Werkzeugen zur Lebensdauerabschätzung von dynamisch belasteten Bauteilkomponenten, Diplomarbeit, Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (IPEK), KIT, 2013

Abdo, 2014:

Abdo, E.: Bewertung der Belastung von Riementriebkomponenten bei Fahrmanövern mit sehr niedrigen Motordrehzahlen, Masterthesis Maschinenbau, Hochschule Offenburg, 2014

Kroner, 2015:

Kroner, A.: Ermittlung repräsentativer Prüfprofile für die Erprobung von Motorendämpfern, Bachelorthesis Maschinenbau, Hochschule Karlsruhe, 2015

Müller, 2015:

Müller, E.: Aufbau und Implementierung von Fahrzyklusmodellen zur Lebensdauerbewertung von Schwingungsdämpfern, Masterthesis Maschinenbau, Hochschule Offenburg, 2015

Anhang

Anhang A: Verwendete Programmpakete und PC-Leistungsdaten

Die folgenden Programmpakete wurden im Rahmen dieser Dissertation genutzt. Die Angaben im Text erfolgen jeweils ausschließlich über den Namen des Programms ohne zusätzliche Trademark-Kennzeichnung, die jeweiligen Angaben an dieser Stelle orientieren sich an den Angaben der Hersteller.

Dyfasim: Version 5.0, © LuK GmbH & co. KG

GNU Octave: Version 3.8, © John W. Eaton und andere

Hinweis: GNU Octave ist eine Programmumgebung unter GPL-Lizenz, die einen Funktionsumfang ähnlich Matlab und weitgehende Kompatibilität anbietet. Der im Rahmen dieser Arbeit erzeugte Programmcode für Matlab wurde teilweise über GNU Octave programmiert und ist sowohl in GNU Octave als auch Matlab funktionsfähig. Entsprechend wird im Text teilweise „Matlab und GNU Octave“ als Programmumgebung angegeben. Die im Text eingebundenen Grafiken sind durchgehend mit Matlab erzeugt.

Matlab: Version R2012b, © The MathWorks, Inc

Microsoft Excel: Microsoft Excel 2007, © Microsoft Corporation

Microsoft Visual Studio C++: Microsoft Visual Studio 2008 / Visual C++ 2008 Express Edition, Version 9.0.30729.1, © Microsoft Corporation

Die Berechnungen wurden durchgehend auf einem Desktop-PC mit dem Betriebssystem Windows 7 Enterprise und einem 64-Bit-CPU mit vier Prozessorkernen durchgeführt. Ein Überblick über die vom Betriebssystem angegebenen Leistungsdaten ist in Abbildung 101 gegeben.

Komponente	Details	Teilbewertung	Gesamtbewertung
Prozessor	Intel(R) Xeon(R) CPU W3520 @ 2.67GHz	7,3	5,9 Ergibt sich aus der niedrigsten Teilbewertung
Arbeitsspeicher (RAM)	8,00 GB	7,3	
Grafik	NVIDIA Quadro 600	6,6	
Grafik (Spiele)	4855 MB insgesamt verfügbarer Grafikspeicher	6,6	
Primäre Festplatte	21GB frei (149GB gesamt)	5,9	
Windows 7 Enterprise			

System

Hersteller	Hewlett-Packard
Modell	HP Z400 Workstation
Gesamter Systemspeicher	8,00 GB RAM
Systemtyp	64 Bit-Betriebssystem
Anzahl der Prozessorkerne	4

Speicher

Gesamtgröße der Festplatte(n)	149 GB
Datenträgerpartition (C:)	21 GB frei (149 GB gesamt)
Medienlaufwerk (D:)	CD/DVD

Abbildung 101: Daten gemäß Windows 7 „Leistungsinformationen und Tools“ für den verwendeten Desktop-PC

Anhang B: Verwendung von Open-Streetmap-Kartendaten

Für die in Kapitel 6 verwendeten Kartendarstellungen werden Kartendaten in Form von vorgerenderten Kacheln zu je 256x256 Pixel vom Geoinformationssystem OpenStreetMap verwendet. Die verwendeten Kartengrafiken sind unter der Creative Commons Lizenz "Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen" 2.0 (CC BY-SA, siehe <http://creativecommons.org> für weitere Informationen) verfügbar, das Urheberrecht an den zugrundeliegenden Kartendaten liegt bei den verschiedenen OpenStreetMap-Mitwirkenden (siehe auch <http://openstreetmap.org>).

Der CC BY-SA-Lizenz entsprechend sind die verwendeten Kartendarstellungen in Abbildung 26 sowie Abbildung 47 ebenfalls unter einer CC BY-SA-Lizenz veröffentlicht, genau wie der Programmcode zur Erstellung der Kartendarstellungen, der im Folgenden angegeben wird. Die Lizenz erstreckt sich nicht auf den weiteren Bereich der vorliegenden Arbeit, für die alle Rechte beim IPEK (Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie KIT) und beim Verfasser liegen.

Weitere Informationen zu der verwendeten Lizenz finden sich unter:

<http://www.openstreetmap.org/copyright>

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>

Programmcode zur Darstellung von Kartendaten in Matlab und GNU Octave (veröffentlicht unter der oben genannten CC BY-SA-Lizenz):

```
function plot_GPStracks(latitude, longitude, zoom)
    % Plotten von GPS-Tracks auf Openstreetmap-Kartenkacheln
    % latitude, longitude: Vektoren mit GPS-Datenpunkten
    % zoom: Integer mit aktueller Zoomstufe, i.a. 7 .. 13

    % Umrechnung auf Kartenprojektion:
    Karte_X=(0.5+longitude/360)*2^zoom;
    Karte_Y= 2^zoom * (1 - (log(tan(latitude/180*pi) ...
        + sec(latitude/180*pi)) / pi)) / 2;

    % Berechnung des X- und Y-Bereichs der Karte:
    x1=floor(min(Karte_X))-1;
    x2=ceil(max(Karte_X))+1;
    y1=floor(min(Karte_Y))-1;
    y2=ceil(max(Karte_Y))+1;

    % Karte entsprechend benötigtem Bereich:
    plot_map(x1:x2, y1:y2, zoom);
    axis off; hold on
```

```
% Verschiebung der Kartenprojektion auf Anfangspunkt der Karte
% und Streckung auf Tilegröße:
Karte_X=(Karte_X-x1)*256;
Karte_Y=(Karte_Y-y1)*256;
% Plot
plot(Karte_X, Karte_Y, 'k', 'LineWidth', 1.5);
```

```
end
```

```
function plot_map(x,y,zoom)
% Plotten eines Kartenausschnitts mit OSM-Tiles
% 7.1.2013, Daniel Heinrich

% Erfordert die Angabe eines Ordners mit vorliegenden Kartenkacheln:
folder='jTileDownloader\tiles\';

rgb_ges=[];

for xi=x
    rgb_spalte=[];
    for yi=y
        % Dateiname des zu lesenden Tile
        name=[folder num2str(zoom) '\\' num2str(xi) '\\' ...
            num2str(yi) '.png' ];
        % Einlesen des PNG-Files:
        if exist(name, 'file');
            [I, map] = imread(name);
            % Konvertieren von Index-Format zu RGB:
            % (nur fuer Matlab benoetigt, Octave: rgb=I;):
            rgb=ind2rgb(I,map);
            % Aufhellen:
            rgb=0.9*rgb+0.1;
            rgb_spalte=[rgb_spalte; rgb];
        end
    end
    rgb_ges=[rgb_ges, rgb_spalte];
end

% Plotten der Karte:
image(rgb_ges);
axis equal;

end
```

Anhang C: Programmstruktur und Auswerterroutinen für die Fahrtdatenbank

Die in Kapitel 6 beschriebene, als dieser Arbeit aufgebaute Fahrtdatenbank besteht aus der beschriebenen Menge an Fahrtdaten, die in einer vereinheitlichten Dateistruktur abgelegt sind. Die einzelnen Fahrtdaten sind dabei im Matlab-Dateiformat und als Excel-Dateien abgelegt, um eine automatische Verarbeitung in verschiedenen Programmen zu ermöglichen. Die erzeugte Datenbank liegt am Institut für Produktentwicklung in Karlsruhe vor und wird in weiteren Forschungsprojekten genutzt, beispielsweise im Rahmen von Fragestellungen der Erprobung von Hybridfahrzeugen und Verbrauchszyklen.

Neben den Fahrtdaten selbst beinhaltet die Fahrtdatenbank einen umfangreichen Satz an Auswertesequenzen, die in den Programmpaketen Matlab und GNU Octave ausgeführt werden können. Eine Dokumentation liegt in Form einer Textdokumentation, kommentiertem Programmcode und Videotutorials vor. Die Programmsequenzen ermöglichen durchgängig automatisch ablaufende Auswertungen, so dass neu vorliegende Fahrtdaten ohne großen Aufwand in die Auswertung mit aufgenommen werden können.

Liste der vorliegenden Programmsequenzen:

convert_csv.m	Sequenz zum Import von .csv-Dateien aus der Smartphone-App „Torque“ in die Fahrtdatenbank
convert_csv_GARMIN.m	Sequenz zum Import von .csv-Dateien aus der GARMIN-Smartphone-App in die Fahrtdatenbank
DB_anw_ermittl_Motorkennfeld.m	Ermittlung des Motorkennfelds für ein bestimmtes Fahrzeug in der Fahrtdatenbank
DB_anzahl_anfahrvorgaenge.m	Ermittlung der Anfahrvorgänge für alle in der Fahrtdatenbank vorliegenden Messdaten und anschließender Export der ermittelten Daten
DB_anzahl_anfahrvorgaenge__visualisierung.m	Einladen und visualisieren der ermittelten Daten zu allen verfügbaren Anfahrvorgängen
DB_ermittle_uebersetzungen.m	Ermittlung der Antriebsstrangübersetzungen für alle in der Fahrtdatenbank verfügbaren Fahrzeuge

DB_ermittle_uebersetzungen_speichern.m	Exportieren der vorher ermittelten Antriebsstrangübersetzungen
DB_filter.m	Filtern der Fahrtdatenbank: Auswahl nach gemessenem CAN-Bus
DB_filter_2.m	Filtern der Fahrtdatenbank: Auswahl von Fahrtmessungen mit Stop-and-go-Verkehr
DB_filter_3.m	Filtern der Fahrtdatenbank: Auswahl von Fahrtdaten anhand vorgegebener GPS-Wegpunkte
DB_filter_3_auswahl_koordinaten.m	Auswahl von GPS-Wegpunkten für die ortsabhängige Filterung in DB_filter_3.m
DB_filter_3_plotkarte.m	Visualisierung der gewählten Wegstrecke als Kartendarstellung
DB_histo_M_n.m	Ermittlung von Motorkennfeld-Histogrammen für Fahrzeuge in der Fahrtdatenbank
DB_histogramm_plot_sigma_beschl.m	Darstellung der Beschleunigungs-Standardabweichungen und –Kennwerte
DB_histogramm_plot_sigma_beschl_Fzg.m	Darstellung der Beschleunigungs-Standardabweichungen und –Kennwerte in Abhängigkeit des Fahrzeugs
DB_histogramm_v_a.m	Darstellung der Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme für alle Fahrtmessungen in der Fahrtdatenbank
DB_histogramm_v_a_Fahrzeug.m	Darstellung der Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Histogramme gegliedert nach Fahrzeug
DB_import_allGPS.m	Import aller GPS-Daten der Fahrtdatenbank
DB_OGP_auswertung.m	Umwandlung aller Fahrtmessungen in OGP-Fahrerwunschprofile (siehe Kapitel 7)
DB_OGP_auswertung_teil2.m	Visualisierung und statistische Auswertung der ermittelten OGP-Fahrerwunschprofile
DB_plot_path.m	Erzeugen einer Kartendarstellung mit allen eingeladenen GPS-Datensätzen
DB_schaltkennfelder.m	Ermittlung von Schaltkennfeldern für alle Fahrzeuge in der Fahrtdatenbank

Anhang D: Dokumentation der entwickelten Fahrermodelle

Mit der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Fahrer- und Fahrzeugmodelle aufgebaut. Eine ausführliche Dokumentation zum Aufbau und der Anwendung dieser Modelle einschließlich kommentiertem Programmcode und Videotutorials zur Anwendung liegt am Institut für Produktentwicklung Karlsruhe vor. Eine kompaktere Dokumentation zur Struktur der Modelle und den verwendeten Parametern für die durchgeführten Berechnungen wird im Folgenden gegeben.

Implementierung des KoGaS-Beschleunigungsmodells in MS Excel

Die in Kapitel 7.1.5 beschriebene Implementierung des KoGaS-Modells löst das betrachtete Optimierungsproblem durch eine Energiebetrachtung:

Leistung zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit = mittlere Leistungsabgabe des Verbrennungsmotors

Aus dieser Betrachtung wird die notwendige Gaspedalstellung unter Berücksichtigung der vorgegebenen mittleren Motordrehzahl für den Fahrer bestimmt (siehe Abbildung 102).

Implementierung des KoGaS-Beschleunigungsmodells in Matlab

Die Implementierung des KoGaS-Modells in Matlab folgt der in Abbildung 61 (Seite 107) beschriebenen Berechnungsmethodik. Vom Modell werden einzelne Beschleunigungsvorgänge mit unterschiedlichen Gaspedalstellungen und Schaltdrehzahlen berechnet, wobei für die Berechnung ein stark vereinfachtes Fahrzeugmodell verwendet wird. Die verwendete Berechnungslogik wird in Abbildung 103 beschrieben.

Fahrzeugdaten

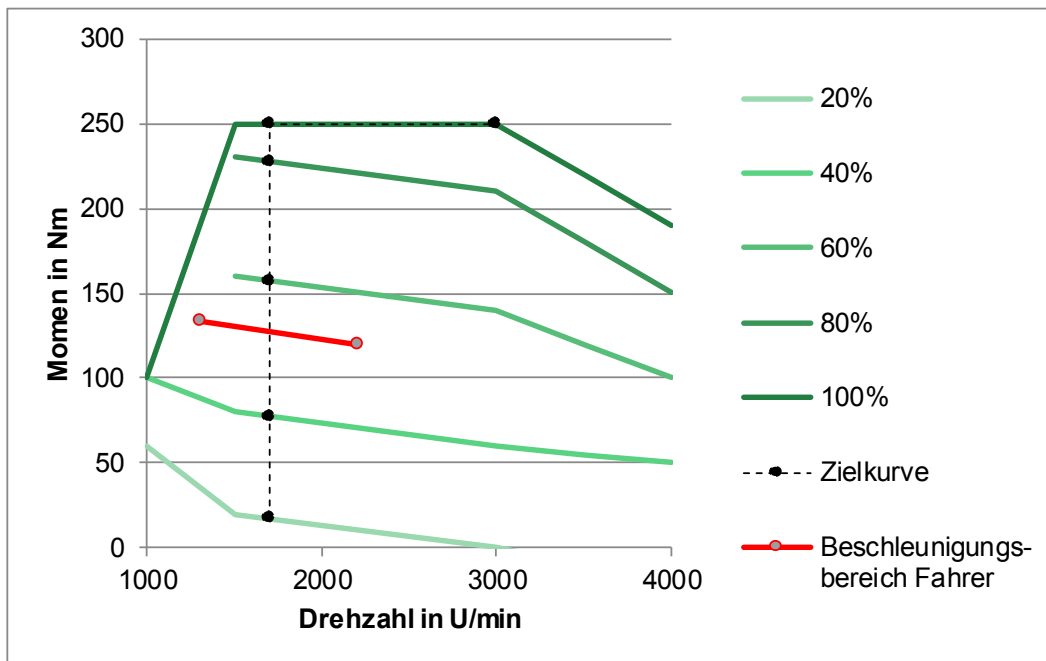
Masse	1500 kg (m)	Eingabe
Rollwiderstand	0.015 (μ)	wird berechnet
Fzg-Querschnitt	3 m ² (A)	
$cw \cdot A \cdot \rho / 2 =$	0.585	
Getr.spreizung	1.6 (i/i_vorher)	

Fahrerwunsch - Geschwindigkeitssprung

v1	20 km/h
v2	80 km/h
dt	20 s

Handlungsausführung - mittlere Drehzahl

n_mittel	1700 U/min
----------	------------



1. Benötigte Energie für Beschleunigungsvorgang

Ekin	347222 J
Ewiderst	104713 J
Gesamt	451936 J

Benötigte Leistung:	22597 W
	22.6 kW

Moment in Nm	126.9
n_Mittel	1700 U/min
M_Mittel	126.9 Nm

3.	min	max
	1307.7	2210.0
	133.9	119.9

Abbildung 102: Implementierung des KoGaS-Beschleunigungsmodells in MS Excel mit Beschreibung des verwendeten Berechnungsverfahrens. Durchgeführte Schritte:

- 1.) Bestimmung der notwendigen mittleren Leistung für Beschleunigungsvorgang
- 2.) Berechnung des mittleren Moments zu dieser Leistung ($M_{\text{mittel}} = P_{\text{mittel}} / n_{\text{mittel}}$)
- 3.) Bestimmung der Schaltgrenzen über die Getriebespreizung

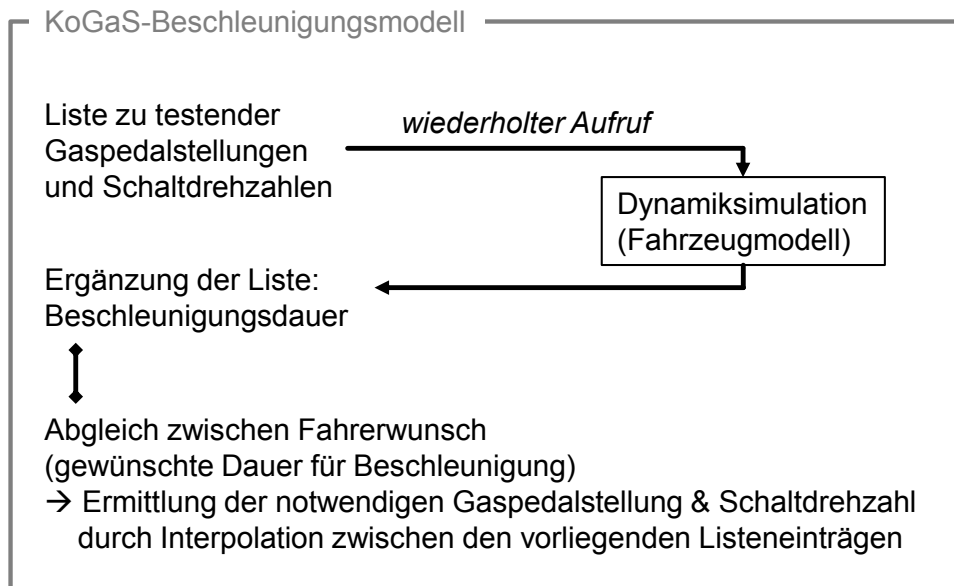


Abbildung 103: Struktur des KoGaS-Beschleunigungsmodells in Matlab

Implementierung des KoGaS-Beschleunigungsmodells in MKS-Simulationen

Die in Kapitel 8.2 beschriebene Implementierung des KoGaS-Beschleunigungsmodells verwendet ebenfalls die oben beschriebene Modellstruktur, nimmt jedoch zwei Anpassungen vor:

- Die Simulation der Beschleunigungsrampen erfolgt nicht über ein vereinfachtes Fahrzeugmodell direkt in Matlab, sondern in einer geeigneten Mehrkörpersimulationsumgebung, an die das Fahrermodell als DLL angebunden ist (siehe unten).
- Das berechnete Beschleunigungskennfeld beinhaltet nicht nur die Dauer des Beschleunigungsvorgangs, sondern auch die berechnete Bauteilbelastung der Seitenwellen. Die anschließende Abfrage des Beschleunigungskennfelds ermittelt somit nicht nur die geeignete Gaspedalstellung und Schaltdrehzahl zum Erreichen des vorgegebenen Fahrerwunsches, sondern auch die hierbei auftretenden Bauteilbelastungen.

Implementierung des Fahrermodells für Gesamtfahrten in Matlab

Die einzelnen Manöver des Fahrermodells für Gesamtfahrten werden – wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben – über die Struktur des Zustandsautomaten verknüpft. Die

verwendete Implementierung arbeitet dabei über eine globale Variable („zustand“), in welcher der aktuelle Zustand des Fahrermodells abgelegt ist und von der Programmsequenz abgerufen wird. Die einzelnen Teilmodelle des Fahrermodells werden über eine Variable („modus“) angesteuert. Der Wert dieser Variable beschreibt den aktuell aktiven Zustand und damit den Programmteil, der aufgerufen wird (modus = 1 → Beschleunigen, modus = 2 → Abbremsen, ...). Dabei werden Modi nicht direkt angesteuert, sondern über eine Eingangssequenz eingeleitet, die Parameter der folgenden Handlung bestimmt. Die Eingangssequenz wird durch einen angepassten Variablenwert (Zustand + 0.1) aufgerufen. Die Struktur kann am Beispiel des Beschleunigens über einen Auszug des Matlab-Programmcodes verdeutlicht werden:

```
% Modus 1: Zustand "Beschleunigen"

% Eingangsbedingung:
if modus == 1.1
    % Ermitteln der Fahrerwunschgroößen fuer den Beschleunigungsvorgang:
    v1=vist/3.6;
    v2=vsoll/3.6;
    Dt=(v2-v1)/asoll_max;
    % Zielzeitpunkt merken:
    zustand.TZiel = t + Dt;

    % Motormoment und Schaltgrenzen werden ueber das
    % KoGaS-Beschleunigungsmodell ermittelt:
    [zustand.PGas, n_schalt] = ...
        kogas_beschleunigungsmodell(v1,v2,Dt,zustand.n_schalt_standard);
    % Schaltgrenzen aus Optimierungsfunktion:
    zustand.schaltgrenzen = [1000 n_schalt];

    fprintf('%s\n', 'Beschleunigen gestartet');
    modus = 1;
end

% Im Zustand:
if modus == 1

    % Ausgabewerte aus den gegebenen Vorgaben wählen
    PGas = zustand.PGas;
    MB = 0;

    % Erster Gang? --> Gas halbieren:
    if zustand.gang ==1
        PGas = PGas * 0.5+10;
    end

    % Wechselbedingungen (Zielgeschwindigkeit erreicht):
    if vist > vsoll-0.01 || t > zustand.TZiel+10
        modus = 3.1; % neuer Modus: Geschwindigkeit halten.
    end

end

end
```


Dabei wird in der Modellstruktur zwischen den allgemein benötigten Manövern (Beschleunigen, Abbremsen, Konstantfahrt) und den nur für Handschalterfahrzeuge benötigten Manövern (Anfahren, Schalten) unterschieden (siehe auch Abbildung 67 auf Seite 117). Diese werden einer separaten Handlungsebene zugeordnet und unterbrechen das aktuell stattfindende Manöver, um anschließend wieder zu den vorherigen Zustandsparametern zurückzukehren.

Implementierung des Fahrermodells für Gesamtfahrten in MKS-Simulationen

Die Implementierung des entwickelten Fahrermodells als dynamische Bibliothek folgt der gleichen Struktur wie die Implementierung in Matlab. Die oben beschriebene Programmstruktur konnte nach C++ portiert werden, ohne dass sich dabei besondere Änderungen ergaben. Parameter zur Abbildung des Fahrers und vom Modell benötigte Informationen zum Fahrzeug werden dabei zur Initialisierung der Dynamiksimulation aus einer Textdatei eingelesen, so dass Änderungen an der Parametrisierung über eine einfache Anpassung vorgenommen werden können (siehe Abbildung 104).

1	zustand_schaltgr_std_min	1200	Standard-Schaltgrenzen des Fahrers					
2	zustand_schaltgr_std_max	2300						
3	zustand_schaltschwelle	10		Toleranzschwelle für Schaltvorgänge				
4	zustand_ngang	5	Handlungsparameter Konstantfahrt					
5	zustand_Dt_HP	3						
6	zustand_sigma_a	0.2						
7	zustand_mfzg	1600	Fahrzeugparameter					
8	zustand_RReifen	0.31						
9	zustand_i_anfahrt	14.77						
10	Beschleunigungskennfeld für das KoGaS-Beschleunigungsmodell							
11	Beschleunigungskennfeld:							
12	0.1	0.39610419	0.37857717	0.36756304	0.36095455	0.35523221	0.35523221	0.35523221
13	5	1.2169971	0.95749855	0.83005327	0.75410366	0.70357269	0.70357269	0.70357269
14	10	2.2082853	1.4322771	1.1866169	1.0409298	0.94399184	0.94399184	0.94399184
15	15	3.4673755	2.1326835	1.5982201	1.3516273	1.1729046	1.1729046	1.1729046
16	20	7.1222119	4.4838495	2.1632955	1.7660569	1.5269681	1.5269681	1.5269681
17	25	9.129282	5.244843	4.1250739	3.5866275	3.1098268	1.9035407	1.9035407
18	30	11.307328	6.019928	4.6339016	4.0537825	3.6451936	3.6258533	2.3370378
19	35	16.66363	8.5800743	5.206172	4.5082412	4.0767002	4.0683413	3.8400285
20	40	20.371201	9.803833	7.4908347	6.5857821	5.9913855	4.4954185	4.6204
21	45	24.348709	11.077704	8.3248014	7.3883586	6.7939172	4.9475427	5.0724382
22	50	28.705839	12.410943	9.1741142	8.128232	7.5327315	6.8171415	5.562439
23	55	37.559727	13.82241	10.053044	8.8583984	8.2438059	7.5288849	6.0969849

Abbildung 104: Verwendeter Parametersatz für Fahrer 1 in Kapitel 8.3. Das unten angegebene Beschleunigungskennfeld umfasst die Geschwindigkeit in 5 km/h-Schritten (erste Zeile, Kennfeld geht bis 200 km/h) und die notwendigen Zeiten zum Erreichen dieser Geschwindigkeit für 7 unterschiedliche Gaspedalstellungs- und Schaltdrehzahlwerte für das Fahrermodell. Diese Parameter werden vom Nutzer über eine Vorsimulation bestimmt.

In der Mehrkörpersimulation wird das Fahrermodell über die verfügbare DLL-Schnittstelle angebunden (siehe Abbildung 105).

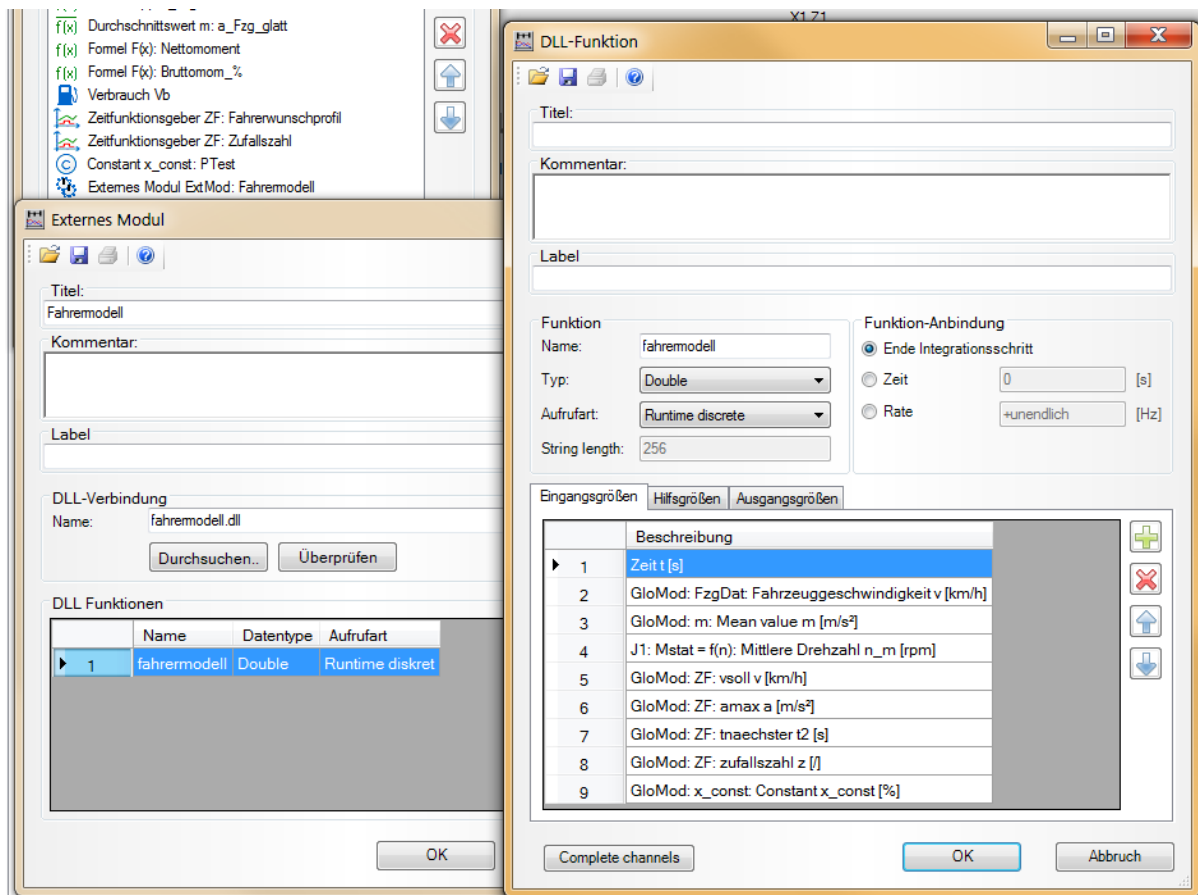


Abbildung 105: Schnittstelle zwischen Fahrzeug- und Fahrermodell in der verwendeten Simulationsumgebung „Dyfasim“. In der Simulationsumgebung werden über eine Eingabetabelle Fahrerwunschprofile und Zufallszählensätze ermittelt und ebenfalls an das Fahrermodell übergeben.

Aus der Mehrkörpersimulation wird der Fahrzeugzustand (Eingangsgrößen 2-4) sowie der aktuell vorgegebene Fahrerwunsch (Eingangsgrößen 5-7) an das Fahrermodell übermittelt. Weitere Übergabewerte sind ein im Voraus bestimmter Zufallswert (Eingangsgröße 8) und ein Parameter zur Vorgabe spezieller Fahrmanöver (Eingangsgröße 9 – ermöglicht die Simulation von Beschleunigungsrampen mit konstanter Gaspedalstellung zur Ermittlung des Parameterkennfelds für das KoGaS-Beschleunigungsmodell).

Verfahren zur Generierung synthetischer Fahrerwunschprofile

Das in Kapitel 8.4 beschriebene Verfahren zur Generierung synthetischer Fahrerwunschprofile verwendet die dort beschriebenen Statistiken (ermittelt über aus der Fahrtdatenbank vorliegende Fahrerwunschprofile), um aus diesen wiederum neue, synthetisch erzeugte Fahrerwunschprofile zu erzeugen. Hierzu werden die erzeugten Häufigkeitsdaten in Abhängigkeit der aktuellen Fahrtgeschwindigkeit sortiert und entlang dieser jeweils in eine Summenhäufigkeit umgewandelt:

Vorliegende Häufigkeiten (Summenhäufigkeit in Abhängigkeit der aktuellen Fahrtgeschwindigkeit):

- nächste Fahrerwunschgeschwindigkeit (folgender Punkt im Orientierungsgeschwindigkeitsprofil)
- Dauer (Zeitlicher Abstand zum folgenden Punkt im Orientierungsgeschwindigkeitsprofil)
- mittlere Beschleunigung (bei zunehmender Wunschgeschwindigkeit)
- maximale Bremsbeschleunigung (bei abnehmender Wunschgeschwindigkeit)

Über die vorliegenden Statistiken kann jeweils für einen bekannten Punkt im Fahrerwunschprofil (gegebener Zeitpunkt und gegebene aktuelle Wunschgeschwindigkeit) eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die darauf folgende Wunschgeschwindigkeit, Haltedauer und Beschleunigung zum Erreichen dieser angegeben werden. Aus der gegebenen Verteilungsfunktion wird über eine zufällig bestimmte Zahl ein tatsächlicher Wert ausgewählt (siehe Abbildung 106).

Die Unterteilung des Häufigkeiten in einzelne Schubladen (beispielsweise 10-km/h-Schritte bei der Wunschgeschwindigkeit) kann entweder im Export beibehalten werden oder zusätzlich um eine zufällig erzeugte Streuung ergänzt werden, um eine feinere Verteilung der erzeugten Kennwerte zu ermöglichen. Die vorliegende Implementierung ermöglicht dabei den automatischen Export der generierten Fahrerwunschprofile in beiden Varianten.

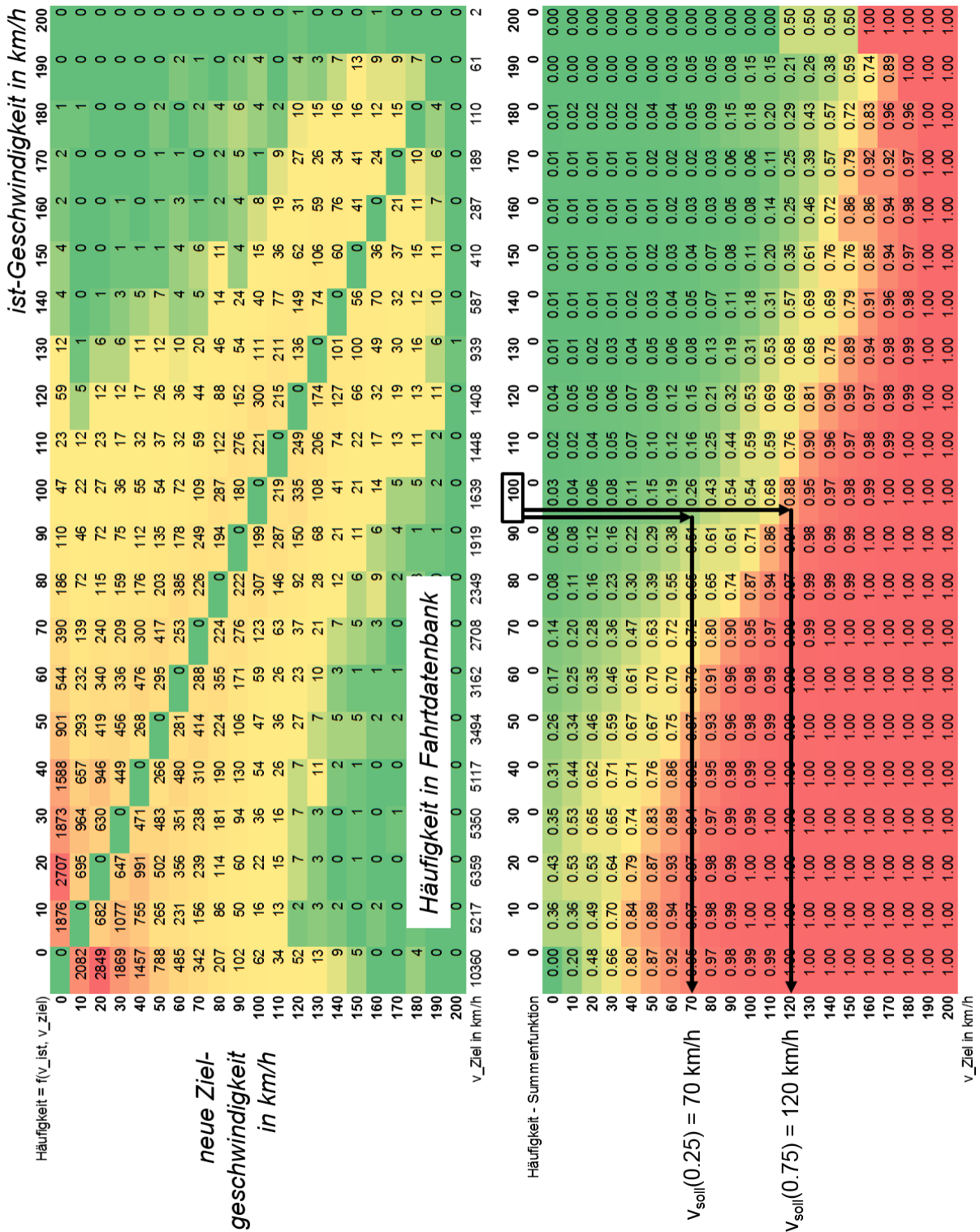


Abbildung 106: Ermittlung der folgenden Zielgeschwindigkeit über die Verteilung der Summenhäufigkeit am Beispiel von 100 km/h aktueller Fahrgeschwindigkeit (Darstellung von 0,25 und 0,75 als angenommene Zufallszahlen)