

Karlsruher Schriftenreihe  
Fahrzeugsystemtechnik

Dominik Dörr

## **Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz**



Scientific  
Publishing



Dominik Dörr

**Adaptive Fahrhinweise für ein  
längsdynamisches Fahrerassistenzsystem  
zur Steigerung der Energieeffizienz**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik  
Band 91**

Herausgeber

**FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik**

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Institutsteilen Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen.

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

# **Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz**

von  
Dominik Dörr

Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches  
Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Dipl.-Inform. Dominik Dörr

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2020

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml

#### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
(CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2021 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-1090-1

DOI 10.5445/KSP/1000130225





# Vorwort

Die Fahrzeugtechnik ist kontinuierlich Veränderungen unterworfen. Klimawandel, die Verknappung einiger für Fahrzeugbau und –betrieb benötigter Rohstoffe, globaler Wettbewerb, gesellschaftlicher Wandel und das rapide Wachstum großer Städte erfordern neue Mobilitätslösungen, die vielfach eine Neudefinition des Fahrzeugs erforderlich machen. Die Forderungen nach Steigerung der Energieeffizienz, Emissionsreduktion, erhöhter Fahr- und Arbeitssicherheit, Benutzerfreundlichkeit und angemessenen Kosten sowie die Möglichkeiten der Digitalisierung und Vernetzung finden ihre Antworten nicht aus der singulären Verbesserung einzelner technischer Elemente, sondern benötigen Systemverständnis und eine domänenübergreifende Optimierung der Lösungen.

Hierzu will die Karlsruher Schriftenreihe für Fahrzeugsystemtechnik einen Beitrag leisten. Für die Fahrzeuggattungen Pkw, Nfz, Mobile Arbeitsmaschinen und Bahnfahrzeuge werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die Fahrzeugsystemtechnik auf vier Ebenen beleuchten: das Fahrzeug als komplexes, digitalisiertes mechatronisches System, die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug in Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt. Der Energiebedarf eines Kraftfahrzeugs wird deutlich vom Verhalten des Fahrers beeinflusst. Neben der Automatisierung der Fahrzeugführung ist auch die Unterstützung des Fahrers mit Empfehlungen während des Fahrbetriebs eine interessante Option, die sich vergleichsweise einfach implementieren lässt und die damit sofort zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen kann. Besonders hilfreich sind Fahrerhinweise, die dazu führen, die Radbremsen seltener zu nutzen, da mit jeder Betätigung eine Wandlung kinetischer oder potentieller Energie des Fahrzeugs in nicht weiter verwendbare Wärmeenergie verbunden ist. Hinweise, die dem Fahrer helfen, rechtzeitig, etwa vor vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kurven oder Kuppen, das Fahrpedal zurückzunehmen, können Bremsungen vermeiden. Neben den für die Darbietung der Hinweise genutzten Sinneskanälen und der Gestaltung der Informationen ist zu erwarten, dass

auch der Zeitpunkt der Übermittlung einen Einfluss auf die Wirkung der Hinweise hat.

Hier setzt die Arbeit von Herrn Dörr ein, in der er mittels Probandenversuchen ermittelt, inwieweit ein Einfluss des Übermittlungszeitpunkts besteht und wie der Zeitpunkt geeignet gewählt werden kann. Dabei berücksichtigt er auch den Fahrstil des Fahrers und erarbeitet zur Ermittlung des Fahrstils aus am Fahrzeug gemessenen Größen eine neue Methode der Fahrstilerkennung.

Karlsruhe, im Dezember 2020

*Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin*

# **Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften**  
bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Dipl.-Inform. Dominik Dörr

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2020  
Referent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml



# Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Fahrhinweise entwickelt, die den Fahrer dabei unterstützen sollen, seine Fahraufgabe möglichst energieeffizient zu meistern. Bei den Fahrhinweisen handelt es sich um ein Fahrerassistenzsystem. Daher werden im ersten Schritt bestehende Fahrerassistenzsysteme beschrieben und klassifiziert, bevor das in dieser Arbeit entwickelte Fahrerassistenzsystem näher erläutert wird. Im nächsten Schritt wird der Fahrstil eines Fahrers näher betrachtet und mit Hilfe eines auf Fuzzy-Logik basierend Systems erkannt. Die Parameter dieses Systems können mit einer Methode, welche statistische Versuchsplanung mit evolutionären Algorithmen kombiniert, optimiert werden.

Durch eine Einbeziehung des Fahrstils können die Hinweise adaptiv gestaltet werden. Eine weitere Möglichkeit die Hinweise an den Fahrer anzupassen ist, den Anzeigzeitpunkt unter Berücksichtigung der Reaktionszeit auf vorangegangene Hinweise zu verschieben. Diese Anpassung an die Reaktionszeit wird in einer Probandenstudie an einem statischen Fahrsimulator auf ihre Wirksamkeit überprüft.

Für die Probanden war subjektiv kein Unterschied zwischen einer adaptierten und einer nicht adaptierten Standardausführung der Fahrhinweise erkennbar. Objektiv konnte jedoch eine signifikante Verbesserung ermittelt werden, da die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der berechneten Sollgeschwindigkeit bei dedizierten Situationen und der tatsächlich erreichten Geschwindigkeit bei diesen Situationen durch die Adaption halbiert werden konnte. Diese Abweichung verringerte sich mit der Anzahl der absolvierten Situationen immer weiter, was auf eine gute Anpassung mit fortschreitender Zeit schließen lässt.



# Abstract

In this work driving advices which should support the driver in executing his driving task efficiently are developed. These driving advices appear as a advanced driver assistance system. This is why existing driver assistance systems are described and classified as a first step. Afterwards the driver assistance system developed in this work is outlined. In the next step the driving style is studied more closely. It is determined by using a fuzzy logic systems. The system parameters can be optimized by using a method which combines design of experiments an evolutionary algorithms.

By taking the driving style into account, the driving advices could be shaped adaptive. A second possibility for adaption to the driver is shifting the timing of displaying the advices by considering the reaction time of the driver to former advices. This adaption to the reaction time is reviewed by a study with test persons in a static driving simulator.

The test perons could not sence a difference between the adaptive and a standard non-adaptive version of the driving advices subjectively. But the was a significant impovement objectively. The difference between the calculated target velocity for dedicated driving situations and the actually realized velocity at these situations could be halved by the adaption. This difference was getting smaller after some situations. This allows the conclusion, that with the adaption the error is getting smaller over time.



# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (LFF) des KIT. Während der Arbeit am Institut bekam ich die Möglichkeit an den Forschungsprojekten „e-generation“ und „e-evolution“ mitzuarbeiten, in deren Rahmen auch eine Vielzahl der Inhalte für diese Arbeit entstanden sind.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin, Leiter des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie, danke ich besonders für die wissenschaftliche Förderung, die stets vorhandene Diskussionsbereitschaft und den nötigen Freiraum zum selbstständigen und wissenschaftlichen Arbeiten. Nur durch diese Diskussionen und die hilfreichen Beiträge von ihm, war mir eine konsequente Weiterentwicklung des Themas möglich. Desweiteren danke ich Frau Prod. Barbara Deml für die Übernahme des Ko-Referats. Ich möchte auch Herrn Dr. Michael Frey danken, der mir als Gruppenleiter stets für konstruktive Diskussionen in thematischen, methodischen und persönlichen Fragen zur Seite stand. Er hat sich außerdem immer in allen Belangen für mich eingesetzt.

Weiterer Dank gilt meinen Kollegen am Institut, auf deren fachlichen Input ich jederzeit vertrauen konnte. Nur so konnte das Thema und damit die Arbeit sich weiterentwickeln und zu dem werden, was hier zu lesen ist. Insbesondere gilt der Dank meinen Kollegen Björn Fath, Felix Bleimund und Dr. Moritz Vaillant, welche gemeinsam mit mir an den beiden genannten Forschungsprojekten gearbeitet haben und die mit ihren Beiträgen selbst einen großen Anteil an dieser Arbeit mitgestaltet haben. Ihre kritischen Rückfragen und gestalterischen Impulse haben dazu beigetragen, den Inhalt der Arbeit weiter zu verfeinern und den richtigen Rahmen zu finden.

Mein Dank gilt auch allen Studentinnen und Studenten, die mich in Form von Abschlussarbeiten oder HiWi-Tätigkeiten in meinen Projekten mir ihren Beiträgen unterstützt haben. Die Betreuung hat mir stets sowohl menschlich als auch fachlich große Freude bereitet und war eine immer willkommene Abwechslung im Arbeitsalltag.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Familie, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Nur durch den Rückhalt und die Unterstützung von Seite meiner Eltern war mir ein Studium und ein Promotion möglich. Vielen Dank für die Rückendeckung während meiner gesamten Ausbildung. Insbesondere möchte ich aber meiner Frau Nicole danken, die mich während der gesamten Zeit unterstützt und mir den Rücken freigehalten hat, auch wenn sie dadurch oft auf gemeinsame Zeit verzichten musste.

Karlsruhe, im Mai 2021

*Dominik Dörr*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>Danksagung</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b> . . . . .	<b>xv</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Rahmen der Arbeit . . . . .	2
1.3 Forschungsfrage und Hypothese . . . . .	3
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Fahrerassistenzsysteme</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Definition Fahrerassistenzsystem . . . . .	7
2.2 Einteilung von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	8
2.2.1 Einteilung nach den drei Ebenen von Donges . . . . .	8
2.2.2 Einteilung nach der Wirkrichtung . . . . .	9
2.2.3 Einteilung nach dem Ziel . . . . .	10
2.3 Fahrerassistenzsystem für energieeffizientes Fahren - EeDA .	11
2.3.1 Aufbau und Implementierung . . . . .	13
2.3.2 Funktion . . . . .	13
2.3.3 Testmöglichkeiten . . . . .	15
<b>3 Fahrhinweise / Mensch-Maschine-Schnittstelle</b> . . . . .	<b>21</b>
3.1 Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug Interaktion . . . . .	21
3.1.1 Informationsverarbeitung beim Menschen . . . . .	22
3.1.2 Informations- und Kommunikationsbereiche im Fahrzeug . . . . .	26

3.2	Umsetzung der Fahrhinweise . . . . .	28
3.2.1	Berechnung der Fahrhinweise . . . . .	29
3.2.2	Testmöglichkeiten für die Fahrhinweise . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Fahrstilerkennung . . . . .</b>	<b>39</b>
4.1	Grundlagen . . . . .	39
4.1.1	Fuzzy Logik . . . . .	39
4.1.2	Definition Fahrstil . . . . .	42
4.2	Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	44
4.2.1	Friedrich - Verfahren zum Anpassen eines Fahrer- Assistenzsystems an das Fahrverhalten eines Fahrers	44
4.2.2	Borrmann - Verfahren zur Fahrer-Typ-Erkennung . .	45
4.2.3	Kuhn - Verfahren zur graduellen Fahrweisenklassi- fikation und dieses anwendendes Kraftfahrzeug . . .	47
4.2.4	Ungermann - Vorrichtung zum Energiemanagement in einem Elektrofahrzeug . . . . .	48
4.2.5	Deml et al. - Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils	48
4.2.6	Wilde et al. - Fahrstil- und fahrsituationsabhängige Ladestrategie bei Hybridfahrzeugen . . . . .	50
4.2.7	Bär et al. - Szenenbasierte Fahrstilerkennung durch probabilistische Auswertung der Fahrzeugdaten . . .	51
4.2.8	Schulz et al. - Analyse des Fahrerhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategie von Assis- tenzsystemen . . . . .	52
4.2.9	Färber - Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen	53
4.2.10	Aljaafreh et al. - Driving style recognition using fuzzy logic . . . . .	54
4.2.11	Ansätze mit dem Smartphone als Sensor . . . . .	55
4.2.12	Ansätze aus der Unfallforschung . . . . .	56
4.3	Umsetzung . . . . .	58
4.3.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	59
4.4	Funktionstest in der Simulation . . . . .	73
4.4.1	Validierungsumgebung bzw. -framework . . . . .	73
4.4.2	Erster Validierungsschritt . . . . .	74
4.4.3	Zweiter Validierungsschritt . . . . .	81
4.5	Parameteroptimierung . . . . .	92
4.5.1	Vorarbeiten . . . . .	92

4.5.2	Optimierungsproblem . . . . .	94
4.5.3	Unterteilung von Optimierungsverfahren . . . . .	98
4.5.4	Design of Experiments oder Statistische Versuchs- planung . . . . .	100
4.5.5	Evolutionäre Algorithmen . . . . .	105
4.5.6	Ergebnisse der Parameteroptimierung . . . . .	108
4.5.7	Iterative Optimierung . . . . .	114
4.5.8	Fazit zur Parameteroptimierung . . . . .	115
4.6	Validierung des Fahrstilerkennungssystems anhand von Re- alfahrdaten . . . . .	115
4.6.1	Ansatz . . . . .	116
4.6.2	Ergebnisse . . . . .	118
4.7	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	118
<b>5</b>	<b>Hinweisadaption . . . . .</b>	<b>121</b>
5.1	Grundlagen . . . . .	121
5.1.1	Tolerierte Querbeschleunigung . . . . .	121
5.1.2	Reaktionszeit . . . . .	122
5.2	Konzept . . . . .	126
5.2.1	Erste Stufe: Anpassung an den Fahrstil . . . . .	126
5.2.2	Zweite Stufe: Anpassung an die Reaktionszeit . . . . .	129
5.3	Umsetzung . . . . .	133
<b>6</b>	<b>Ergebnisse . . . . .</b>	<b>137</b>
6.1	Simulator . . . . .	137
6.1.1	Hardware . . . . .	138
6.1.2	Software . . . . .	141
6.2	Probandenstudie . . . . .	142
6.2.1	Planung und Aufbau der Studie inklusive Fragebogen	142
6.2.2	Ergebnisse . . . . .	146
6.2.3	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	158
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick . . . . .</b>	<b>167</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>171</b>
<b>10</b>	<b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>175</b>

<b>11 Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>177</b>
<b>A Anhang . . . . .</b>	<b>191</b>
A.1 Parameter erster Validierungsschritt . . . . .	191
A.2 Parameter zweiter Validierungsschritt . . . . .	193
A.3 Parameter bei der Optimierung . . . . .	194
A.4 Code zum Auslesen der benötigten Größen aus der CarMa- ker Road . . . . .	195

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Formelzeichen

$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$F$	Kraft	N
$f$	Frequenz	Hz
$h$	Höhe	m
$a$	Beschleunigung	$\text{m/s}^2$
$l$	Länge	m
$m$	Masse	kg
$n$	Motordrehzahl	1/s
$r$	Kurvenradius	m
$t$	Zeit	s
$v$	Geschwindigkeit	$\text{m/s}$
$w_k$	Gewichtsfaktor	–
$x$	Längsrichtung im kartesischen Koordinatensystem	m
$y$	Querrichtung im kartesischen Koordinatensystem	m
$z$	Hochachse im kartesischen Koordinatensystem	m
$\alpha$	Steigungswinkel	rad
$\eta$	Wirkungsgrad	%

## Indizes

$akt$	aktueller Wert
$fzg$	Werte zum Fahrzeug
$ges$	Gesamtwert
$Kurve$	Kurvenparameter
$lngs$	Komponente in Längsrichtung
$max$	Maximalwert
$n, n - 1, \dots$	Nummerierung
$quer$	Komponente in Querrichtung

<i>rel</i>	relativer Wert
<i>x</i>	Komponente in x-Richtung
<i>y</i>	Komponente in y-Richtung
<i>z</i>	Komponente in z-Richtung

### Konstanten

$\rho_{Luft}$	Luftdichte	kg/m <sup>3</sup>
$f_{roll}$	Rollwiderstandsbeiwert	–
<i>g</i>	Gravitationskonstante	9,81 m/s <sup>2</sup>

### Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Active Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
CAN	Controller Area Network
DoE	Design of Experiments
EeDA	Efficient eDrive Assistant
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
GPS	Global Positioning System
HIL	Hardware-in-the-loop
HUD	Head-up-Display
IMU	Inertial Measurement Unit (Inertiale Messeinheit)
NSGA-2	Nondominated Search Algorithm 2

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Treibhauseffekt ist mit die Hauptursache für den Klimawandel. Die Bundesregierung hat sich daher zum Ziel gesetzt bis 2020 eine Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen von 40 Prozent gegenüber 1990 zu erreichen. Da der Verkehr, insbesondere der Individualverkehr, mit 17,96 Prozent im Jahr 2017 einen hohen Anteil an den Emissionen von Treibhausgasen hat [100], ist es essentiell für eine Erreichung des Zieles, dass auch die Emissionen, die durch den Verkehr verursacht werden, reduziert werden. Dies kann auf vielfältige Weise geschehen. Entweder kann die Emission der Fahrzeuge selbst verringert werden, indem entweder der Ausstoß der Fahrzeuge mit konventioneller Motorisierung durch eine Optimierung der Motoren verringert wird, oder vermehrt auf Fahrzeuge mit grundsätzlich geringerem Ausstoß wie Hybridfahrzeuge oder Elektrofahrzeuge gesetzt wird.

Die zweite Möglichkeit zur Verringerung des Ausstoßes ist die Realisierung einer energieeffizienteren Fahrweise, die zwangsläufig mit einem geringeren Ausstoß von Treibhausgasen gekoppelt ist. Diese Fahrweise kann entweder vom Fahrer selbst oder von einem Fahrerassistenzsystem, welches den Fahrer unterstützt, umgesetzt werden. Um den Fahrer dazu zu befähigen eine energieeffiziente Fahrweise zu verwirklichen, kann er entweder im Voraus geschult oder während der Fahrt durch Hinweise unterstützt werden. In dieser Arbeit soll der Fokus auf der Anleitung des Fahrers durch Fahrhinweise liegen. Diese erfolgen hier sowohl visuell als auch haptisch über ein spezielles Fahrpedal, welches eine aktive Kraftstellung ermöglicht. Dieses Fahrpedal wurde sowohl im Fahrzeug, als auch im Fahrsimulator eingesetzt, welcher im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde. Dabei sollen diese Hinweise adaptiv gestaltet werden, da angepasste Systeme in der Regel ein höhere Akzeptanz beim Nutzer erreichen und dadurch auch auf lange Sicht gesehen verwendet werden. Nur so kann ein System einen Nutzen erzielen und einen Beitrag zu der Reduzierung der Emission von Treibhausgasen leisten.

Auch der grundsätzliche Fahrstil des Fahrers hat auf der einen Seite einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz der Fahrweise, da eine sportlicher Fahrstil meist mit hohen Beschleunigungen einhergeht, was in der Regel einen negativen Einfluss auf den Energieverbrauch und somit auch auf die Emission von Treibhausgasen hat. Auf der anderen Seite kann die Kenntnis über den Fahrstil wiederum dazu verwendet werden, die Fahrhinweise an den Fahrer anzupassen, um somit die Akzeptanz für das System weiter zu erhöhen. Aus diesen beiden Gründen stellt auch die Untersuchung des Fahrstils einen nennenswerten Teil dieser Arbeit dar.

## 1.2 Rahmen der Arbeit

Die Arbeit wurde im Rahmen der Forschungsprojekte „e-generation“ und „e-volution“ erstellt. Bei den beiden Projekten handelt es sich um öffentlich geförderte Verbundprojekte mit einer großen Anzahl an Konsortialpartnern und der Porsche AG als Konsortialführer. Die Arbeitsgruppe „Automatisierung“ am Institut für Fahrzeugsystemtechnik am KIT war dabei im Teilprojekt „Energiemanagement“ eingegliedert und bearbeitete dort verschiedene Teilaufgaben. Eine davon war die Konzeption und Implementierung eines neuartigen Fahrerassistenzsystems inklusive des dazugehörigen HMIs<sup>1</sup>. Die vorliegende Arbeit ist in diese Teilaufgabe einzugliedern. Im Rahmen des Projektes fand des Weiteren eine enge Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen statt, die im Teilprojekt für die Entwicklung und Validierung eines innovativen Interaktionskonzepts verantwortlich war. Für die in dieser Arbeit beschriebenen Fahrhinweise wurden einige Konzepte gemeinsam mit der RWTH Aachen entwickelt und konzipiert. Allgemein werden in dieser Arbeit einige Abschlussarbeiten erwähnt, die vom Autor dieser Arbeit ausgeschrieben und grundsätzlich erdacht wurden, um durch die Abschlussarbeiten Unterstützung bei der Umsetzung der verschiedenen Teilaufgaben zu erhalten. Diese Arbeiten waren so konzipiert, dass die Ergebnisse in das Gesamtbild der Arbeit passen. Innerhalb der Arbeiten hatten die Studenten natürlich ihre Freiheiten, wie die die einzigen Problemstellungen, die für diese Arbeit gelöst werden mussten, angegangen wurden. Allerdings gab der Autor dieser Arbeit die grobe Richtung vor, sodass die Ergebnisse auch ins Gesamtkonzept dieser Arbeit passten.

---

<sup>1</sup> HMI - „Human Machine Interface“ oder Mensch-Maschine-Schnittstelle

## 1.3 Forschungsfrage und Hypothese

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden im Umfang des neuartigen Fahrerassistenzsystems eine pilotierte Längsführung und dazu passende Fahrhinweise entwickelt. Diese Hinweise sollen den Fahrer bei der Realisierung einer energieeffizienten Fahrweise unterstützen. Wenn der Fahrstil des Fahrers bekannt ist und wenn die Reaktionszeiten des Fahrers auf bereits gegebene Hinweise gemessen wurde, können die Hinweise basierend auf diesen beiden Parametern adaptiert werden.

Im Rahmen der Arbeit soll die Frage geklärt werden, ob es sinnvoll ist, Fahrhinweise im Laufe der Fahrt anzupassen. Die Anpassung soll dabei dazu führen, dass die Hinweise im Laufe der Fahrt immer besser an den Fahrer und seine Reaktion angepasst sind und dadurch besser zur vorliegenden Situation passen. Dadurch könnte die Akzeptanz des Fahrer erhöht werden und somit zu einer besseren Nutzung des Systems führen.

Die forschungsleitende Hypothese lautet: „Durch Kenntnis über die durchschnittliche Reaktionszeit des Fahrers auf vorausgegangene Fahrhinweise lassen sich zukünftige Hinweise an diese Reaktionszeit anpassen, indem der Anzeigzeitpunkt passend verschoben wird. Der Anzeigzeitpunkt beschreibt hierbei den Zeitpunkt, zu dem entsprechende Hinweise, entweder visuell, akustisch oder haptisch an den Fahrer übermittelt wird. Durch diese Anpassung kann die Wirksamkeit der Fahrhinweise sowohl in objektiver als auch in subjektiver Hinsicht verbessert werden.“ Objektives Kriterium kann dabei zum Beispiel der Unterschied zwischen der vorausberechneten und der tatsächlichen Geschwindigkeit, mit der der Fahrer bei einer Situation ankommt sein. Subjektive Kriterien können vom Fahrer abgefragt werden, in wie weit der Fahrer die Hinweise als hilfreich erachtet oder wie gewillt er ist, diese Hinweise zu befolgen. Zusätzlich wird folgende Forschungsfrage im Rahmen dieser Arbeit beantwortet: „Verbessert sich durch die Anpassung der Hinweise im Verlauf einer Fahrt an die gerade vorliegende tatsächliche Reaktionszeit des Fahrers deren objektiv messbare Wirkung?“ Die Hypothese und die zuvor erwähnte Forschungsfrage sollen in einer Studie mit Probanden untersucht werden.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 werden zunächst Fahrerassistenzsysteme definiert und anhand verschiedener Kriterien in Klassen eingeteilt. Anschließend wird das im Rahmen der oben beschriebenen Forschungsprojekte entwickelte Fahrerassistenzsystem beschrieben und der Aufbau und die Umsetzung dieses Systems näher beschrieben. Außerdem werden die Testmöglichkeiten für das entwickelte Fahrerassistenzsystem dargelegt.

Das Kapitel 3 beschreibt die Mensch-Maschine-Schnittstelle. Als Vorbereitung wird zunächst auf die Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug Interaktion eingegangen. Dabei wird die Informationsverarbeitung beim Menschen mit den verschiedenen Sinneskanälen näher beleuchtet. Anschließend werden die Kommunikationsbereiche im Fahrzeug genauer betrachtet, bevor die Umsetzung der Hinweise für das in Kapitel 2 beschriebene Fahrerassistenzsystem detailliert erklärt wird. Dabei werden auch hier die Testmöglichkeiten berücksichtigt.

In Kapitel 4 wird zunächst der Begriff Fahrstil für diese Arbeit definiert und im Folgenden die Fuzzy Logik, welche hier für die Klassifizierung des Fahrstils benutzt wird, erklärt. Im Anschluss daran bekommt der Leser einen Überblick über den Stand der Technik bei der Fahrstilerkennung. Dann wird die Umsetzung der Fahrstilerkennung mit Hilfe der Fuzzy Logik beschrieben und anschließend der Funktionstest in der Simulation dargestellt. Ein Verfahren zur Optimierung der Parameter wird ebenso beschrieben wie eine Validierung der Fahrstilerkennung anhand von Daten aus realen Testfahrten.

Nachdem in Kapitel 4 der Fahrstil ermittelt wurde, werden in Kapitel 5 die Hinweise aus Kapitel 3 an den Fahrstil und die Reaktionszeit des Fahrers angepasst. Dafür werden zuerst die Grundlagen, wie beispielsweise die Reaktionszeit beim Menschen, dargelegt. Im Anschluß folgt die Beschreibung des Konzepts und die Implementierung einer zweistufigen Adaption.

Im nächsten Kapitel 6 werden die Ergebnisse dieser Arbeit dargestellt. Diese wurden in einer Probandenstudie ermittelt. Zuerst wird der Simulator, der für diese Probandenstudie entwickelt und aufgebaut wurde mit seiner Hard- und Software beschrieben. Danach folgt die Konzeption und Durchführung der Probandenstudie. Das Kapitel wird dann mit den Ergebnissen selbst und einer Interpretation dieser Ergebnisse abgeschlossen.

Im vorletzten Kapitel wird die Arbeit zusammengefasst, bevor im letzten Kapitel ein Ausblick auf weitere mögliche Erweiterungen der vorgestellten

Hinweise und weitere interessante Forschungsfragen in diesem Zusammenhang gegeben werden.



## 2 Fahrerassistenzsysteme

Das statistische Bundesamt hat für Deutschland im Jahr 2018 insgesamt 308.721 Verkehrsunfälle mit Personenschäden registriert. Dabei konnten über 88% der Unfälle auf eine Fehlverhalten des Fahrzeugführers als Unfallursache zurückgeführt werden [98]. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, den Fahrer durch Systeme bei der Ausführung seiner Fahraufgabe zu unterstützen, um so zum einen die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen und gleichzeitig den Komfort des Fahrers zu verbessern. Die Unterstützung sollte vor allem in den Bereichen stattfinden, für die der Mensch auf Grund seiner Fähigkeiten nur bedingt geeignet ist. Dies sind zum Beispiel das Einschätzen von Geschwindigkeiten und Entfernungen, vor allem wenn die Sicht eingeschränkt ist, lang anhaltendes Regeln von Geschwindigkeit, Spur und Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, aber auch das schnelle und sichere Handeln in plötzlich auftretenden, unübersichtlichen Verkehrssituationen [54].

In diesem Kapitel soll der Begriff „Fahrerassistenzsysteme“ definiert werden und Möglichkeiten zur Einordnung von Fahrerassistenzsystemen dargestellt werden. Anschließend wird beschrieben, wie eine energieeffiziente Fahrweise mit Fahrerassistenzsystemen unterstützt werden kann. Dabei wird eine spezielle Ausprägung für ein solches Fahrerassistenzsystem im Detail beschrieben.

### 2.1 Definition Fahrerassistenzsystem

Laut Duden hat das Wort „Assistenz“ auch die Synonyme „Beistand“ oder „Beihilfe“ [27]. Ein Fahrerassistenzsystem wäre somit ein technisches System, welches dem Fahrer bei der Erfüllung seiner Fahraufgabe bzw. beim Führen eines Kraftfahrzeuges Beistand oder Beihilfe leistet. Legt man diese Definition zu Grunde, wären demnach auch ein Tachometer, ein Scheibenwischer oder sogar der elektrische Anlasser als Fahrerassistenzsysteme zu verstehen, da alle diese Systeme den Fahrer in irgendeiner Art und Weise unterstützen. Heutzutage gehören diese technischen Systeme allerdings zur

Grundausstattung eines Fahrzeuges. Darum kommt hier die Forderung nach einer etwas spezifischeren Definition für die in dieser Arbeit relevanten Fahrerassistenzsysteme auf.

In ihrem Beitrag [25] beschreiben Donner et al. sogenannte „fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme“ (Advanced Driver Assistance Systems, kurz ADAS). Diese können mit Hilfe von Sensoren die Fahrzeugumgebung erfassen und auswerten. Außerdem besitzen sie abhängig von der unterstützten Fahraufgabe eine komplexe Signalverarbeitung.

Bei der Erfassung der Fahrzeugumgebung unterscheidet Knoll [54] bei der Einteilung der Fahrzeugrundumsicht fünf verschiedene Bereiche, die von unterschiedlichen Sensoren abgedeckt werden können. Somit ist eine Erfassung aller für die Fahraufgabe relevanten Bereiche möglich. Eine genaue Beschreibung der Bereiche und der dazugehörigen Sensoren ist in [54] und [50] zu finden. Durch Kenntnisse über die Fahrumgebung und die Verarbeitung der Daten ist es dem ADAS möglich, den Fahrer durch Informieren, Warnen oder durch aktives Eingreifen in die Steuerung des Fahrzeuges bei der Erfüllung seiner primären Fahraufgabe zu unterstützen und somit den Komfort und die Sicherheit beim Fahren zu erhöhen.

## 2.2 Einteilung von Fahrerassistenzsystemen

Fahrerassistenzsysteme bzw. Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) lassen sich auf unterschiedliche Art und Weise systematisch in Klassen einteilen. Mögliche Unterteilungen sollen in diesem Abschnitt dargestellt werden.

### 2.2.1 Einteilung nach den drei Ebenen von Donges

Donges unterteilt die Fahraufgabe hierarchisch in drei wesentlichen Bestandteile [24]. Diese Ebenen sind die *Navigation*, die *Bahnführung* und die *Stabilisierung*. Auch die Fahrerassistenzsysteme können je nach ihrer Aufgabe diesen einzelnen Ebenen zugeordnet werden.

Die Navigation beschreibt hierbei die Wahl einer passenden Fahrtroute aus dem zur Verfügung stehenden Straßennetz und die Abschätzung der für diese Route benötigten Fahrdauer [110]. Der Fahrer prüft durch eine Überwachung markanter Streckenmerkmale punktuell die Korrektheit der Navigation. Liegt eine Abweichung von der geplanten Fahrtroute vor oder

registriert der Fahrer Verkehrsstörungen oder -behinderungen durch Unfälle, Baustellen oder eine Überlastung von Teilstrecken, leitet er korrigierende Maßnahmen ein, die zu einer Veränderung der aktuellen Routenplanung führen können. Als Haupt-Assistenzsystem ist in diesem Fall natürlich das Navigationssystem zu nennen, welches den Fahrer bei genau diesen Aufgaben unterstützen kann.

Die Bahnführungsaufgabe erfordert vom Fahrer ein vorausschauendes Verhalten. So muss er aus der vorausliegenden Verkehrssituation und dem geplanten Fahrverlauf für ihn als sinnvoll erachtete Führungsgrößen wie Sollgeschwindigkeit, Sollabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und die Sollspur antizipieren. Diese abgeschätzten Größen setzt er dann im Sinne einer Steuerung um, indem er längs- und querdynamische Fahrmanöver ausführt [110]. Auf dieser Ebene kann eine Vielzahl von ADAS den Fahrer unterstützen. So kann der Tempomat bei der Regelung der Geschwindigkeit helfen oder ein Abstandsregeltempomat (ACC) bei der Einhaltung des Abstandes zum Vordermann. Diese beiden Systeme unterstützen den Fahrer bei längsdynamischen Manövern. Ein Spurhalteassistent kann bei der Bahnführung unterstützen und hilft somit dem Fahrer bei der Ausführung von querdynamischen Fahrmanövern.

Die Aufgabe der Stabilisierung ist es, das Fahrzeug im Sinne einer Regelung durch gezielte Eingriffe wie Lenkbewegungen oder Bremsingriffe in einem physikalisch stabilen Fahrzustand zu halten. Nur dann können die Vorgaben aus der Bahnführung umgesetzt werden. Auf dieser Ebene können Systeme wie ABS oder ESP den Fahrer, bei seiner Aufgabe das Fahrzeug stabil zu halten, unterstützen.

### **2.2.2 Einteilung nach der Wirkrichtung**

Fahrerassistenzsysteme lassen sich außerdem nach ihrer Wirkrichtung einteilen. FAS können dabei sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung arbeiten und den Fahrer somit bei längs- oder querdynamischen Fahrmanövern unterstützen. Allerdings gibt es auch Systeme, die in beide Richtungen wirksam sind oder auch Systeme, die sich gar nicht in eine Kategorie einordnen lassen, weil sie entweder keine explizite Wirkrichtung haben oder das System keine Auswirkung auf die Fahrdynamik hat.

Unterstützung bei der Längsdynamik liefern beispielsweise:

- Tempomat

- Abstandsregeltempomat (ACC)
- Notbremsassistent
- modellprädiktive Optimierung des Geschwindigkeitsverlaufs
- ...

Bei querdynamischen Manövern kann der Fahrer von folgenden Systemen unterstützt werden:

- (aktiver) Spurhalteassistent
- Spurwechselaassistent
- ...

Systeme, die beiden Kategorien zugeordnet werden können, sind teilautonome Systeme, die Teile der Längs- und der Querverführung übernehmen. Systeme, die sich nicht in diese Kategorien einordnen lassen sind:

- (aktive) Einparkhilfen
- Navigationssystem
- Fernlichtassistent
- ...

Diese Liste ist allerdings nicht vollständig und es gibt weitere Assistenzsysteme, die sich bei dieser Kategorisierung nicht eindeutig zuordnen lassen.

### **2.2.3 Einteilung nach dem Ziel**

Ein dritte mögliche Kategorisierung von Fahrerassistenzsystemen ist eine Einteilung nach ihrem Ziel. So kann ein Fahrerassistenzsystem entweder einer erhöhten Fahrsicherheit dienen, den Komfort für den Fahrer erhöhen oder den Fahrer bei einer energieeffizienteren Fahrweise unterstützen. Die Einteilung in diese drei Kategorien ist allerdings nicht exklusiv, sondern ein Fahrerassistenzsystem kann auch gleichzeitig mehreren Klassen zugeordnet werden. Während Systeme wie ABS oder ESP eindeutig dem Ziel einer Erhöhung der Fahrsicherheit zugeordnet werden können, ist diese Zuordnung

für komplexe Systeme wie dem Abstandsregeltempomat (ACC) nicht mehr ganz so eindeutig. Dieses System wurde zwar ursprünglich als Komfortsystem entwickelt, führt jedoch durch die Einhaltung des Abstandes zum Vordermann auch zu einer Erhöhung der Fahrsicherheit und kann durch eine gleichmäßige Fahrweise ohne starke Beschleunigungen auch zu einer energieeffizienteren Fahrweise beitragen.

## **2.3 Fahrerassistenzsystem für energieeffizientes Fahren - EeDA**

Fahrerassistenzsysteme, die auf eine Verbesserung der Energieeffizienz abzielen, können sehr unterschiedlich sein. Da der Fahrer normalerweise für die Steuerung des Fahrzeugs verantwortlich ist, besteht der erste Ansatz darin, den Fahrer dazu zu bringen, die Fahraufgabe energieeffizienter zu absolvieren. Dies kann zum Einen durch Schulungen geschehen, welche jedoch kein Fahrerassistenzsystem darstellen. Diese Schulungen können zwar eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz beim Fahrer zur Folge haben, sind aber noch nicht sehr weit verbreitet.

Eine zweite Möglichkeit ist die Motivation des Fahrers durch Feedback zu seinem bisherigen Fahrverhalten. So kann dem Fahrer signalisiert werden, in welchen Situationen er energieeffizient unterwegs war und in welchen Situationen er seine Fahrweise in Hinblick auf die Energieeffizienz hätte verbessern können. Solche Systeme sind mittlerweile bei vielen Hybrid- und Elektrofahrzeugen in Serie verfügbar. Teilweise ist auch eine nachträgliche Auswertung über Apps auf dem Smartphone möglich.

Die dritte Möglichkeit ist, dem Fahrer explizite Hinweise bzw. Anweisungen zu geben, wie er in der aktuellen oder bei kommenden Fahrsituationen sein Verhalten anpassen kann, um das Fahrzeug energieeffizient zu bewegen. Eine sehr einfache Art solcher Hinweise sind Schalthinweise, wie sie heutzutage bei vielen Fahrzeugen angezeigt werden. Dabei wird dem Fahrer über Hinweise im Kombiinstrument signalisiert, dass er hochschalten soll oder in welchem Gang er in der aktuellen Fahrsituation fahren sollte, um die vorliegende Situation energieeffizient zu absolvieren. Auch die Fahrhinweise, die in dieser Arbeit im folgenden Kapitel 3 *Fahrhinweise* beschrieben werden, zielen darauf ab, den Fahrer in seinem Verhalten zu beeinflussen und ihm so eine energieeffizientere Fahrweise zu ermöglichen.

Der anderer Ansatz für Fahrerassistenzsysteme, die auf eine verbesserte Energieeffizienz abzielen, ist der, den Fahrer aus dem Steuerkreis des Fahrzeuges zu entfernen und die Steuerung des Fahrzeugs, insbesondere die Längsführung, automatisch zu gestalten. Dafür werden von den entsprechenden Steuergeräten energieeffiziente Geschwindigkeitsverläufe für die vorausliegende Fahrtstrecke berechnet und über die im Fahrzeug vorhandene Aktorik eingeregelt. Eine prominente Umsetzung eines solchen Systems ist das System *InnoDrive* von Porsche, welches serienmäßig im Porsche Panamera angeboten wird [80]. Es gibt jedoch noch andere Umsetzungen von sogenannten „Eco-ACC-Systemen“.

Das im Rahmen der Forschungsprojekte „e-generation“ und „e-evolution“ entwickelte Fahrerassistenzsystem EeDA verbindet die beiden genannten Ansätze zur Umsetzung einer energieeffizienten Fahrweise. Die Abkürzung EeDA steht für „Efficient eDrive Assistant“. Dabei handelt es sich um ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem, welches zwei verschiedene Modi besitzt. Die beiden Modi sind inklusive Beschreibung in Abbildung 2.1 dargestellt. Dabei setzt jeder Modus einen der beiden oben genannten Ansätze um.

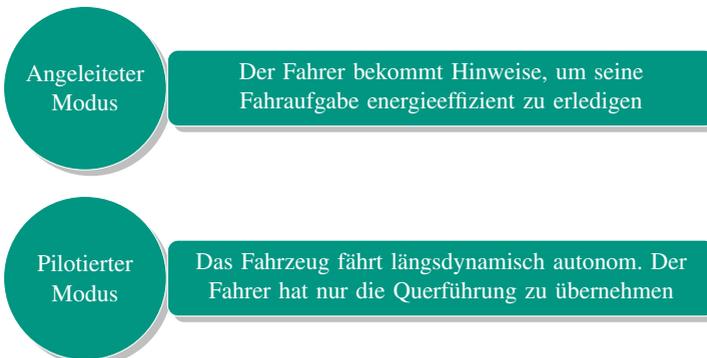


Abbildung 2.1: Die zwei Modi des „Efficient eDrive Assistant“

Die Hinweise, die der Fahrer bekommt um seine Fahraufgabe energieeffizient zu erledigen, sind optischer und haptischer Natur. Im folgenden Kapitel 3 *Fahrhinweise* wird genauer auf die Gestaltung und die Umsetzung dieser Hinweise eingegangen. In beiden Modi basiert die Planung des Geschwindigkeitsverlaufs auf hoch genauen Kartendaten, die dem System vom Navigationssystem zur Verfügung gestellt werden.

### 2.3.1 Aufbau und Implementierung

Das Fahrerassistenzsystem wurde in Matlab/Simulink implementiert. Für die Anwendung im Fahrzeug und am HIL-Prüfstand wurde es mit Hilfe des Matlab-internen Compilers in maschinenlesbaren C-Code übersetzt. Intern wurden für die Funktionsentwicklung überwiegend Embedded Matlab Blöcke innerhalb von Simulink verwendet. Das Fahrerassistenzsystem setzt sich aus mehreren Teilfunktionen zusammen, die innerhalb von Simulink in einzelnen Blöcken gekapselt sind. Der Aufbau ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

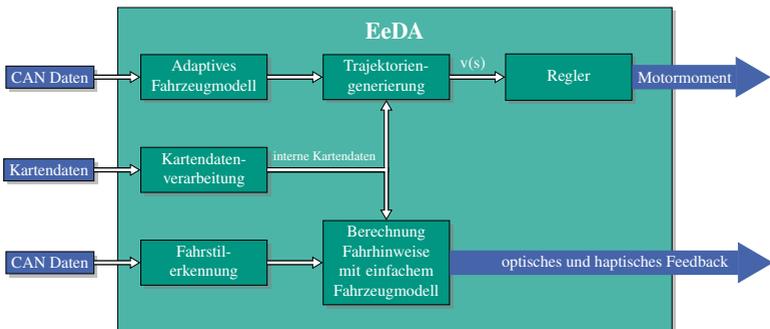


Abbildung 2.2: Aufbau des „Efficient eDrive Assistant“

Dabei beschreibt die obere Hälfte der Grafik den pilotierten Modus und die untere Hälfte den angeleiteten Modus. Die Funktionen der beiden Modi werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

### 2.3.2 Funktion

Die Funktionalität der beiden Modi des EeDA soll im Folgenden beschrieben werden. Dabei wird der pilotierte Modus nur kurz beschrieben, da der Autor dieser Arbeit nicht für die Umsetzung des pilotierten Modus zuständig war. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem angeleiteten Modus. Dieser wird zunächst grob skizziert und im Anschluss in den folgenden Kapiteln genauer erläutert.

## **Pilotierter Modus**

Mit Hilfe von Daten vom CAN-Bus des Fahrzeuges wird ein implementiertes Fahrzeugmodell während der Fahrt ständig angepasst. Als Beispiel für angepasste Parameter seien hier die Fahrzeugmasse und der Rollwiderstand genannt. Eine Übersicht, welche Parameter geschätzt werden und auf welche Weise dies geschieht, ist in dem Artikel von Rhode et al. [85] zu finden. Die im Modell geschätzten Parameter dienen dazu, die Trajektoriengenerierung im nächsten Schritt zu verbessern. Anhand der vorliegenden Kartendaten wird bei der Trajektoriengenerierung ein Geschwindigkeitsverlauf über der Strecke  $v(s)$  geplant. Dabei können verschiedene Ansatzfunktionen (Polynome oder Splines) verwendet werden und zusätzlich verschiedene Optimierungen bzgl. Energieverbrauch oder Durchschnittsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. In [82] wird beispielsweise ein allgemeines Optimierungsproblem mit Hilfe der verschiedenen Fahrwiderstände formuliert und mittels dynamischer Programmierung gelöst.

Im letzten Schritt wird die berechnete Trajektorie mit Hilfe eines Reglers eingeregelt. Der Regler liefert als Steuergröße das Gesamtmotorsollmoment, welches im Anschluss durch die Motorsteuerung noch plausibilisiert ggf. noch aufgeteilt und dann an die elektrischen Maschinen des Fahrzeugs weitergegeben wird. Das Moment wird dabei so gewählt, dass das Fahrzeug bei exakter Einstellung des gewünschten Moments der berechneten Geschwindigkeitstrajektorie folgt.

Im pilotierten Modus bekommt der Fahrer zusätzlich Hinweise zur nächsten vorliegenden Situation, damit er nachvollziehen kann, was das System als nächstes tut und er sich darauf einstellen kann. Dadurch kann die Akzeptanz des Systems durch den Fahrer möglicherweise verbessert werden.

## **Angeleiteter Modus**

Beim angeleiteten Modus werden im ersten Schritt CAN-Bus Daten dazu verwendet, den Fahrstil des Fahrers zu klassifizieren, Einzelheiten dazu sind im Kapitel 4 zu finden. Der Fahrstil kann im Späteren dazu verwendet werden, die Fahrhinweise, welche im nächsten Schritt generiert werden, besser an den Fahrer anzupassen, um dadurch ggf. die Akzeptanz des Fahrers für die Hinweise, bzw. das System, zu verbessern.

Die detaillierte Berechnung und Darstellung der Hinweise wird im Kapitel 3 beschrieben und daher hier nur kurz erläutert. Bei der Generierung

der Hinweise wird zuerst die nächste relevante Situation aus den Kartendaten extrahiert. Außerdem wird eine empfohlene Handlung für diese Situation berechnet. Diese beiden Informationen bekommt der Fahrer allerdings in beiden Modi angezeigt. Für den angeleiteten Modus werden zusätzlich noch der Abstand, bis die empfohlene Handlung ausgeführt werden soll und ein Ausrollhinweis berechnet.

### **2.3.3 Testmöglichkeiten**

Um die Funktionalitäten des EeDA früh in der Entwicklungsphase testen zu können, wurden verschiedene Testmöglichkeiten implementiert. Dabei wurden Testmöglichkeiten auf verschiedenen Ebenen des V-Modells geschaffen. Das V-Modell beschreibt dabei den Prozess zur Entwicklung und zum Testen von Software. Beschrieben wird es unter anderem in [88].

#### **Model-in-the-loop**

Beim „Model-in-the-loop“ Test handelt es sich um einen Test auf der untersten Ebene im V-Modell. Dabei wird eine Softwarekomponente oder Teile davon unabhängig von anderen Komponenten getestet. Im Falle des EeDA handelt es sich dabei um Teile von Softwaremodulen bis hin zu ganzen Blöcken, wie der Fahrstilerkennung oder der Trajektoriengenerierung. Diese wurden von den Entwicklern selbst innerhalb der Entwicklungsumgebung Matlab/Simulink getestet, indem die Software mit geeigneten Daten beaufschlagt und das Ergebnis begutachtet wurde. Da der Entwickler selbst den Test durchführte, wusste er auch, welche Ergebnisse zu erwarten waren. So konnte direkt ein Soll-Ist-Vergleich vorgenommen und ggf. direkt Änderungen am Code eingearbeitet werden.

#### **Software-in-the-loop**

Beim „Software-in-the-loop“ Test werden komplexe Softwareblöcke im Ganzen getestet. Im Falle des EeDA sind das die einzelnen Blöcke, wie die Fahrstilerkennung oder die Trajektoriengenerierung, bzw. der gesamte EeDA als Softwareblock. Im Entwicklungsprozess des EeDA geschah dies zum einen in Matlab/Simulink direkt durch den Entwickler mit geeigneten Eingangsdaten, die manuell erstellt wurden.

Zum anderen wurde jedoch auch eine Testmöglichkeit mit der Fahrzeug-simulationsumgebung CarMaker der Firma IPG realisiert. Dafür wurde der gesamte EeDA als Plugin-Modell des Typs *Vehicle Control* realisiert und damit direkt in die ausführbare Datei von CarMaker kompiliert. Eine Umsetzung über *CarMaker for Simulink* wäre grundsätzlich auch möglich gewesen, jedoch bietet die Variante über die Plugin-Modelle einen erheblichen Geschwindigkeitsvorteil bei der Ausführung (bis zu Faktor zehn). Dies erlaubt dann auch eine Ausführung im Hardware-in-the-loop Kontext (siehe weiter unten), in der Echtzeitfähigkeit eine zwingende Voraussetzung ist.

**Kartendaten** Ein kritischer Punkt bei der Umsetzung des „Software-in-the-loop“ Tests für den EeDA war die Bereitstellung der geeigneten Kartendaten. Diese werden später im Fahrzeug oder am Hardware-in-the-loop-Prüfstand von einem Navigationsgerät oder einem Car-PC zur Verfügung gestellt. Beide Möglichkeiten sind aber für den „Software-in-the-loop“ Test nur schwer bis gar nicht umzusetzen. Für den „Software-in-the-loop“ Test musste also eine Alternative gefunden werden. Die Strecke, die in CarMaker hinterlegt ist (CarMaker Road) enthält alle relevanten Informationen, die auch in den hochgenauen Kartendaten hinterlegt sind (Kurvenkrümmungen, Geschwindigkeitslimits und Steigungen). Die können mit Hilfe von C-Code ausgelesen und in einzelnen CarMaker Variablen gespeichert werden. Der entsprechende C-Code zum Auslesen der einzelnen Größen ist im Anhang A.4 zu finden. Nachdem die einzelnen Größen für jeden Meter auf einem Horizont von 1000 Metern ausgelesen wurden, stehen diese Werte CarMaker intern als Variablen zur Verfügung. Für jedes der drei Streckenattribute Kurvigkeit, Steigung und Geschwindigkeitslimit existieren somit 1000 Variablen. Um für den EeDA letztendlich das gleiche Format an Kartendaten zur Verfügung zu haben, wie es im Fahrzeug oder am Hardware-in-the-loop Prüfstand der Fall ist, müssen die einzelnen Variablen noch zu Vektoren kombiniert werden. Dies erfolgt innerhalb eines Simulink-Blocks, der auf Grund der hohen Anzahl an gleichartigen Blöcken innerhalb, mit einem Skript automatisiert erstellt wurde.

### **Hardware-in-the-loop**

Für einen realitätsnahen Integrations- und Funktionstest der gesamten Software wurde ebenfalls im Rahmen der Projekte „e-generation“ und „e-volution“

ein Hardware-in-the-loop Prüfstand aufgebaut. Er basiert auf dem Echtzeitsystem XPack4 mit der Simulationsumgebung CarMaker von IPG.

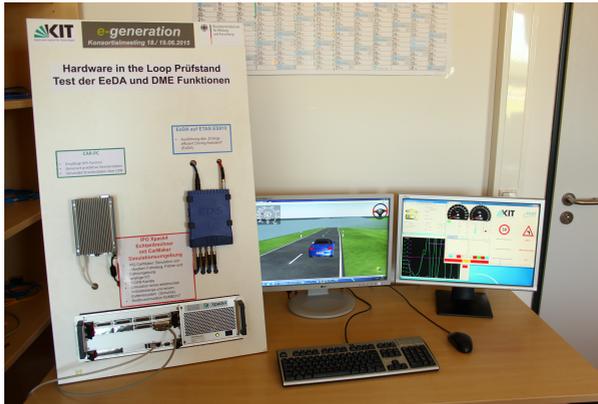


Abbildung 2.3: Foto des Hardware-in-the-loop Prüfstands

Abbildung 2.3 zeigt ein Foto des Prüfstands. Links befindet sich der eigentliche Prüfstand mit dem Echtzeitrechner XPack4 (unten), dem CarPC für die Kartendaten (links) und dem Prototypensteuergerät ES910 der Firma ETAS (rechts).

Die Struktur des Hardware-in-the-loop Prüfstands ist in einem Blockdiagramm in Abbildung 2.4 dargestellt. Zentrales Element ist hierbei der Echtzeitrechner, auf dem das Fahrzeugmodell inklusive Antriebsstrangmodell, das Umweltmodell und das Fahrermodell simuliert werden. Mit dem Echtzeitrechner ist über eine Ethernet-Verbindung der Host-PC verbunden, der die Teststeuerung durchführt. Über jeweils einen separaten CAN-Bus ist der Echtzeitrechner außerdem mit dem Prototypensteuergerät ES910 der Firma ETAS, einem Car-PC und in der ursprünglichen Ausbaustufe noch mit einem Motorsteuergerät verbunden. Somit wurden am HIL die gleichen Komponenten verwendet, wie sie auch für die Integration der Algorithmen im Fahrzeug zum Einsatz kamen. Dies erlaubte eine sehr gute Durchgängigkeit der Tests. Auf dem Prototypensteuergerät kommt dabei die EeDA-Software zur Ausführung, nachdem sie vorher mit Realtime Workshop aus Simulink heraus in C-Code kompiliert wurde. Der Car-PC ist dafür verantwortlich die digitalen Kartendaten für die Simulation zur Verfügung zu stellen. Das Motorsteuergerät nimmt eine optimierte Momentenverteilung auf die zwei

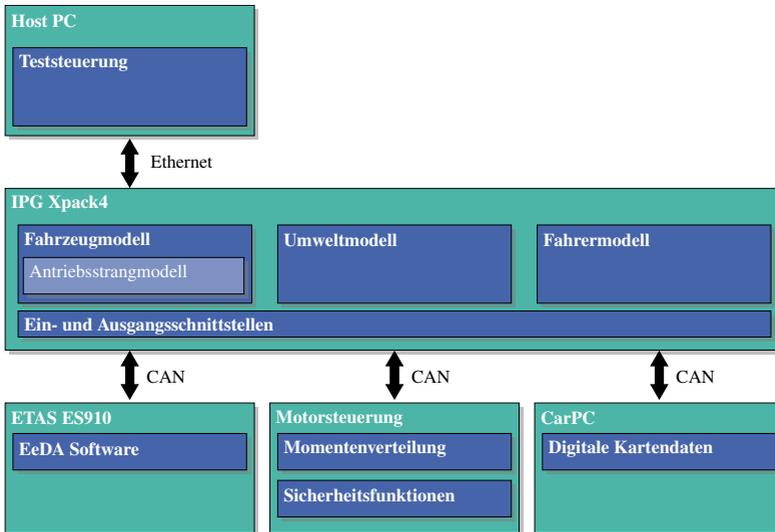


Abbildung 2.4: Struktur des Hardware-in-the-loop-Prüfstands im Blockdiagramm

E-Maschinen vor und überprüft bzw. plausibilisiert das angeforderte Moment anhand verschiedener Sicherheitsfunktionen.

### Fahrzeugtest

Der EeDA wurde ebenfalls im Versuchsfahrzeug getestet. Dazu standen im Projekt auf elektrischen Antrieb umgebaute Porsche Boxster zur Verfügung. Diese verfügten, wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, über das gleiche Prototypensteuergerät ES910, wie es auch am HIL Prüfstand verwendet wurde.

Durch den sehr realistischen HIL-Test und die damit erreichte Durchgängigkeit konnte die Inbetriebnahme sehr schnell und problemlos erfolgen. Im Fahrzeug wurden beide Modi getestet. Der angeleitete Modus war im Fahrzeug jedoch nur als Basisversion, ohne Fahrstilerkennung und Adaption, ausgeführt. Diese Basisversion war für einen prinzipiellen Test dieses Modus im Fahrzeug ausreichend. Die weiteren Untersuchungen bzgl. der Akzeptanz, der Reaktionszeit und weiteren Größen erschienen im Fahrzeug als nicht sinnvoll, da der Fahrer im Fahrversuch vielen anderen Einflussgrößen

ßen ausgesetzt ist und somit keine reproduzierbaren Versuchsbedingungen zu realisieren sind. Für diese Test wurde daher der Fahrsimulator verwendet, der auch im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde und in Kapitel 6 näher beschrieben wird. Dieser erlaubt im Gegensatz zum Fahrversuch reproduzierbare Randbedingungen, weshalb diese Variante für die weiteren Untersuchungen als zielführender erachtet wurde.



## 3 Fahrhinweise / Mensch-Maschine-Schnittstelle

Im folgenden Kapitel soll dem Leser ein Grundverständnis für die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Fahrzeug mitgegeben werden. Im ersten Moment denkt man dabei wahrscheinlich an die Pedalerie und das Lenkrad. Dies sind die Schnittstellen, mit denen der Fahrer die Steuerung des Fahrzeugs vornimmt. Aber auch die Schnittstellen, mit denen das Fahrzeug dem Fahrer seinen Status mitteilt, gehören zur Mensch-Maschine-Schnittstelle. Im einfachsten Falle sind dies beispielsweise der Tachometer oder die Tankfüllstandsanzeige.

Heutzutage werden Fahrzeuge immer komplexer und die Anzahl der Systeme, dazu gehören auch Fahrerassistenzsysteme, nimmt immer weiter zu. Dies ist aber gleichbedeutend mit einer immer weiter steigenden Informationsdichte für den Fahrer. Diese steigende Informationsdichte muss beherrscht und bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle berücksichtigt werden. Zusätzlich muss dabei die vorliegende Fahrsituation berücksichtigt werden, damit der Fahrer auch die für die Situation relevanten Informationen zur Verfügung gestellt bekommt.

Nach der Einführung in die Mensch-Maschine-Schnittstelle wird anschließend die, im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte, Umsetzung der Fahrhinweise inklusive der dazugehörigen Testmöglichkeiten beschrieben.

### 3.1 Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug Interaktion

Die Hauptaufgabe eines Fahrers in seinem Fahrzeug ist und bleibt die Bewältigung der Fahraufgabe. Wie schon im Kapitel 2 erwähnt, lässt sich diese Fahraufgabe auf verschiedene Art und Weise unterteilen. Bei der Aufteilung nach Donges [24] wird die Fahraufgabe in die Ebenen *Navigation*, *Bahnführung* und *Stabilisierung* unterteilt. Bei jeder Ebene der Fahraufgabe sind

für den Fahrer andere Informationen wichtig, um diese Ebene der Fahraufgabe sicher und effektiv bewältigen zu können. Bei einer Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ist es daher nicht nur wichtig, welche Informationen der Fahrer bekommt, sondern es ist ebenfalls wichtig zu analysieren, wann und vor allem auf welche Art und Weise man dem Fahrer die Informationen zur Verfügung stellt. Dabei darf der Fahrer weder über- noch unterfordert werden. Eine Unterforderung kann die Aktiviertheit des Fahrers (dieser Fachbegriff beschreibt die Aufmerksamkeit des Fahrers auf seine aktuelle Tätigkeit) reduzieren (vgl [70]). Dies kann im Falle einer benötigten Handlung durch den Fahrer anschließend zu einer höheren Reaktionszeit und somit zu einer kritischen Situation führen. Bei einer Überforderung des Fahrers ist es möglich, dass er nicht mehr alle nötigen Informationen aufnehmen kann und Informationen dadurch verloren gehen. Dadurch kann der Fahrer falsche Entscheidungen treffen, die wiederum zu kritischen Situationen führen können. Aus diesen Gründen muss sowohl eine Unter- aber auch eine Überforderung des Fahrers tunlichst vermieden werden.

### **3.1.1 Informationsverarbeitung beim Menschen**

Für die Erklärung des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Modellierung. Alle Modelle beschreiben jedoch, dass die Informationsverarbeitung beim Menschen in drei Phasen unterteilt werden kann. Die erste Phase ist hierbei die Aufnahme der Informationen. Die Informationsaufnahme kann dabei über verschiedene Sinneskanäle erfolgen. Diese werden im Abschnitt 3.1.1 im Hinblick auf die Informationsaufnahme im Fahrzeug genauer beschrieben. Die zweite Phase, auch als Kognition bezeichnet, beschreibt, wie die aufgenommenen Informationen verarbeitet und ggf. in eine Handlung umgesetzt werden. Die dritte Phase, die Informationsabgabe, beschreibt die Umsetzung der in der zweiten Phase getroffenen Entscheidungen in Handlungen. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um motorischen Handlungen.

Die einzelnen im Ingenieurbereich bekanntesten Modelle für diesen gesamten Prozess kann man in sequentielle Modelle und Ressourcenmodelle unterteilen. In sequentiellen Modellen wird der Prozess, wie der Name schon sagt, sequentiell abgearbeitet. Das bedeutet, dass die nächste Phase erst durchgeführt werden kann, wenn die vorangegangene Phase beendet ist. Im Gegensatz dazu wird in Ressourcenmodellen die Annahme verfolgt, dass der Mensch eine begrenzte Kapazität für die Erledigung von Aufgaben be-

sitzt. Diese muss auf die verschiedenen gleichzeitig ausgeführten Aufgaben aufgeteilt werden [107]. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit die beiden Modelltypen zu einem „kombinierten Stufen- und Ressourcenmodell“ ([66] und [110]) zu verknüpfen. Dies beschreibt den Informationsverarbeitungsprozess des Fahrers bei der Erfüllung seiner Fahraufgabe sehr gut, wenn man die beschränkte zur Verfügung stehende Ressourcenkapazität berücksichtigt.

### **Sinneskanäle**

Die Informationsaufnahme beim Menschen geschieht über seine sensorischen Organe. Dabei hat jedes Organ eine spezifische Empfindlichkeit und einen spezifischen Betriebsbereich. Bei der Informationsaufnahme durch den Fahrer im Fahrzeug sind fast alle Sinneskanäle des Menschen beteiligt. In der Physiologie wird zwischen folgenden Sinneswahrnehmungen unterschieden ([58], [7] und [16]):

**Visuelle Wahrnehmung (auch Sehsinn)** dient der Wahrnehmung von visuellen Reizen

**Auditive Wahrnehmung (auch Gehörsinn)** dient der Wahrnehmung von Schall

**Vestibuläre Wahrnehmung (auch Gleichgewichtssinn)** dient der Wahrnehmung von Lageveränderungen im Verhältnis zu einem Schwerfeld zur Wahrung des Gleichgewichts und der Kontrolle von Bewegungen

**Sensibilität (auch Tastsinn)** die Vereinigung von taktiler Wahrnehmung und Tiefensensibilität und dient damit der Wahrnehmung von (körperlichen) Gefühlen wie beispielsweise Berührungen, Härte oder Hitze

**Olfaktorische Wahrnehmung (auch Geruchssinn)** dient der Wahrnehmung von Riech- und Duftstoffen

**Gustatorische Wahrnehmung (auch Geschmackssinn)** dient der Wahrnehmung von chemischen Qualitäten von Nahrung

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Sinneskanäle, aus [110]

<b>Eigenschaften</b>			
<b>Sinneskanal</b>	Alternative Namensgebung	Informationsrate	Wahrnehmungsverzugszeit
Visueller Kanal	Sehsinn	sehr hoch	kurz
Auditiver Kanal	Hörsinn	mittel	mittel
Taktile Kanal	Tastsinn	niedrig	sehr kurz
Kinästhetisch-vestibulärer Kanal	Stellungs- und Bewegungssinn	niedrig	sehr kurz

Für den Fahrer sind im Fahrzeug die letzten beiden Sinne nicht relevant und sollen daher im Folgenden nicht weiter beachtet werden. Jeder einzelne Sinneskanal verfügt über eine unterschiedliche Informationsrate und eine unterschiedliche Wahrnehmungsverzugszeit. Diese beiden Aspekte sind in Tabelle 3.1 qualitativ dargestellt.

Es ist zu bemerken, dass der visuelle Kanal mit einer sehr hohen Informationsrate und einer schnellen Wahrnehmungsverzugszeit prädestiniert für einen Informationsaustausch ist. Jedoch ist dieser Kanal beim Fahrer im Fahrzeug bei der Ausführung der normalen Fahraufgabe durch die Erkennung der Situation und weitere Anforderungen schon sehr ausgelastet und sollte möglichst nicht weiter belastet werden ([48] und [95]). Alternativen sind allerdings praktisch nicht vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen dem Fahrer zusätzliche Informationen zugänglich gemacht werden, um ihn bei der Ausführung einer möglichst energieeffizienten Fahrweise zu unterstützen. Die fast völlige Auslastung der visuellen Kanals gilt es dabei zu beachten. Insbesondere dann, wenn komplexe Informationen übertragen werden sollen. Dabei könnte der Fahrer durch weitere visuelle Hinweise überfordert oder von der Fahraufgabe abgelenkt werden [46]. Der auditive Kanal ist dem visuellen Kanal sowohl in der Informationsrate, als auch in der Wahrnehmungsverzugszeit unterlegen. Beim taktilen und kinästhetisch-vestibulären Kanal sticht die sehr schnelle Wahrnehmungsverzugszeit hervor. Daher hat

sich in den vergangenen Jahren ein wachsendes Interesse an der Informationsübertragung über diesen Kanal bemerkbar gemacht ([34], [8] und [71]). Studien bestätigen dabei das hohe Potential bei der Übertragung von einfachen Informationen über den haptischen Kanal ([47] und [87]). Leider ist die Informationsrate dabei nicht sehr hoch und Informationen mit höherem Informationsgehalt sind deshalb bisher nicht über diese Kanäle übertragbar. An der Übertragung komplexerer Informationen über strukturierte taktile Techniken wird jedoch bereits geforscht. Der Vorteil des haptischen Kanals gegenüber den anderen Sinneskanälen ist, dass zum einen keine visuellen Informationen hinzukommen und haptische Signale zum anderen von Fahrern als weniger störend oder aufdringlich als akustische Signale empfunden werden ([71], [59], [97] und [33]).

Für die Kommunikation zwischen Fahrer und Maschine sind in Abbildung 3.1 die drei wichtigsten Sinneskanäle für die Fahrzeugführung dargestellt. Dabei handelt es sich um den visuellen, den auditiven und den haptischen Sinneskanal mit ihren Sendern und Empfängern, sowohl auf Mensch- als auch auf Maschinenseite. Da der kinästhetisch-vestibulärer Kanal vom Fahrer ursprünglich nur dazu genutzt wurde, Informationen über den Fahrzeug- bzw. Fahrzustand aufzunehmen, ist dies nicht unbedingt als Dialog zwischen Mensch und Maschine zu sehen. Dies ist heutzutage nicht mehr unbedingt der Fall, da mittlerweile Fahrerassistenzsysteme auf dem Markt sind, die auch diesen Kanal zur Informationsübermittlung nutzen. So können verschiedene längsdynamische Fahrerassistenzsysteme durch einen kurzen Bremsruck die Aufmerksamkeit des Fahrers auf eine Gefahrensituation lenken.

Für die Kommunikation auf dem visuellen Kanal bieten sich Displays an. Diese müssen entsprechend positioniert sein. Auf die geeignete Positionierung wird in Abschnitt 3.1.2 eingegangen.

Die Kommunikation auf dem auditiven Kanal erfolgt vom Fahrer zum Fahrzeug mittels Sprache im Falle einer umgesetzten Sprachsteuerung. Die Gegenrichtung kann ebenfalls über synthetisierte Sprache oder über Warntöne erfolgen. Bei Warntönen ist das Problem, dass sie vom Fahrer falsch zugeordnet werden können.

Die Ansteuerung des Fahrzeuges für die Bewältigung der Fahraufgabe erfolgt Stand heute ausschließlich auf dem haptischen Kanal. Dabei steuert der Fahrer das Fahrzeug über die Pedalerie mit dem Fuß und über das Lenkrad mit den Händen. Kommuniziert das Fahrzeug auch über den haptischen Kanal, wird das in der Regel „Force Feedback“ genannt. Dabei leiten be-

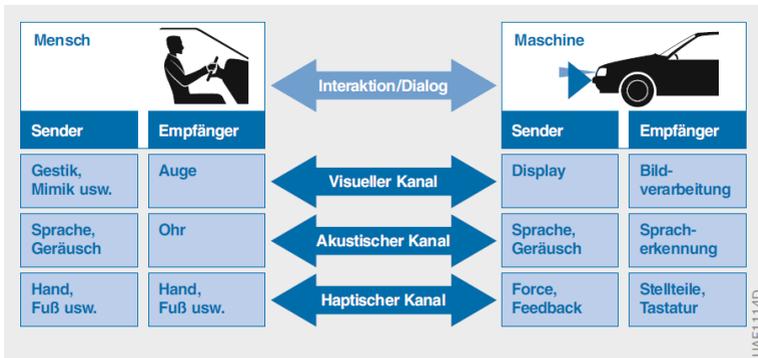


Abbildung 3.1: Interaktionskanäle zwischen Mensch und Maschine, aus [84]

stimmte Stellteile Kräfte an den Fahrer weiter, der diese dann sehr schnell wahrnimmt. Problem hierbei ist ähnlich wie beim auditiven Kanal (Warntöne) die Interpretation durch den Fahrer, welcher einem Signal eine falsche Information zuordnen kann. Zusätzlich gilt es hierbei zu beachten, dass im Fahrzeug nur der Sitz, der Gurt, das Lenkrad und die Pedale als Kontaktpunkte existieren, über die haptische Hinweise übertragen werden können.

### 3.1.2 Informations- und Kommunikationsbereiche im Fahrzeug

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der visuelle Kanal als bevorzugter Kanal für die Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug identifiziert, da er eine hohe Informationsrate mit einer schnellen Wahrnehmungsverzögerung kombiniert. Damit eine Kommunikation über diesen Kanal erfolgen kann, müssen die Informations- bzw. Kommunikationsbereiche im Sichtfeld des Fahrers liegen. In Abbildung 3.2 sind verschiedene Positionierungsmöglichkeiten für Displays im Fahrzeug dargestellt und in rot hervorgehoben. Diese sind im einzelnen:

**1-Kombiinstrument** Befindet sich am am Rand des zentralen Blickfelds des Fahrers. Daher sind alle Informationen, die primär der Fahraufgabe zuzuordnen sind, geeignet, um hier angezeigt zu werden. Der Fahrer muss allerdings seinen Blick kurz von der Straße abwenden, um die angezeigten Informationen aufnehmen zu können



Abbildung 3.2: Darstellung verschiedener Displaykonzepte im Fahrzeuginnenraum, aus [9]

- 2 - Mittelkonsole** Befindet sich zwischen Fahrer und Beifahrer und wird daher oft dazu verwendet, Informationen anzuzeigen, die für Fahrer und Beifahrer von Interesse sind, wie beispielsweise Informationen zur Navigation oder zum Entertainment.
- 3 - Windschutzscheibe** Befindet sich direkt im Blickfeld des Fahrers. Dadurch können durch ein Head-up-Display (HUD) Informationen direkt im Blickfeld eingeblendet werden, die der Fahrer dann ohne Abwendung des Blickes von der Fahraufgabe wahrnehmen kann. Dazu sind alle fahrtrelevanten Informationen geeignet, insbesondere die von vorausschauenden Systemen oder Fahrerassistenzsystemen, die sich direkt auf die Fahraufgabe beziehen.
- 4 - Fahrzeugfond** Der Fahrzeugfond ist für das Entertainment von Passagieren oder für Büroanwendungen geeignet.

Von den vier Möglichkeiten bieten sich eigentlich nur das Kombiinstrument und die Windschutzscheibe für die Darstellung der in dieser Arbeit beschriebenen Fahrhinweise an. Das Head-up-Display ist dabei am geeignetsten, da der Fahrer seinen Blick zur Aufnahme der Information nicht abwenden muss. Daher wurde für die Umsetzung am Simulator (Abschnitt 3.2) ein Ansatz gewählt, der einem Head-up-Display ähnlich ist. In den Aggregate-trägern von Porsche konnte aus Packaginggründen kein Head-up-Display verbaut werden. Dort werden die Hinweise im Kombiinstrument dargestellt (siehe Abbildung 3.3).



Abbildung 3.3: Anzeige der Hinweise im Kombiinstrument des Aggregateträgers

Zusätzlich zum visuellen Kanal werden auch Informationen über den haptischen Kanal übertragen. Hierzu gehört die Übertragung des Hinweises zum Loslassen des Gaspedals, wie er im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Dafür eignet sich der haptische Kanal am besten, da es sich bei der Information um eine einfache Information ohne großen Informationsgehalt handelt. Da das haptische Signal in diesem Fall eindeutig definiert ist, muss die zusätzliche visuelle Anzeige des Hinweises nicht wahrgenommen werden, um die vollständige Information zu erhalten. Ein weiterer Vorteil ist dabei die kurze Reaktionszeit durch den Fahrer und die nicht vorhandene Ablenkung von der Fahraufgabe durch den haptischen Hinweis.

## 3.2 Umsetzung der Fahrhinweise

In diesem Abschnitt wird die Umsetzung der Fahrerhinweise im Detail beschrieben. Dazu gehört die Berechnung der Hinweise, aber auch die Testmöglichkeiten, die implementiert wurden, um die Korrektheit der Hinweise zu überprüfen.

### 3.2.1 Berechnung der Fahrhinweise

Die Berechnung der Fahrhinweise erfolgt im entsprechenden Block im Simulink-Modell (siehe Abbildung 2.2). Zuerst wurden Situationen definiert, in denen der Fahrer Hinweise bekommen soll. Diese Situationen sind bestimmte Streckenverläufe oder bestimmte Punkte, die einen Einfluss auf die gewählte Geschwindigkeit haben können. Die zu betrachteten Situationen wurden in einem Workshop im Rahmen des Projekts „e-generation“ mit Kollegen der RWTH Aachen festgelegt. Diese sind:

- Kurven, die die Geschwindigkeitswahl einschränken
- Wechsel im gesetzlichen Geschwindigkeitslimit
- Kuppen, die die Geschwindigkeitswahl einschränken
- (Abbiegungen, die die Geschwindigkeitswahl einschränken)
- (Lichtsignalanlagen)
- (Stopp-Schild)
- (Vorfahrt achten)

Die eingeklammerten Situationen waren ursprünglich angedacht, liegen aber in der aktuellen Version der Kartendaten nicht vor und sind daher nicht umgesetzt. Diese Situationen werden aus den digitalen Kartendaten extrahiert.

Im Anschluss wird der Abstand zwischen der aktuellen Position und der nächsten relevanten Situation ermittelt.

Die *Erkennung der Kurven* wird dabei wie folgt umgesetzt: Für jeden Fahrertyp ist eine Tabelle hinterlegt, in der die tolerierte Geschwindigkeit des Fahrertyps bei einer bestimmten Kurvenkrümmung festgelegt ist. Diese Tabelle wurde für den Normalfahrer bei Testfahrten mit Experten der Porsche AG empirisch bestimmt und auf das vorliegende Fahrzeug entsprechend angepasst. Die Tabelle entspricht über den Zusammenhang

$$a_{quer} = \frac{v_{max}^2}{r_{Kurve}}$$

und

$$r_{\text{Kurve}} = \frac{1}{\kappa_{\text{Kurve}}}$$

der tolerierten Querbeschleunigung des Normalfahrers für einen bestimmten Kurvenradius bei einer angenommenen ebenen Kreisfahrt mit konstanter Geschwindigkeit.

Die so ermittelte Kurvengeschwindigkeit wird dann mit dem gesetzlichen Geschwindigkeitslimit verglichen. Dort wo die Kurvengeschwindigkeit das Geschwindigkeitslimit das erste Mal von oben schneidet, beginnt die erste relevante Kurve. Dort wo die Kurvengeschwindigkeit das Geschwindigkeitslimit das erste Mal von unten schneidet, endet die erste relevante Kurve.

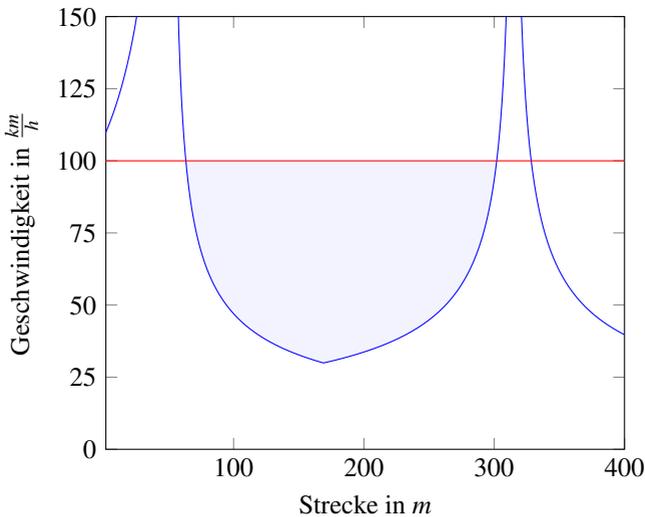


Abbildung 3.4: Verlauf des gesetzlichen Geschwindigkeitslimits (rot) und der tolerierten Kurvengeschwindigkeit (blau). Der Bereich der ersten relevanten Kurve ist hellblau markiert

Abbildung 3.4 zeigt einen möglichen Verlauf des Geschwindigkeitslimits in rot und der tolerierten Kurvengeschwindigkeit in blau auf einem Vorausschauhorizont von 400 Metern. Die erste relevante Kurve beginnt bei diesem Horizont bei 64 Metern. Das Ende der ersten relevanten Kurve ist bei 301 Metern erreicht. Der Bereich der relevanten Kurve ist hellblau markiert

Die *Erkennung von Wechseln im Geschwindigkeitslimit* ist trivial. Hierfür wird der Vektor mit den vorliegenden Geschwindigkeitslimits von vorne nach hinten auf einen Wechsel durchsucht und der erste Wechsel als nächster relevanter Wechsel ausgegeben.

Die *Erkennung von Kuppen* ist über die Sichtweite des Fahrers realisiert. Man geht davon aus, der Fahrer sitzt in einer gewissen Höhe über der Straße und blickt gerade nach vorne mit der gleichen Steigung, wie auch die Steigung der Straße am aktuellen Punkt ist. Dann kann man die Blickrichtung des Fahrers als Gerade annehmen. Dort wo sich die Gerade mit dem Straßenprofil schneidet ist die Sichtweite des Fahrers definiert. Über die Sichtweite und eine definierte maximale Bremsbeschleunigung, lässt sich dann eine Maximalgeschwindigkeit für diese Sichtweite berechnen, denn in der Straßenverkehrsordnung ist festgehalten, dass der Fahrer innerhalb seiner Sichtweite in der Lage sein muss anzuhalten. Liegt diese Maximalgeschwindigkeit für einen Punkt auf der Strecke unterhalb des Geschwindigkeitslimits, handelt es sich um eine Kuppe, die den Fahrer in der Wahl seiner Geschwindigkeit einschränkt. Diese Situation kam in den Messdaten, die in dieser Arbeit verwendet wurden, jedoch sehr selten vor.

Nachdem der Typ der nächsten relevanten Situation bestimmt wurde, wird im Anschluss der Abstand zu dieser Situation bestimmt. Da für jeden Typ die entsprechenden Abstände zur nächsten relevanten Situation für diesen Typ bereits berechnet wurden, lässt sich der Abstand zur nächsten relevanten Situation einfach dadurch bestimmen, indem man das Minimum aus diesen Werten nimmt.

Für diese nächste relevante Situation wird in der Basisversion dann die Entfernung zu dem Punkt berechnet, bei dem der Fahrer den Fuß vom Fahrrad nehmen soll, um mit der passenden Geschwindigkeit bei der Situation anzukommen. Diese Entfernung wird durch die Adaption, welche im Kapitel 5 beschrieben wird, im Nachhinein angepasst. Die Berechnung der Entfernung erfolgt durch eine Rückwärtsrechnung mit Hilfe der Fahrwiderstandsgleichung [14]. Dabei wird als Schrittweite jeweils ein Meter gewählt, da die Kartendaten und somit auch die Steigung genau in dieser Granularität vorliegen. Als Gesamtfahrwiderstand  $F_{ges}$  ergibt sich:

$$F_{ges} = F_{Steigung} + F_{Luft} + F_{Roll} + (F_{Beschl}) + F_{Reku} \quad (3.1)$$

Dabei steht  $F_{Steigung}$  in Gleichung 3.1 für den Steigungswiderstand, der sich wie folgt berechnet:

$$F_{Steigung} = m_{fzg} \cdot g \cdot \sin(\alpha).$$

Dabei beschreibt  $m_{fzg}$  die Fahrzeugmasse inklusive der Passagiere und der Zuladung.  $g$  steht für die Erdbeschleunigung und  $\alpha$  ist der Steigungswinkel.

$F_{Luft}$  steht in Gleichung 3.1 für den Luftwiderstand. Dieser bestimmt sich nach folgender Formel.

$$F_{Luft} = \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v_{rel}^2.$$

$\rho_{Luft}$  steht hier für die Luftdichte.  $c_w$  für den Strömungswiderstandskoeffizienten in Fahrtrichtung, der von der Form des Fahrzeugs abhängt.  $A$  steht für die Stirnfläche des Fahrzeugs und  $v_{rel}$  für die Relativgeschwindigkeit des Fahrzeugs in der Luft. Sie setzt sich aus der Fahrzeug- und der Windgeschwindigkeit zusammen. Bei stehender Luft ist sie mit der Fahrzeuggeschwindigkeit gleichzusetzen.

$F_{Roll}$  steht in Gleichung 3.1 für den Rollwiderstand und wird wie folgt berechnet.

$$F_{Roll} = m_{fzg} \cdot g \cdot f_{roll} \cdot \cos(\alpha)$$

$m_{fzg}$  entspricht der oben beschriebenen Fahrzeugmasse.  $g$  steht für die Erdbeschleunigung,  $f_{roll}$  steht für den (geschwindigkeitsabhängigen) Rollwiderstandsbeiwert und  $\alpha$  ist der Steigungswinkel.

$F_{Beschl}$  steht in Gleichung 3.1 für den Beschleunigungswiderstand, der hier aber vernachlässigt wird, da die aktuelle Beschleunigung über den betrachteten Meter im Mittel mit null angenommen wird, da man ja davon ausgeht, dass der Fahrer den Fuß aktuell vom Fahrpedal genommen hat und damit keine fahrzeugseitigen Antriebskräfte vorliegen.  $F_{Reku}$  steht in Gleichung 3.1 für den Widerstand der bei nicht betätigtem Fahrpedal durch die Rekuperation des elektrischen Antriebs entsteht. Dafür ist ein Kennfeld hinterlegt, da es drei Rekuperationsstufen gibt, bei denen abhängig von der Geschwindigkeit und der Stufe jeweils unterschiedliche „Rekuperations-Momente“ vom elektrischen Antrieb gestellt wird.

Über die Masse des Fahrzeugs  $m_{fzg}$  und den Gesamtfahrwiderstand  $F_{ges}$  aus Gleichung 3.1 kann man eine aktuelle Verzögerung wie folgt berechnen:

$$a_{akt} = \frac{F_{ges}}{m_{fzg}}$$

Nimmt man die Geschwindigkeit während des Zurücklegens eines Meters Fahrstrecke als konstant an, kann man die benötigte Zeit  $t_{akt}$ , die für diesen Meter benötigt wird, über die aktuelle Geschwindigkeit  $v_{akt}$  berechnen. Sie beträgt dann:

$$t_{akt} = \frac{1m}{v_{akt}}$$

Mit Hilfe der aktuellen Beschleunigung und der Zeit, die benötigt wird, den einen Meter zurückzulegen, kann die Geschwindigkeit einen Meter davor berechnet werden. Sie ergibt sich zu:

$$v_{n-1} = v_n - a_{akt} \cdot t_{akt}$$

Die Geschwindigkeit wird nun soweit zurückgerechnet, bis sie die aktuell gefahrene Geschwindigkeit schneidet. Durch Verwendung der aktuellen Geschwindigkeit passt sich der Abstand bei jeder neuen Berechnung automatisch an die aktuell gefahrene Geschwindigkeit an. Er wächst somit wenn man beschleunigt und verringert sich auch, wenn man die Geschwindigkeit reduziert. Die Berechnung wird auch nur dann ausgeführt, wenn die aktuell gefahrene Geschwindigkeit über der für die Situation empfohlenen Geschwindigkeit liegt.

Erreicht der Abstand zwischen der aktuellen Position und der Position, bei der der Fahrer seinen Fuß vom Fahrpedal nehmen soll den Wert null, wird außerdem ein Signal ausgegeben, welches dem Fahrer den Hinweis gibt, seinen Fuß vom Fahrpedal zu nehmen. Befolgt der Fahrer diesen Hinweis zum richtigen Zeitpunkt, wird er mit der passenden Geschwindigkeit bei der entsprechenden Situation ankommen. Zusätzlich zu diesem Hinweis bekommt der Fahrer immer den Abstand bis zur nächsten Situation und die Entfernung bis zu dem Punkt, an dem er den Fuß vom Fahrpedal nehmen soll, optisch angezeigt.

Ursprünglich war angedacht, ein optimales Verhalten für die relevante Situation zu bestimmen, daher ist diese Möglichkeit in den Testmöglichkeiten in Abschnitt 3.2.2 jeweils noch vorgesehen. Das bedeutet, es sollte analysiert werden, ob es bei der vorliegenden Situation vorteilhafter für den Energieverbrauch ist, auf die Situation auszurollen, in einer der drei Stufen zu

rekuperieren oder sogar zu bremsen oder zu beschleunigen. Diese Bestimmung eines optimalen Verhaltens wurde aber verworfen, da es den Fahrer zu einem überfordern würde, für jede Situation zwischen den implementierten Rekeperationsstufen umzuschalten. Außerdem ergibt dann eine Adaption wenig Sinn, da diese wiederum abhängig vom Verhalten wäre. Das würde das ganze System zu komplex machen, um noch eine Wirksamkeit der Adaption in den Versuchen nachweisen zu können.

### 3.2.2 Testmöglichkeiten für die Fahrhinweise

Zu Beginn der Entwicklung wurde versucht, die Hinweise innerhalb von Matlab/Simulink mit Hilfe von Daten von aufgezeichneten Testfahrten zu testen. Man stellte dabei fest, dass es sehr schwierig war, nur mit Hilfe von Plots oder sogar nur mit Hilfe von Zahlen, die die einzelnen Situationstypen beschreiben, zu debuggen. Um die Tests während der Entwicklung zu erleichtern, wurden zwei Möglichkeiten implementiert, die Hinweise während Testfahrten in der Simulation mit IPG CarMaker zu überprüfen. Diese sollen im Folgenden vorgestellt werden.

#### CarMaker Instruments

Die erste Möglichkeit, die Hinweise in CarMaker zu testen ist eine Umsetzung mit Hilfe der schon vorhandenen CarMaker Instruments. Dies ist eine Darstellung des Kombiinstrumentes und weiterer wichtiger Größen im Fahrzeug, wie Lenkwinkel und Fahr- bzw. Bremspedalstellung in Echtzeit. Auch der Status von verschiedenen Systemen kann hier beobachtet werden. Das Panel ist aus einzelnen Bereichen zusammengesetzt und mit Hilfe der Programmiersprache Tcl/Tk umgesetzt. Es ist individuell erweiterbar und daher gut geeignet, eine Möglichkeit zur Überprüfung der Hinweise zu implementieren.

Eine erste Erweiterung wurde bereits für die Steuerung und Überwachung des HIL Prüfstands umgesetzt. Er erweiterte das Panel um eine manuelle Steuerung des Fahr- und Bremspedals, einige Taster um Funktionen des EeDA ein- und auszuschalten und Statusanzeigen, die die Motorsteuerung und den EeDA betreffen. Auf dieser Erweiterung wurde aufgesetzt, um eine Visualisierung der Hinweise umzusetzen. Diese ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Auf der linken Seite ist dabei das ursprüngliche Instruments Panel mit den

Erweiterungen zu sehen. Die rechte Seite ist die Erweiterung der Hinweisvisualisierung.

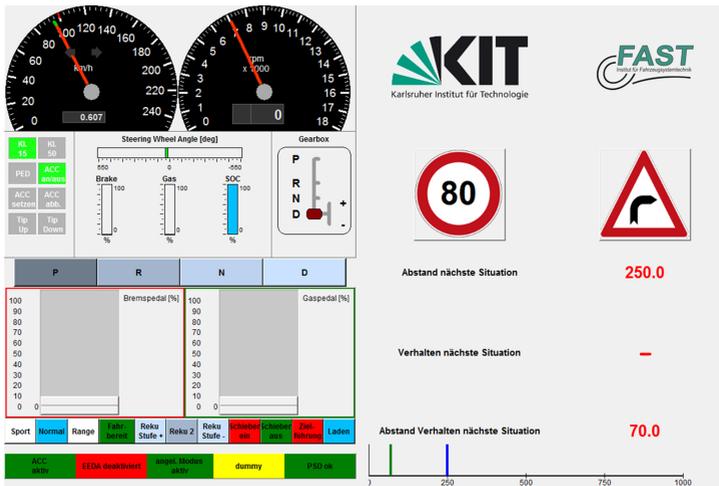


Abbildung 3.5: Darstellung der Hinweise in CarMaker Instruments

Abbildung 3.5 stellt das Instruments während einer Simulation dar. Das Fahrzeug fährt dabei aktuell eine Geschwindigkeit von knapp  $100 \frac{km}{h}$  (siehe Tachometer auf der linken Seite). Die nächste relevante Situation ist eine Rechtskurve (siehe ganz rechts oben) in 250 Metern (darunter), für die eine Geschwindigkeitsempfehlung von  $80 \frac{km}{h}$  gilt (links von der Situation). Der Fahrer sollte dabei in 70 Metern vom Gas gehen, um die Situation mit der passenden Geschwindigkeit zu erreichen (siehe rechts unten). Ganz unten sind der Abstand zur Situation (blauer Balken) und die Entfernung bis der Fahrer vom Gas gehen soll (grüner Balken) noch einmal zusätzlich grafisch dargestellt. Diese Balken bewegen sich dynamisch und wandern weiter nach links, je näher der Fahrer der Situation kommt.

## OpenGL Overlay in CarMaker Movie

Als zweite Möglichkeit zum Testen der Hinweise wurde ein OpenGL Overlay für CarMaker Movie realisiert. CarMaker Movie ist eine Möglichkeit, die Simulation in CarMaker für den Benutzer in Echtzeit zu visualisieren.

Dabei können verschiedene Ansichten gewählt werden und zusätzlich können sogenannte Widgets, wie man sie auch von Smartphones kennt, eingebendet werden. Dies kann zum Beispiel eine Visualisierung des aktuellen Lenkradwinkels oder eine Ansicht der Fahrstrecke sein, wie sie oft bei Rennspielen dargestellt ist. Dieses Konzept wurde hier verwendet, um die Visualisierung der Hinweise umzusetzen.

Dieses Overlay wurde im Rahmen der Masterarbeit [63] von Zhen Li auf Basis einer vom Autor dieser Arbeit erstellten Aufgabenstellung entwickelt und implementiert und später vom Autor dieser Arbeit für die Umsetzung im Fahrsimulator angewendet. Als Konzept wählte er dabei ein ähnliches Konzept wie es bei Porsche auch in den Testfahrzeugen verwendet wird. Dabei wird eine perspektivische Darstellung der Straße verwendet, um dem Fahrer zu signalisieren, welcher Hinweis gerade relevant ist und welcher Hinweis erst in der Zukunft (in weiterer Entfernung auf oder neben der Straße platziert) relevant wird. Außerdem werden dort, wo es möglich ist, Grafiken von Schildern aus der Straßenverkehrsordnung verwendet, um dem Fahrer ein Erlernen neuer Symbole zu ersparen.

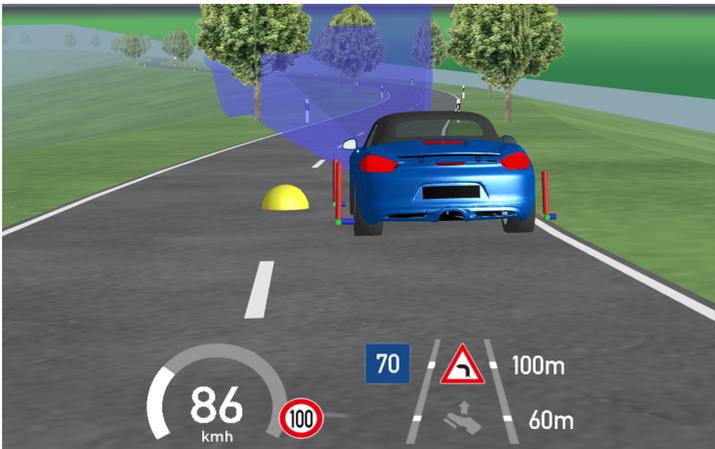


Abbildung 3.6: Screenshot aus der Simulation mit CarMaker und den Hinweisen als Overlay

In Abbildung 3.6 wird ein Ausschnitt aus Movie während der Simulation mit CarMaker dargestellt. Darin sieht man auch das Overlay der Hinweise. Links unten ist der Tachometer zu erkennen, der sowohl analog als auch

digital ausgeführt ist. Direkt am Tacho ist das aktuell vorliegende Geschwindigkeitslimit von  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  zu erkennen. Im inneren Bereich der perspektivischen Darstellung der Straße ist oben der Typ der nächsten relevanten Situation zu sehen. Im abgebildeten Fall handelt es sich dabei um eine Linkskurve. Links davon steht die empfohlene Geschwindigkeit für diese Situation, in diesem Fall  $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Im unteren Bereich im Inneren der perspektivischen Darstellung der Straße ist das empfohlene Verhalten bei der nächsten Situation dargestellt. Im abgebildeten Fall wird dem Fahrer empfohlen in 60 Metern (rechts von der perspektivischen Darstellung der Straße angezeigt) vom Gas zu gehen, da die Linkskurve in 100 Metern beginnt.



## 4 Fahrstilerkennung

In diesem Kapitel wird beschrieben wie man den Fahrstil im Fahrzeug klassifizieren kann. Dazu werden zuerst die Grundlagen erläutert. Anschließend bekommt der Leser einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik im Bereich der Fahrstilerkennung, bevor im dritten Abschnitt die eigene Umsetzung der Fahrstilerkennung beschrieben wird, welche in der Masterarbeit von David Grabengießer [40] implementiert wurde. Das Konzept wurde gemeinsam mit dem Autor dieser Arbeit erarbeitet, dann von Grabengießer weitgehend selbstständig umgesetzt und vom Autor dieser Arbeit dann an das Gesamtsystem angepasst und darin integriert. Möglichkeiten zum Funktionstest der eigenen Umsetzung werden in der Folge auch beschrieben. Dann folgt die Vorstellung eines Verfahrens, das dazu geeignet ist, die Parameter der umgesetzten Fahrstilerkennung zu optimieren. Abschließend erfolgt eine Validierung mit realen Fahrdaten bevor eine Zusammenfassung und ein Fazit zur Fahrstilerkennung das Kapitel abschließt.

### 4.1 Grundlagen

In diesem Abschnitt wird zuerst die Fuzzy Logik erklärt und die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt, da diese in dieser Arbeit maßgeblich für die Bestimmung des Fahrstil benutzt wird. Anschließend erfolgt eine genauere Definition des Begriffs *Fahrstil*.

#### 4.1.1 Fuzzy Logik

Die Fuzzy Theorie beschreibt grundsätzlich die Theorie der unscharfen Mengen. Sie wurde 1965 von Lotfi A Zadeh entwickelt und auch in diesem Jahr das erste Mal in einem Paper veröffentlicht. Der Autor erweiterte und verfeinerte die Theorie über die Jahre immer weiter. Alle seine Veröffentlichungen zu diesem Thema sind in [113] gesammelt.

Die Fuzzy Theorie ist die Theorie der unscharfen Mengen. Diese wurden von Lotfi a Zadeh in seinem ersten Paper [112] eingeführt. Er definiert ein Fuzzy set darin wie folgt:

**Definition 1.** Sei  $X$  ein Raum von Punkten. Eine generisches Element von  $X$  sei  $x$ . Also ist  $X = \{x\}$ . Ein **Fuzzy set** (bzw. eine **Fuzzy Menge**)  $A$  in  $X$  wird durch eine Zugehörigkeitsfunktion  $f_A(x)$  charakterisiert, welche jedem Punkt in  $X$  bzw. einer Teilmenge davon eine reelle Zahl im Intervall  $[0, 1]$  zuordnet, wobei der Wert von  $f_A(x)$  an der Stelle  $x$  den Grad der Zugehörigkeit von  $x$  in  $A$  repräsentiert.

Diese Definition lässt sich auf die Definition von normalen Mengen einschränken, indem man nicht beliebige reelle Zahlen aus dem Intervall  $[0,1]$  zulässt, sondern nur die Zahlen null und eins. Das bedeutet dann eine volle Zugehörigkeit zu einer Menge oder eben keine Zugehörigkeit. Genau so, also mit einer binären Zugehörigkeitsfunktion, sind konventionelle Mengen definiert. Die Definition von *Fuzzy Mengen* ist also nur eine Erweiterung der Definition von konventionellen Mengen. Auch Mengenoperationen wie Komplement, Vereinigung und Schnittmenge sind in [112] hergeleitet und können dort nachgelesen werden.

S. Bocklich beschreibt in seinem Buch „Prozessanalyse mit unscharfen Verfahren“ [10], wie die Theorie für die Klassifikation von Messungen verwendet werden kann, wie es in dieser Arbeit getan wurde. Auch M. Ottens zeigt in seinem Skript in [76] eine sehr gute Einführung in die Fuzzy Logik und ihrer Verwendung. Der prinzipielle Ablauf, wie das Verfahren in dieser Arbeit angewandt wurde, ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Zuerst werden die Werte eingelesen. Bei der *Fuzzifizierung* werden die Zugehörigkeitsfunktionen verwendet, um die scharfen Eingangswerte in sogenannte linguistische Variablen umzuwandeln. Dabei werden die Eingangswerte entsprechend der Zugehörigkeitsfunktion auf unscharfe Mengen abgebildet. Im Anschluss erfolgt die Anwendung der Fuzzy-Regeln, auch *Fuzzy-Inferenz* genannt. Diese Regeln werden normalerweise als WENN-DANN Beziehungen formuliert. Eine Regel sieht im Allgemeinen wie folgt aus:

WENN Prämisse 1 UND/ODER Prämisse 2 DANN Schlussfolgerung

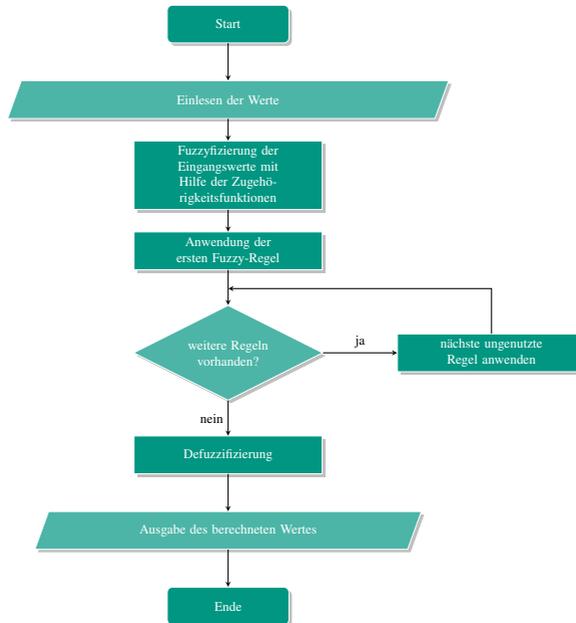


Abbildung 4.1: Ablauf des Klassifizierungsprozesses mit Hilfe der Fuzzy Logik

Die Verknüpfungsfunktionen „UND“ und „ODER“ sind dabei etwas abweichend von den Operatoren bei der binären Logik definiert. Werden zwei unscharfe Mengen mit „UND“ verknüpft ergibt sich der kombinierte Zugehörigkeitsgrad zu einer entsprechenden Menge zum Minimum der Zugehörigkeitsgrade zu den beiden Eingangsmengen, also

$$\mu_1 \cap \mu_2 : \min \{ \mu_1(x), \mu_2(x) \}.$$

Werden zwei unscharfe Mengen mit „ODER“ verknüpft ergibt dich der kombinierte Zugehörigkeitsgrad zu einer entsprechenden Menge zum Maximum der Zugehörigkeitsgrade zu den beiden Eingangsmengen, also

$$\mu_1 \cup \mu_2 : \max \{ \mu_1(x), \mu_2(x) \}.$$

Nachdem über die Anwendung aller anwendbaren Regeln ein abschließender Fuzzy-Wert generiert wurde, muss dieser wieder in einen schar-

fen Ausgangswert transformiert werden. Diese geschieht mit Hilfe der sogenannten *Defuzzifizierung*. Für diese Umwandlung gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Methoden. Die beiden am häufigsten verwendeten sind die „Schwerpunkt-Methode“ und die „Mean of Maximum-Methode“. Bei der Schwerpunkt-Methode wird der Abszissenwert des Schwerpunktes der Fläche unterhalb der Fuzzy-Menge berechnet und dieser wird als scharfer Ausgangswert benutzt. Bei der Mean of Maximum Methode wird der Maximalwert der Ergebnismenge ermittelt. Als scharfer Ausgangswert dient dann die Mitte des Abszissenbereichs, über den die akkumulierten Zugehörigkeitsfunktionen den Maximalwert aufweisen. [91]

Für tiefere Einblicke in diese Methoden und die Fuzzy Logik wird der Blick in die weiterführende Fachliteratur wie [2], [56] und [114] empfohlen.

### 4.1.2 Definition Fahrstil

Für den Begriff *Fahrstil* gibt es in der Literatur keine klare Definition. Der Begriff wird in vielen verschiedenen Bereichen verwendet und je nach Anwendungsgebiet anders bzw. für dieses Anwendungsgebiet passend definiert. Oft werden dabei auch Parameter mit in Betracht gezogen, für die spezielle Sensorik von Nöten wäre, um diese Parameter messen zu können. Es handelt sich dabei um physische Parameter des Fahrer, wie beispielsweise die Herzfrequenz, die Atmung oder auch die Feuchtigkeit der Hände. Mit diesen Parametern kann man Rückschlüsse auf die physische und psychische Verfassung des Fahrers ziehen, was bei der Bestimmung des *Fahrerzustands* helfen kann. Der *Fahrerzustand* ist aber nur ein Aspekt, welcher einen Einfluss auf den *Fahrstil* hat. Da im Rahmen dieser Arbeit die Gesamtausprägung des *Fahrstils* und nicht nur Teilaspekte davon interessant war und der *Fahrstil* sich am besten mit einer Erfassung von Fahrzeugparametern und Fahrdaten (die auf dem CAN-Bus des Fahrzeuges zur Verfügung standen) bestimmen lässt, wurde auf eine explizite Messung der physischen Parameter des Fahrers verzichtet. Der Fahrstil ist in dieser Arbeit wie folgt definiert:

**Definition 2.** *Der Fahrstil ist die Art und Weise, wie der Fahrer seine Fahraufgabe ausführt bzw. umsetzt. Dabei sind die am Fahrzeug messbaren Parameter interessant.*

Abbildung 4.2 zeigt die verschiedenen Einflüsse auf den Fahrstil.

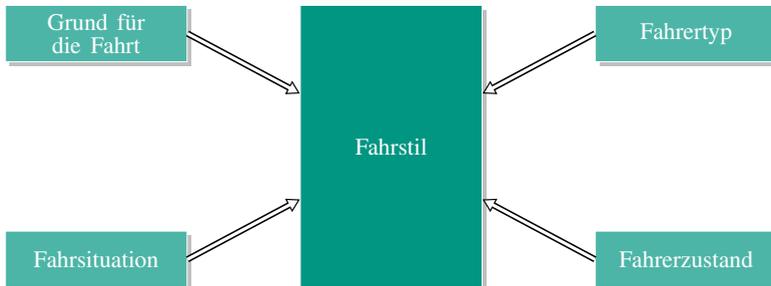


Abbildung 4.2: Einflüsse auf den Fahrstil

Einen großen Einfluss auf den Fahrstil hat beispielsweise der *Grund der Fahrt*. So wird man beispielsweise auf dem Weg von der Arbeit nach Hause oder Sonntagmittags auf dem Weg zum Kaffee trinken gemütlicher fahren, als auf dem Weg ins Krankenhaus mit der hochschwangeren Frau auf dem Beifahrersitz. Auch die *Fahrersituation* (definiert in [91]) hat Einfluss auf den Fahrstil. In einer unübersichtlichen Situation mit vielen anderen Verkehrsteilnehmern wird sich ein Fahrer stets anders verhalten, als auf einer freien Autobahn oder einer freien, gut überschaubaren Bundesstraße. Der *Fahrertyp* beeinflusst den Fahrstil sehr stark. Mit *Fahrertyp* ist der langfristige physische und psychische Zustand des Fahrers gemeint. Dies wird in [91] als langfristiger Fahrerzustand beschrieben. So kann ein Fahrer beispielsweise eher ein ruhiges Gemüt haben und allgemein eher vorausschauend fahren. Ein anderer Fahrer wiederum kann eher aggressiv und unsicher im Umgang mit seinem Fahrzeug sein. Es handelt sich dabei um Eigenschaften des Fahrers selbst, die normalerweise nicht direkt von äußeren Einflüssen gesteuert werden können. Der *Fahrerzustand* [91] hingegen beschreibt den kurzfristigen physischen und psychischen Zustand des Fahrers. Der *Fahrerzustand* kann im Gegensatz zum *Fahrertyp* sehr wohl von äußeren Faktoren beeinflusst werden. Beispiele für den Fahrerzustand sind Müdigkeit, Stimmungslage (kann beispielsweise auch durch die gehörte Musik beeinflusst werden), Aufmerksamkeit und auch biologische Parameter wie Herzfrequenz und Atmung. Es gibt noch viele weitere Parameter, die den Fahrerzustand genauer beschreiben. Da sie sich jedoch alle im *Fahrstil* wiederfinden und sich die Effekte durch die vorhandene Sensorik nicht weiter voneinander

trennen lassen, soll in dieser Arbeit nicht auf die weiteren Parameter eingegangen werden.

## **4.2 Stand der Wissenschaft und Technik**

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Fahrstilerkennung oder interessanten Teilfunktionen davon. Die Forschungsarbeiten und Patentschriften zu diesen Ansätzen sollen im folgenden Abschnitt in ihren Grundzügen vorgestellt werden, um einen Überblick über die Thematik zu erhalten. Der Ansatz zur Fahrstilerkennung, welcher in dieser Arbeit verwendet wurde, stellt eine neuartige Kombination verschiedener Teilansätze der vielversprechensten Methoden in der Literatur dar, welche auf ähnliche Eingangssignale Zugriff hatten. Im Folgenden wird daher nur auf die Methoden aus der Literatur eingegangen, die mit in den Ansatz, welcher in dieser Arbeit angewendet wurde, eingeflossen sind. Eine noch detailliertere Übersicht mit Vergleich der einzelnen Ansätze anhand ihrer Eingangsparameter und der Auswertemethoden ist in [40] zu finden.

### **4.2.1 Friedrich - Verfahren zum Anpassen eines Fahrer-Assistenzsystems an das Fahrverhalten eines Fahrers**

Friedrich et al. stellen in ihrer Offenlegungsschrift[36] ein Verfahren zum Anpassen eines Fahrer-Assistenzsystems an das Fahrverhalten eines Fahrers vor. Dies beschreibt das Gesamtziel dieser Arbeit sehr gut. Die Offenlegungsschrift ist sehr allgemein gehalten. Die meisten später genannten Methoden und Systeme in der Literatur werden durch die in diesem Patent beschriebenen grundlegenden Ansätze der Funktionsweise und den Aufbau gut beschrieben. Die Erfinder zielen in dieser Offenlegungsschrift auf die automatische Anpassung von Assistenzsystemen an den Fahrer ab, um die Fahrsicherheit und den Komfort dadurch zu erhöhen. Dies soll durch eine Erkennung des Fahrstils erreicht werden. Dabei sollen je nach Assistenzsystem und Anwendungsbereich unterschiedliche Eingangsparameter berücksichtigt werden. Als mögliche Eingangsgrößen werden beispielhaft Längs- und Querbeschleunigung, Geschwindigkeit, Fahrpedalstellung, Bremsdruck, Lenkwinkel, Gierratenregelabweichungen und Eingriffe von

ESP<sup>1</sup> und ABS<sup>2</sup> angeführt. Das System verarbeitet diese Parameter und berechnet daraus auf Basis eines in der Offenlegungsschrift nicht genauer definierten Algorithmus ein Ausgangssignal für den Fahrstil. Dieses Ausgangssignal kann dann an das Assistenzsystem weitergeleitet werden, welches dann aufgrund von entsprechend im Voraus festgelegten Parametersets passend für den jeweiligen Fahrstil konfiguriert werden kann. Beim Start des Fahrzeuges soll solange ein neutraler Fahrstil ausgegeben werden bis die ersten Eingangparameter auf einen abweichenden Fahrstil hinweisen. Auch bei dem in dieser Arbeit verwendeten Ansatz werden Beschleunigungen und Geschwindigkeiten für die Berechnung des *Fahrstils* verwendet. Außerdem wird auch von einem neutralen Fahrstil zu Beginn der Fahrt ausgegangen.

#### 4.2.2 Borrmann - Verfahren zur Fahrer-Typ-Erkennung

In der Patentschrift [12] empfiehlt Borrmann eine Klassifizierung in einen „ruhigen“ und einen „sportlichen“ Fahrstil. Auch wenn der Titel „Fahrer-Typ-Erkennung“ lautet, beschreibt die Patentschrift nach der Definition dieser Arbeit eine Erkennung des Fahrstils. Dieser soll möglichst schnell und zuverlässig erkannt werden. Anschließend sollen fahrstilabhängige Veränderungen an der Motor- und Getriebesteuerung (Einstellung der Gangwechselcharakteristik, Fahr- und Bremspedalcharakteristik, Fahrwerksdämpfungscharakteristik und Lenkungscharakteristik sind ebenfalls denkbar) das Fahrzeugverhalten anpassen. Für die Klassifizierung wird ein „Sportlichkeitsfaktor“ berechnet. Dieser stellt eine Funktion verschiedener Eingangsparameter dar:

$$\text{Sportlichkeitsfaktor} = f\left(v, n, \alpha, \frac{dv}{dt}, \frac{d\alpha}{dt}, \frac{n}{v}, -a, a\right)$$

$v$  steht dabei für die Fahrgeschwindigkeit,  $n$  für die Motordrehzahl,  $\alpha$  für den Fahrpedalwinkel,  $\frac{dv}{dt}$  für die momentane Längsbeschleunigung,  $\frac{d\alpha}{dt}$  für die Fahrpedalwinkelgeschwindigkeit und  $a$  bzw.  $-a$  für den Mittelwert der Längsbeschleunigung bzw. Verzögerung. Der Ablauf zur Berechnung der einzelnen Größen bis hin zum Sportlichkeitsfaktor ist in Abbildung 4.3 zu finden.

<sup>1</sup> ESP - Elektronisches Stabilitätsprogramm dient der gezielten Abbremsung einzelner Räder, um die Fahrstabilität des Fahrzeugs aufrechtzuerhalten.

<sup>2</sup> ABS - Antiblockiersystem dient der Regelung des Bremsdrucks an den einzelnen Rädern, um ein Blockieren der Räder zu vermeiden.

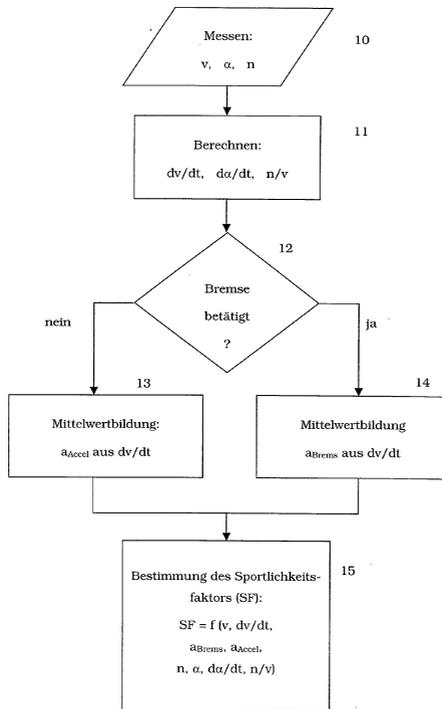


Abbildung 4.3: Flussdiagramm des Verfahrens zur Ermittlung des Fahrstils, aus [12]

Eine genaue Beschreibung des Algorithmus zur Berechnung des Sportlichkeitsfaktors wird in dem Patent nicht erläutert. Auch können, je nach Wahl des Algorithmus, weitere Eingangsparameter hinzugenommen werden, um die Bestimmung des Sportlichkeitsfaktors zu optimieren und an die Anwendung des Systems anzupassen.

### **4.2.3 Kuhn - Verfahren zur graduellen Fahrweisenklassifikation und dieses anwendendes Kraftfahrzeug**

Kuhn beschreibt in seiner Patentschrift [57] ein Verfahren, das einen „ruhigen“ von einem „dynamischen“ Fahrstil unterscheiden soll. Basis für die Klassifizierung stellt eine sogenannte „Fahrweisen-Kennziffer“ dar, die mit Hilfe von Messgrößen aus der Fahrzeugsensorik berechnet werden kann. Sie setzt sich aus einer Beschleunigungskennziffer, einer Bremskennziffer und einer Lenkkennziffer zusammen. Vom Steuergerät, das den Fahrstil bewertet, wird diese „Fahrweisen-Kennziffer“ an andere Steuergeräte weitergeleitet, die ihre Regelung an den Fahrstil anpassen können.

Kuhn beschreibt eine dynamische Fahrweise dadurch, „dass schnell beschleunigt, spät, aber kräftig gebremst und in Kurven hohe Querbeschleunigungen zugelassen werden“ [57]. Da einfache Stellgrößen am Fahrzeug, wie Lenkradwinkel oder Brems- und Fahrpedalwinkel dem Fahrer keine direkte Rückmeldung liefern, sind sie laut Kuhn ungeeignet für die Bestimmung des Fahrstils. Längs- und Querbeschleunigung hingegen liefern eine optische und eine haptische Rückmeldung. Durch eine zeitliche Mittelwertbildung und somit Glättung der einzelnen Werte, wird verhindert, dass untypische Situationen die Erkennung des Fahrstils beeinträchtigen. Die Länge der Zeitintervalle wird im Voraus definiert. Außerdem sollen nur Ereignisse erfasst werden, die vom Fahrer selbst induziert und nicht durch die Umwelt aufgeprägt wurden. Deshalb werden bestimmte Schwellwerte für Geschwindigkeitsänderungen bei Beschleunigungs- und Bremsmanövern definiert. Bei kleineren Geschwindigkeitsänderung kann man davon ausgehen, dass der Fahrer entweder nervös ist oder dass es sich um das Einregeln des aktuellen Geschwindigkeitslimits handelt. Größere Geschwindigkeitsänderungen sind oft von außen, entweder durch den Verkehr oder einen Wechsel im Geschwindigkeitslimit, aufgeprägt. Auch andere Fahrmanöver, die den Fahrstil nicht charakterisieren, wie beispielsweise das Rückwärtsfahren, werden nicht mit bewertet. ABS oder ESP-Regeleingriffe werden nur dann bewertet, wenn sie wiederholt auftreten. Es werden immer einzelne Manöver bewertet. Daraus ergibt sich dann eine geglättete Kennziffer, deren Zugehörigkeit zu einem Fahrstil anschließend über eine Fuzzy-Logik bestimmt wird. Die sehr umfassende Patentschrift liefert eine Reihe guter Ansätze für die Fahrstilerkennung, die im späteren System auch Verwendung finden werden. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Ansätze der ak-

zeptierten Beschleunigungen sowohl bei Brems- und Beschleunigungsmaneuvern, als auch in Kurvenfahrten. Einige Ansätze konnten nicht direkt übernommen werden, da es sich im Patent um ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor handelt, in dieser Arbeit aber grundsätzlich von einem Elektrofahrzeug ausgegangen wurde.

#### **4.2.4 Ungermann - Vorrichtung zum Energiemanagement in einem Elektrofahrzeug**

Einen völlig neuartigen Ansatz zur Fahrstilerkennung, speziell ausgelegt für ein Elektrofahrzeug, stellt der Erfinder Ungermann in seiner Patentschrift [101] vor. Dabei wird während der Fahrt die Entladung des Akkumulators geprüft, der den Elektromotor speist. Ein schneller Entladevorgang spricht dabei für eine erhöhte Leistungsanforderung des Fahrers und kann auf einen „sportlichen“ Fahrstil hinweisen. Im Gegensatz hierzu spricht ein langsamer Entladevorgang für eine niedrige Leistungsanforderung und daher für einen „ruhigen“ Fahrstil. Die Berechnung erfolgt über die Dauer des Fahrintervalls und den Anfangs- und Endladezustand des Akkumulators. Darüber kann ein Gradient berechnet werden, der mit hinterlegten Schwellenwerten verglichen werden kann. Es wird keine zusätzliche Sensorik benötigt, da der Strom und die Spannung des Energiespeichers an der Leistungselektronik schon zur Verfügung stehen. Zusätzlich zum Gradient wird noch die Anzahl von Spannungseinbrüchen in vordefinierten Zeitintervallen bewertet. Diese können auf eine kurzzeitige erhöhte Momentenanforderung schließen lassen, was wiederum für einen „sportlicheren“ Fahrstil spricht.

Auf den ersten Blick stellt die im Patent beschriebene Vorgehensweise eine ganz neue Methode zur Klassifizierung des Fahrstils dar. Beim zweiten Blick sieht man jedoch, dass sie sich nur in den berücksichtigten Messgrößen unterscheidet. Das Bewertungskonzept ist ähnlich, wie bei Kuhn [57].

#### **4.2.5 Deml et al. - Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils**

Das „Konstrukt Fahrstil“ zu erfassen ist das Ziel der Literaturrecherche von Deml et al. in [21]. Das Ergebnis ist, dass die Längs- und die Querbeschleunigung sehr gut dazu geeignet sind, den Fahrstil zu erfassen und zwischen verschiedenen Fahrstilen zu unterscheiden. Jedoch unterliegen diese beiden Messgrößen auch äußeren Einflüssen. Einen großen Einfluss auf die Querbeschleunigung hat beispielsweise die Kurvigkeit. Sie beschreibt die Stre-

ckengeometrie und diese ist hier als Summe aller absoluten Richtungsänderungen auf einem betrachteten Streckenabschnitt definiert. Die Längsbeschleunigung hingegen ist abhängig von der Ausgangsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeitsdifferenz des Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsvorgangs. Basierend auf der Literaturrecherche wurde ein Feldexperiment mit 26 Probanden durchgeführt. Dabei wurden die Fahrdaten von Versuchsfahrten aufgezeichnet und im Nachhinein ausgewertet. Man konzentrierte sich bei der Auswertung im Hinblick auf das Beschleunigungsverhalten speziell auf die Situationen Ampelstart, Durchfahren eines Kreisverkehrs und Autobahnabfahrten. Zusätzlich zu den objektiven Messdaten wurde von den Fahrern eine Selbsteinschätzung zum eigenen Fahrstil per Fragebogen durchgeführt. Auch der Testleiter bewertete den Fahrstil subjektiv. Daraus konnten Erkenntnisse mittels Korrelationsanalysen gewonnen werden.

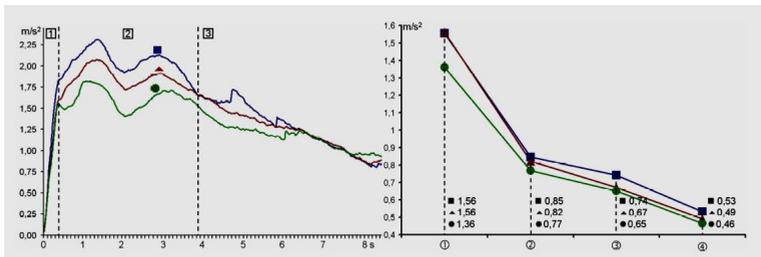


Abbildung 4.4: Zeitlicher Verlauf der mittleren Längsbeschleunigung beim Ampelstart (links) und der mittleren Querbeschleunigung (rechts) in ausgewählten Verkehrssituationen ((1) Fahrten im Kreisverkehr beschreibt und (2)-(4) Autobahnabfahrten) mit den Fahrstilen „komfortabel“ (grün), „mittel“ (rot) und „sportlich“ (blau) aus [21]

In Abbildung 4.4 ist im linken Teil die Auswertung der Längsbeschleunigung beim Ampelstart gezeigt. Sie zeigt, dass eine Klassifizierung des Fahrstils anhand der Längsbeschleunigung in dieser Situation mit einer guten Trennschärfe, vor allem im Zeitintervall von 0,4 bis 3,8 Sekunden, möglich ist. Die Unterteilung erfolgt hierbei in die Fahrstile „komfortabel“ (grün), „mittel“ (rot) und „sportlich“ (blau). Bei der Auswertung der Querbeschleunigung ist die Trennschärfe bei weitem nicht so hoch. Sie ist in Abbildung 4.4 auf der rechten Seite dargestellt, wobei (1) Fahrten im Kreisverkehr beschreibt und (2)-(4) Autobahnabfahrten beschreiben. Man kann erkennen, dass sich auch hier eine Differenzierbarkeit ableiten lässt, wenn

auch keine so eindeutige wie bei der Längsbeschleunigung bei Ampelstarts. Als Schlussfolgerung aus diesem Bericht kann man ziehen, dass Längs- und Querschleunigung geeignete Größen für eine Fahrstilklassifizierung sind, mit der Einschränkung, dass die vorliegende Fahrsituation dabei berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund bilden diese beiden Größen die Grundlage für den Ansatz, welcher in [40] entwickelt und in dieser Arbeit angewendet wurde.

#### **4.2.6 Wilde et al. - Fahrstil- und fahrsituationsabhängige Ladestrategie bei Hybridfahrzeugen**

In dem Artikel von Wilde et al. [109] und der Dissertation von Wilde [108] wird die Fahrstilerkennung umgesetzt, um eine Optimierung der Ladestrategie von Hybridfahrzeugen zu ermöglichen. Durch die Erkennung soll eine Abschätzung des Fahrleistungsbedarfs durch den Fahrer möglich sein. Dadurch kann die Ladestrategie der Batterie so gesteuert werden, dass immer genug Leistung zur Verfügung steht.

Als Eingangssignale für die Erkennung des Fahrstils werden gleitende Mittelwerte von Fahrpedalwinkel, Fahrpedalgradient, Bremsdruck, Querschleunigung und Lenkwinkelgradient verwendet. Diese Mittelwerte werden über die Zeit gebildet und die Eingangssignale unterliegen einer Alterung, sodass ihre Gewichtung über die Zeit abnimmt, bis sie überhaupt nicht mehr berücksichtigt werden. Anschließend wird eine Fuzzy-Logik verwendet, um die gleitenden Mittelwerte über Zugehörigkeitsfunktionen in Größen umzuwandeln, die dann weiterverarbeitet werden können. Diese Weiterverarbeitung erfolgt in sogenannten probabilistischen Netzen. Darin steckt das gesamte Expertenwissen des Systems. Durch Kombination von Wahrscheinlichkeiten wird in diesen Netzen der Fahrstil situationsgebunden klassifiziert. Bei einer Korrelationsanalyse zwischen einer subjektiven Fahrer-selbsteinschätzung und der Klassifikation durch die Netze ergab sich eine Übereinstimmung von 90 Prozent.

Das gezeigte System ist sehr komplex und der Aufbau der probabilistischen Netze wird benötigt, um eine situationsgebundene Auswertung des Fahrstils zu ermöglichen. Für eine Neuimplementierung ist diese Art der Umsetzung deshalb weniger geeignet, da man eine große Anzahl an Daten bräuchte, um die Netze für den neuen Anwendungsfall zu trainieren. Allerdings konnten einige Ansätze, wie die Fuzzy-Logik, die Bildung eines

gleitenden Mittelwerts oder die zeitliche Gewichtung der Eingangsparameter für die eigene Implementierung übernommen werden.

#### **4.2.7 Bär et al. - Szenenbasierte Fahrstilerkennung durch probabilistische Auswertung der Fahrzeugdaten**

Auch Bär et al. verwenden in [3] und [4] die Methode der Fuzzy-Logik, um eine Fahrstilerkennung zu realisieren. Damit sollen ebenfalls Fahrerassistenzsysteme individuell an den Fahrstil angepasst werden. In diesen Arbeiten erfolgt die Erkennung jedoch szenenbasiert, d.h. es werden im Voraus Verkehrssituationen definiert (Durchfahren einer scharfen Kurve, Annäherung an eine Stoppschild oder eine Ampel), in denen die Erkennung realisiert wird. Dabei werden unterschiedliche Eingangsparameter für die Ermittlung des Fahrstils benutzt, wie beispielsweise Geschwindigkeit, Verzögerung oder Lenkwinkel. In der Arbeit werden fünf Klassen von Fahrstilen definiert. Sie reichen von „aggressiv“ über „sportlich“, „moderat“ und „ängstlich“ bis „energieeffizient“. Ein sportlicher Fahrer ist beispielhaft so definiert: „kennt sein Auto und nutzt den vollen Umfang der Fahrzeugdynamik, bringt andere Verkehrsteilnehmer nicht in Gefahr“ [3]. Für jede Fahrstilklasse existiert eine solche Definition. Das verhindert einen großen Interpretationsspielraum.

Nach der Vorverarbeitung der Eingangsdaten und Bildung von diversen Maximum-, Minimum- und Mittelwerten werden diese Größen mit Hilfe von Zugehörigkeitsfunktionen unscharfen Mengen zugeordnet. Nach der Bewertung der einzelnen Größen innerhalb einer Szene wird noch festgelegt, wie stark diese Szene Einfluss auf den Gesamtfahrstil hat. Dies erfolgt über eine Gewichtung. Anschließend werden die gewichteten Faktoren in einem Bayes'schen Netzes verrechnet, um einen Gesamtfahrstil zu erhalten. Bei Probanden-Tests in einem Fahrsimulator konnten 83 Prozent der erfassten Daten, unter Anwendung der Maximum-Likelihood-Methode, richtig klassifiziert werden.

Diese Arbeit zeigt, dass die Fuzzy-Logik gut für die Bewertung der Eingangsgrößen verwendet werden kann. Anschließend kann über eine geeignete Kombination der einzelnen zugeordneten Eingangsgrößen ein Fahrstil berechnet werden. Jedoch sollte man dabei immer die Fahrsituation berücksichtigen, was im verwendeten Ansatz auch der Fall ist, da in verschiede-

nen Fahrsituation unterschiedliche Parameter für eine gute Beschreibung des Fahrstils geeignet sind.

#### **4.2.8 Schulz et al. - Analyse des Fahrerverhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategie von Assistenzsystemen**

Normalerweise werden Assistenzsysteme entsprechend einem statistischen Optimum abgestimmt, sodass der überwiegende Teil der Nutzer die Systemeingriffe als passend und angenehm wahrnimmt. Dadurch kann in den meisten Fällen jedoch nicht das ganze Potential des Systems ausgeschöpft werden. Schulz et al. versuchen in ihrem Artikel [92] Ansätze zu finden, wie man die Assistenzsysteme automatisch individuell an den Fahrer anpassen kann, um dessen Akzeptanz für die Eingriffe zu erhöhen. Als Größen, die zur Unterscheidung zwischen verschiedenen Fahrern geeignet sind, werden in diesem Artikel die Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie die Längs- und Querschleunigung genannt. Es werden Studien zitiert, die besagen, dass vor allem mit steigender Geschwindigkeit der gesetzliche vorgeschriebene Mindestabstand teilweise deutlich unterschritten wird. Eine andere zitierte Studie der TU Darmstadt zeigt, dass Zeitlücken sehr gut mit definierten Fahrstilen korrelieren. Außerdem wird im Artikel beschrieben, dass die vom Fahrer tolerierte Querschleunigung gut dazu geeignet ist, verschiedene Fahrstile zu unterscheiden. Auch hier wird jedoch angemerkt, dass es wichtig ist, zwischen verschiedenen Fahrsituationen zu unterscheiden und bei verschiedenen Fahrsituationen auch unterschiedliche Eingangsparameter zu betrachten. In diesem Falle wird als Grundlage zur Unterscheidung zwischen Fahrsituationen die Straßenklasse benutzt, auf der sich das Fahrzeug gerade befindet. Abbildung 4.5 zeigt die im Artikel beschriebenen Straßenklassen und die jeweils dafür geeigneten Eingangsparameter zur Unterscheidung von Fahrstilen.

Der Ansatz, die Fahrsituationen anhand der Straßenklasse zu unterscheiden, stellt einen neuen und sehr interessanten Ansatz dar, da man hierdurch keine besondere Erkennung der Fahrsituation implementieren muss. Die Information ist oft über die Navigationseinheit im Fahrzeug verfügbar und somit einfach nutzbar. Die verwendeten Eingangsparameter Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie die Werte von Längs- und Querschleunigung bestätigen andere Ansätze aus der Literatur.



Abbildung 4.5: Bewertungsgrößen zur Fahrstilerkennung nach Fahr Situationen bzw. Straßenklassen, aus [92]

## 4.2.9 Färber - Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen

Beim Erfüllen der Fahraufgabe sieht sich der Fahrer vielen verschiedenen Aufgaben gegenüber. Die verschiedenen Tätigkeiten binden unterschiedlich viel Kapazität beim Fahrer und außerdem führen selbst die gleichen Aufgaben bei verschiedenen Fahrern zu unterschiedlichen Belastungen. Wenn der Fahrer durch Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssysteme in der Fahraufgabe unterstützt werden soll, ist der richtige Zeitpunkt für eine Übermittlung von hilfreichen Informationen essentiell. Um diesen Zeitpunkt für jeden Fahrer individuell ermitteln zu können, erachtet es Färber in seinem Kapitel [31] im Buch [70] von Maurer und Stiller für notwendig das Verhalten des Fahrers und seine Fahrerfähigkeiten zu klassifizieren. Damit ergibt sich ein hohes Potential für die Optimierung der Einbindung solcher Systeme. Der Fahrstil soll hier anhand von Längsbeschleunigungswerten und der Betätigung von Fahr- und Bremspedal ermittelt werden. Man kann zwar über den Bremspedalweg zwischen Notbremsungen und komfortablen Bremsmanövern unterscheiden, jedoch ist eine Trennung zwischen Notbremsungen und starken Bremsmanövern, selbst durch die Einbeziehung der Pedalgeschwindigkeit, nicht möglich. Des weiteren wird das Bremsverhalten

oft durch die Umwelt bzw. andere Verkehrsteilnehmer bestimmt, sodass es durch Färber als wenig aussagekräftig im Hinblick auf den Fahrstil beurteilt wird. Das Beschleunigungsverhalten ist jedoch sehr wohl für eine Klassifizierung des Fahrstils geeignet. Dafür wurde in einem Experiment das Manöver „Ampelstart“ durchgeführt. Die Fahrer sollten das Manöver jeweils „komfortabel“, „sportlich“ und „schnellst möglich“ ausführen. Als Parameter wurden die Fahrpedalstellung, die Betätigungsgeschwindigkeit des Fahrpedals und die Pedalwechselzeit von Brems- zu Fahrpedal gewählt. Durch eine passende Gewichtung der drei Parameter konnte eine Genauigkeit der Klassifizierung von 87 Prozent erreicht werden, was ein guter Wert ist, nicht aber für eine Nutzung in sicherheitsrelevanten Systemen ausreicht.

In diesem Beitrag kann man sehen, dass auch mit wenigen gut gewählten Parametern und geringem Umsetzungsaufwand eine gute Klassifizierung des Fahrstils möglich ist. Jedoch werden bei diesem Ansatz nur Stellgrößen des Fahrers als Eingangsparameter benutzt. Größen, die die Regelung zwischen der Wahrnehmung des Fahrers und den auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen beschreiben, werden hier leider außen vor gelassen. Zudem ist vor allem die Pedalwechselzeit ein Parameter, der durch das Fahrkönnen des Fahrers diktiert ist und deshalb eher den Fahrertyp, als den Fahrstil beschreibt.

#### **4.2.10 Aljaafreh et al. - Driving style recognition using fuzzy logic**

Einen einfachen aber effektiven Ansatz nutzen Aljaafreh et al. in ihrem Beitrag [1]. Es werden hier die Signale aus einem zweiachsigen Bewegungssensor zusammen mit Geschwindigkeitsinformationen benutzt, um zwischen den zwei Fahrstilen „normal“ und „aggressiv“ zu unterscheiden. Zuerst wird über die Formel

$$Norm(n) = \sqrt{a_{\text{quer}}^2 + a_{\text{längs}}^2}$$

die euklidische Norm der Längs- und Querbeschleunigung berechnet. Dieses Signal wird dann mit einem gleitenden Mittelwert geglättet und zusammen mit dem Geschwindigkeitssignal an eine Fuzzy-Logik weitergeleitet, welche die Bewertung des Fahrstils vornimmt. Die Formulierung der Regelbasis und Zugehörigkeitsfunktionen basiert hier auf dem Wissen von erfahrenen Fahrern und wurde mit den Messdaten aus Realfahrten manuell abge-

stimmt. Eine weitere Auswertung bzgl. einer Genauigkeit und eine nähere Beschreibung der Umstände der Testfahrten sind in diesem Beitrag leider nicht zu finden.

#### **4.2.11 Ansätze mit dem Smartphone als Sensor**

Da heutzutage fast jeder Fahrer ein Smartphone bei sich trägt, stellt es sich als sehr interessant dar, dieses als möglichen Sensor für eine Fahrstilerkennung zu nutzen. Smartphones sind mit einer großen Menge verschiedener Sensoren ausgestattet. Sie reichen vom Beschleunigungsmesser (3 Achsen) über ein Gyroskop (3 Achsen), Kameras, ein Mikrofon, GPS, Kompass bis hin zum Annäherungs- und Umgebungslichtsensor. Diesen Ansatz haben bisher mehrere Forschungsgruppen untersucht.

Johnson et al. versuchen in [49] mit Hilfe eines Smartphones aggressives Fahrverhalten in vorab definierten Fahrmanövern zu detektieren. Dazu montieren sie das Smartphone in der Mitte des Armaturenbretts, um zu verhindern, dass es sich unkontrolliert bewegt. Im Voraus wurden verschiedene Manöver definiert und Aufzeichnungen von allen Manövern abgespeichert. Die Signale für die Erkennung stammen aus dem Beschleunigungssensor, dem Gyroskop und dem Magnetometer des Smartphones und werden mit einer Frequenz von 25 Hz aufgezeichnet. Bei den Manövern handelt es sich um Abbiegevorgänge, Kehrtwenden, Beschleunigungen, sowie Brems- und Ausweichvorgänge. Sie werden jeweils in eine aggressiven und einer nicht-aggressiven Variante abgespeichert, damit der Algorithmus später während der Fahrt überprüfen kann, ob der Fahrer das Manöver gerade aggressiv oder nicht-aggressiv durchführt. Für die Erkennung der Manöver wird der Dynamic-Time-Warping (DTW)-Algorithmus benutzt. Dieser vergleicht ein Signal abschnittsweise mit einer Menge bestehender Muster oder Templates, wobei das Muster auch dann dem korrekten Template zugeordnet werden kann, wenn das Signal gestreckt oder gestaucht ist. Er wird in der Spracherkennung bereits erfolgreich eingesetzt, um Wörter trotz verschiedener Betonungen und Aussprachen zu erkennen. Ein Vergleich der Signale des Smartphone mit den Signalen fahrzeuginterner Sensoren zeigt, dass die Smartphonesignale zwar etwas verrauscht sind, nach einer Tiefpass-Filterung aber gut mit dem Signal der Inertialsensoren korrelieren. Durch Sensorfusion der Gyroskop- und Beschleunigungssensordaten konnten so 97 % der aggressiven Fahrmanöver von Versuchsfahrten mit drei verschiedenen Fahrzeugen und Fahrern korrekt identifiziert werden.

In [29] versuchen Eren et al. anhand verschiedener vordefinierter Manöver zu erkennen, ob der Fahrer diese Manöver sicher oder unsicher absolviert. Auch hier werden als Eingangsdaten die Signale vom Beschleunigungssensor, dem Gyroskop und dem Kompass eines Smartphones genutzt. Wie schon in [49] wird auch hier ein Dynamic-Time-Warping (DTW)-Algorithmus mit einer zusätzlichen Endpunktdetektion benutzt, um die einzelnen Manöver zu erkennen. Für die Erkennung, ob der Fahrer das Manöver sicher oder unsicher ausgeführt hat, werden verschiedene Klassifikatoren auf ihre Ausführungsdauer und ihrer Genauigkeit untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass der Bayes-Klassifikator die besten Ergebnisse erzielt. Die Klassifikation basiert hierbei auf einem Maximum-a-posteriori-Kriterium über verschiedene Events. Mit diesem Klassifikator wurden bei Tests 14 von 15 Fahrer korrekt klassifiziert.

Li et al. stellen in [62] eine Methode vor, in der das Smartphone nicht an einer festen Position im Fahrzeug befestigt sein muss, um valide Daten zu generieren. Durch Wavelet-Transformation der Gyroskop-Daten wird es möglich, die Relativbewegung des Smartphones, beispielsweise auf dem Beifahrersitz, von den Bewegungsdaten des Fahrzeugs zu unterscheiden. Dies ist komfortabler und verringert die Anzahl unbrauchbarer Daten durch eine Fehlbedienung des Fahrers. Paefgen et al. untersuchen in ihrem Beitrag [77], inwiefern Smartphones geeignet sind, kritische Fahrevents aufzuzeichnen. Dazu vergleichen sie in einer großen Feldstudie die Aufzeichnungen der Smartphones mit Aufzeichnung einer IMU (Inertiale Messeinheit), die fest im Fahrzeug verbaut ist. Dabei stellen sie fest, dass die Smartphones mehr kritische Events aufzeichnen als die IMU. Sie führen dies auf Abweichungen der Position des Smartphones im Fahrzeug von der kalibrierten Position zurück. Außerdem prüfen sie mögliche Einflüsse auf die Detektion. Dabei stellen sie fest, dass das Wetter und die Tageszeit keinen Einfluss haben, die Straßenklasse jedoch sehr wohl berücksichtigt werden muss. Alles in allem sind die Daten der Smartphones aber dazu geeignet, einen Fahrstil klassifizieren zu können.

### **4.2.12 Ansätze aus der Unfallforschung**

Auch für die Unfallforschung ist es interessant den Fahrstil des Fahrers zu kennen, um beispielsweise zu untersuchen, wie bestimmte Unfallbilder zu Stande kommen oder welche Fahrstile bestimmte Unfallarten begünstigen. Dafür wurde schon früh begonnen zu untersuchen, welche Parameter Ein-

fluss auf die unterschiedlichen Unfallauslöser haben. Als einen sehr wichtigen Einflussparameter, vor allem für Kurvenunfälle, identifizierten Schimmelpfennig et al. die Querbeschleunigung in [89] und [90]. In den beiden Beiträgen wurden Untersuchungen zur Querbeschleunigung in der alltäglichen Realfahrt auf öffentlichen Straßen durchgeführt. In [89] beschreiben Schimmelpfennig et al., dass man bei der maximalen Querbeschleunigung zwischen der physikalischen Stabilitätsgrenze und der im Straßenverkehr tatsächlich auftretenden Querbeschleunigungen unterscheiden muss. Bei der physikalischen Stabilitätsgrenze handelt es sich um die maximale Querbeschleunigung, bei der das Fahrzeug gerade noch nicht anfängt zu schleudern oder zu rutschen. Sie lässt sich direkt über Haftbeiwert  $\mu$  des Systems Straße-Rad beschreiben. Die Grenz-Querbeschleunigung, bei der das Fahrzeug beginnt zu rutschen bzw. zu schleudern ist dann:

$$a_{\text{quer}} = \mu \cdot g.$$

Über diese Querbeschleunigung  $a_{\text{quer}}$  und den Kurvenradius  $r$  kann man direkt die maximal mögliche Kurvengeschwindigkeit  $v_{\text{max}}$  berechnen. Sie ergibt sich zu:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{a_{\text{quer}} \cdot r}.$$

Im weiteren Verlauf wurden von Schimmelpfennig et al. Querbeschleunigungen bei Realfahrten gemessen und analysiert. Sie stellten fest, dass die höchsten Querbeschleunigungen bei Kurvenfahrt auftreten. Diese lagen aber immer noch weit unter der oben definierten physikalisch maximal möglichen Querbeschleunigung. Die Querbeschleunigungen bei Spurwechseln waren nochmals bedeutend geringer. Es wird deshalb anhand der in der Kurve auftretenden Querbeschleunigungen eine sogenannte Sicherheitsgrenze der Querbeschleunigung für den Normalfahrer definiert. Sie basiert auf Messungen und wurde auch mit weiteren Messungen aus der Literatur abgeglichen. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung. Die höchste akzeptierte Querbeschleunigung liegt bei ca.  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  und beträgt ca.  $4,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . Bei kleineren und größeren Geschwindigkeiten ist sie allerdings geringer. Sie lässt sich laut Schimmelpfennig et al. formelmäßig wie folgt beschreiben:

$$a_{\text{quer}} = 0,155 \cdot v \cdot e^{-\left(\frac{v}{70}\right)^{1,85}}.$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Geschwindigkeit in  $\frac{km}{h}$  einzusetzen ist und das Ergebnis  $a_{quer}$  sich in  $\frac{m}{s^2}$  ergibt. Diese Sicherheitsgrenze für den Normalfahrer wurde auch von weiteren Forschern überprüft und konnte bestätigt werden ([35], [55] und [26]).

## 4.3 Umsetzung

In diesem Abschnitt erfolgt die Umsetzung mit Matlab/Simulink. Der genaue Aufbau wird in 4.3.1 vorgestellt. Anschließend beschreibt der Autor die Funktionsweise bevor er abschließend die Funktionstests in der Simulation vorstellt. Das Grundkonzept der Fahrstilerkennung in dieser Arbeit basiert auf einer Klassifizierung in drei Klassen. Diese drei Klassen sind die Klassen *komfortabel*, *normal* und *sportlich*. Diese Aufteilung erscheint nach umfangreicher Literaturrecherche als ausreichend, um die meisten Grundausprägungen differenzieren zu können und trotzdem noch eine hohe Trennschärfe zwischen den einzelnen Klassen zu erreichen. Eine höhere Anzahl von Klassen würde die Unterscheidung benachbarter Klassen erschweren und könnte dadurch zu Fehlklassifizierungen führen. Im Folgenden werden die Fahrstile für diese Arbeit definiert, um dem Leser ein Verständnis zu geben und Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die Definitionen sind aus [40] übernommen.

**Komfortabel** Der Fahrer ist moderat unterwegs und nur geringe Längs- und Querbeschleunigungen werden toleriert; Geschwindigkeitslimits und von den Verkehrsregeln geforderter Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug werden beachtet; Fahrer nutzt das ACC<sup>3</sup> auf der Autobahn

**Normal** Längs- und Querbeschleunigungen sind der Situation angepasst; der Fahrer fährt im Straßenverkehr mit; Geschwindigkeitslimits und Abstand werden im Mittel eingehalten

**Sportlich** Der Fahrer nutzt den vollen Umfang der Fahrzeuglängs- und Querdynamik; überschreitet Geschwindigkeitslimits und hält lediglich einen geringen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug

---

<sup>3</sup> ACC - Active Cruise Control oder Abstandsregeltempomat. Regelt automatisch eine Geschwindigkeit und den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ein, sobald ein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden ist.

Das System liefert für jeden Fahrstil ein scharfes Ausgangssignal, wobei bei *komfortabler* Fahrweise der Wert 1, bei *normaler* Fahrweise der Wert 2 und bei *sportlicher* Fahrweise der Wert 3 ausgegeben wird. Das Fahrstil-signal kann dann an weitere Systeme weitergeleitet werden. Die Literaturrecherche ergab, dass es bei der Fahrstilerkennung essentiell ist, zwischen verschiedenen Fahrsituationen zu unterscheiden, um eine möglichst hohe Trennschärfe zwischen den einzelnen Fahrstilen zu erreichen. Der Grund dafür ist, dass die Eingangsparameter in verschiedenen Fahrsituationen unterschiedlich aussagekräftig im Hinblick auf den Fahrstil sind. In dieser Arbeit erfolgt die Unterscheidung der Fahrsituation über die Straßenklasse, da dies eine einfache Möglichkeit ist, zwischen verschiedenen Fahrsituationen zu unterscheiden. In dieser Arbeit wurden die vier unterschiedlichen Straßenklassen „unbefestigte Straßen“, „innerörtliche Straßen“, „Überlandstraßen“ und „Autobahnen“ definiert. Für jede dieser Straßenklassen sind andere Eingangsgrößen zu berücksichtigen. Das Signal, auf welcher Straßenklasse sich das Fahrzeug gerade befindet, wird normalerweise vom Navigationssystem bereitgestellt.

### 4.3.1 Aufbau und Funktionsweise

#### Eingangsparameter

Wie bereits erwähnt, werden für jede Straßenklasse verschiedene Eingangsgrößen berücksichtigt. Die Auswahl unterschiedlicher Eingangsparameter für jedes Teilsystem erlaubt es, auf die Besonderheiten jeder Straßenklasse einzugehen und den aktuellen Fahrstil bestmöglich zu bewerten. Welche Parameter für welche Straßenklasse berücksichtigt werden, ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Danach folgt eine Übersicht, in welchem Bereich sich die Parameter *Längsbeschleunigung*, *Querb beschleunigung* und *Zeitlücke* im Realbetrieb normalerweise bewegen, um daraus mögliche Schwellenwerte zu bestimmen.

**Längsbeschleunigung** Die Längsbeschleunigung muss in diesem Zusammenhang immer in Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen unterteilt werden, da diese normalerweise unabhängig voneinander sind. Dabei ist die tolerierte positive Beschleunigung abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Bei Beschleunigungsvorgängen nimmt demnach die tolerierter Längsbeschleunigung mit zunehmender Geschwindigkeit unabhän-

Straßenklasse	Berücksichtigte Parameter
unbefestigte Straße	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine</li> </ul>
Stadt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Längsbeschleunigung</li> <li>• Verzögerung</li> <li>• Geschwindigkeit</li> </ul>
Überlandstraßen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Längsbeschleunigung</li> <li>• Querschleunigung</li> <li>• Verzögerung</li> <li>• Geschwindigkeit</li> <li>• Zeitlücke</li> </ul>
Autobahn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Längsbeschleunigung</li> <li>• Geschwindigkeit</li> <li>• Zeitlücke</li> <li>• ACC Benutzung</li> </ul>

Tabelle 4.1: Berücksichtigte Parameter je Straßenklasse

gig vom Fahrstil ab. Bossdorf-Zimmer et al. betrachten in [13] drei verschiedene Fahrstile („schonend“, „durchschnittlich“ und „sportlich“). Die Daten wurden in einer groß angelegten Studie mit über 1,5 Millionen Messkilometern erfasst. In Abbildung 4.6 ist diese Abhängigkeit auf der linken Seite dargestellt. Dieser Zusammenhang kann zwei Ursachen haben. Zum einen kann es am Fahrzeug liegen, da mit zunehmender Geschwindigkeit die Fahrwiderstände überproportional ansteigen und somit die physikalisch mögliche Beschleunigungen abnehmen, da jedes Fahrzeug nur eine endlich hohe Leistung zur Verfügung stellen kann. Zum anderen kann es auch am Fahrer selbst liegen. Seine Wahrnehmung der Geschwindigkeit, Ängste oder auch eine hohe kognitive Belastung bei höheren Geschwindigkeiten, könne die tolerierte Längsbeschleunigung beeinflussen. Deml et al. erwähnen in [21] ebenfalls, dass die real ausgeführten Längsbeschleunigungen von der Ausgangsgeschwindigkeit und von der Geschwindigkeitsdifferenz abhängig sind.

Während Bossdorf-Zimmer et. al eine Unabhängigkeit der tolerierten Verzögerung von der Geschwindigkeit beschreiben (siehe Abbildung 4.6 auf der rechten Seite), beschreibt Ebersbach in seiner Dissertation [28] eine Abhän-

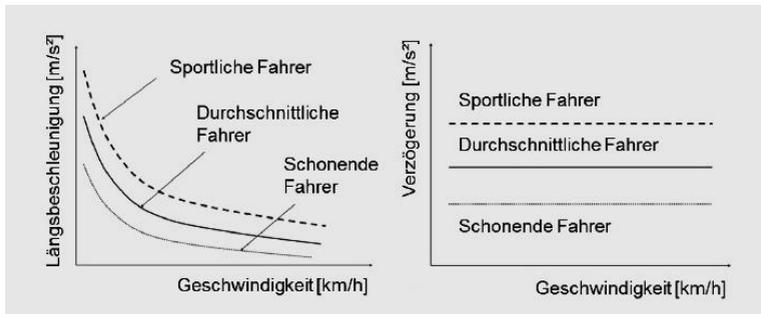


Abbildung 4.6: Grenzmuster aus der Korrelation von Längsbeschleunigung (links) und Verzögerung (rechts) zur Fahrzeuggeschwindigkeit beim Antreiben und Verzögern, aus [13]

gigkeit der Verzögerung von der Geschwindigkeitsdifferenz des Bremsvorgangs. Dabei steigt die tolerierte Verzögerung mit wachsender Geschwindigkeitsdifferenz degressiv an. Der Zusammenhang ist in Abbildung 4.7 für einen als „normal“ klassifizierten Fahrstil dargestellt. Außerdem erwähnt Ebersbach in seiner Arbeit, dass die Abweichungen bei den tolerierten Verzögerungen zwischen dem „komfortablen“ und dem „sportlichen“ Fahrstil besonders mit niedrigen Geschwindigkeiten deutlich ausfallen. Dadurch ist die Verzögerung besonders in der Stadt oder auf Überlandstraßen, wo die Geschwindigkeiten nicht so hoch sind, ein geeigneter Parameter für die Klassifizierung des Fahrstils.

Als Grenzwerte für einen „normalen“ Fahrstil findet man in der Literatur viele unterschiedliche Angaben. In seiner Diplomarbeit ([61]) hat Lehert eine Literaturrecherche zu diesem Thema durchgeführt und die Grenzwerte verschiedener Studien zusammengetragen. In seinen Ergebnissen findet man für die Längsbeschleunigung einer „normalen“ Fahrweise einen Median von  $2,25 \frac{m}{s^2}$  aus 6 Studien. Alle Werte der Studien lagen zwischen  $1,9 \frac{m}{s^2}$  und  $2,8 \frac{m}{s^2}$ . Für die Verzögerung erwähnt Lehert sieben Quellen zwischen  $-4 \frac{m}{s^2}$  und  $-2,45 \frac{m}{s^2}$  mit einem Median von  $-2,55 \frac{m}{s^2}$ .

Man muss bei diesen Werten allerdings immer das betrachtete Fahrzeug im Hinterkopf behalten und die Werte für jede Studie bzw. jedes Fahrzeug entsprechend anpassen. Das subjektive Empfinden von Beschleunigungen gestaltet sich in jedem Fahrzeug unterschiedlich und daher müssen Fahrzeugkennwerte, wie Leistung, Gewicht, oder Fahrwerksparameter, bei der

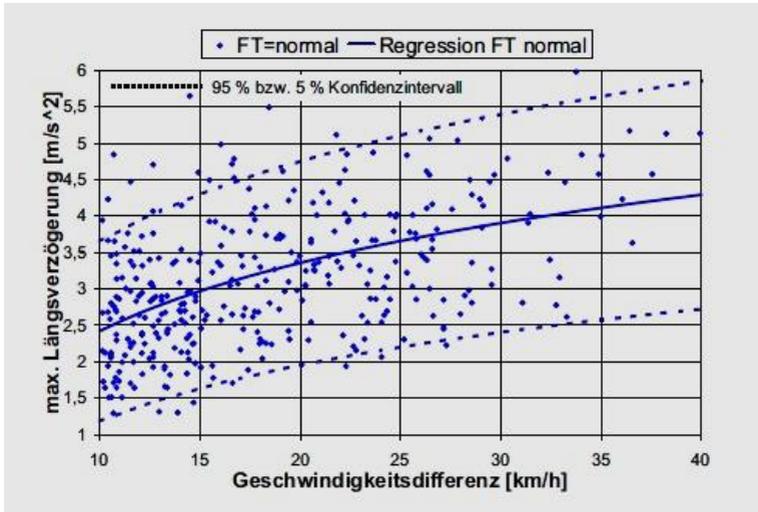


Abbildung 4.7: Zusammenhang zwischen der maximalen Verzögerung und der Geschwindigkeitsdifferenz für den „normalen“ Fahrstil, aus [28]

Klassifizierung des Fahrstils berücksichtigt werden. Eine „sportliche“ Fahrweise in einem älteren Kleinwagen, kann sich in einem modernen Sportwagen subjektiv ziemlich „komfortabel“ anfühlen. Die gewählten Werte für die verschiedenen Klassen werden später in dieser Arbeit beschrieben.

**Querbeschleunigung** Wie schon im Abschnitt 4.2.12 erwähnt ist die tolerierte Querbeschleunigung stark geschwindigkeitsabhängig und kann nach Schimmelpfennig [89, 90] als „Sicherheitsgrenze des Normalfahrers“ formelmäßig beschrieben werden. Der Unterschied zwischen dieser Grenze und der ebenfalls in Abschnitt 4.2.12 beschriebenen physikalischen Rutschgrenze können damit erklärt werden, dass zum einen die Streckenführung unübersichtlich sein kann. Zum anderen will der Fahrer aber für eine erhöhte Sicherheit eine Reserve zum Ausweichen in Gefahrensituationen zur Verfügung haben und er versucht einen gewissen Reisekomfort zu gewährleisten.

In den Untersuchungen von Ebersbach [28] und Hamberger [43] wird die Querbeschleunigung, die vom Fahrer akzeptiert wird, als Funktion des Kur-

venradius beschrieben. Diesen Zusammenhang zeigen Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9. In Abbildung 4.8 beschreibt die zulässige Querbeschleunigung einen Wert, der sich aus einem angenäherten Minimum der tolerierten Querbeschleunigungen ergibt und als Eingangssignal für ein Fahrerassistenzsystem dienen soll.

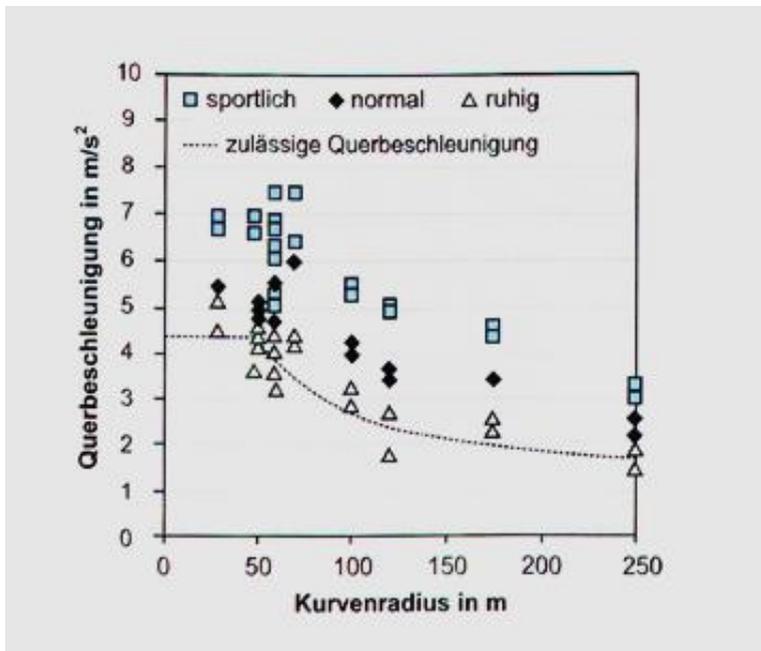


Abbildung 4.8: Akzeptierte Querbeschleunigungen unterschiedlicher Fahrstile bei verschiedenen Kurvenradien, aus [43]

In engen Kurven mit kleinem Radius werden demnach höhere Querbeschleunigungen akzeptiert, als in Kurven mit großem Radius. Ein Grund kann sein, dass bei Kurven mit großem Radius bedeutend höhere Geschwindigkeiten benötigt werden, um die gleichen Querbeschleunigungen zu realisieren. Diese hohen Geschwindigkeiten werden im realen Verkehr aber nicht umgesetzt. Dies zeigt aber auch, dass der Streckenverlauf eine große Bedeutung hat, wenn man den Fahrstil anhand der Querbeschleunigung klassifizieren will. Auf Strecken mit ausschließlich großen Kurvenradien

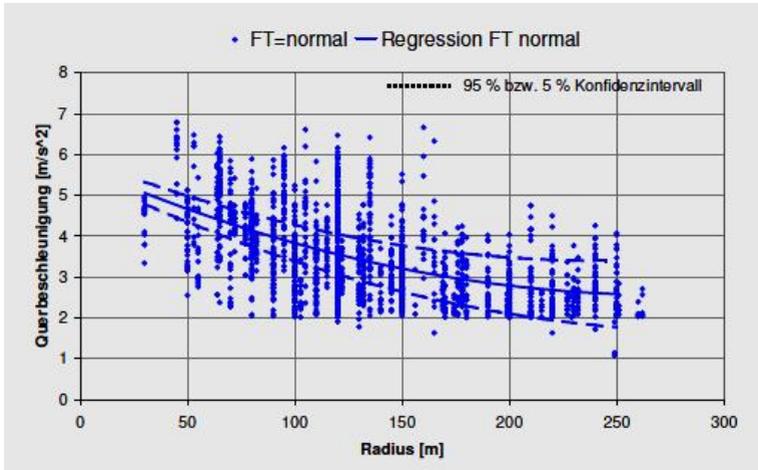


Abbildung 4.9: Zusammenhang zwischen Querbeschleunigung und Kurvenradius für eine „normale“ Fahrweise, aus [28]

bietet sich dem Fahrer gar nicht die Möglichkeit ähnlich hohe Querbeschleunigungen zu erreichen, wie auf kurvenreichen Strecken mit engen Kurvenradien. Um Fehlklassifikationen zu vermeiden, muss deshalb die Kurvigkeit des Streckenabschnitts bei einer Bewertung über die Querbeschleunigung berücksichtigt werden.

Manns konnte in seinen Untersuchungen in seiner Dissertation [68] weitere Abhängigkeiten erkennen. So sind die gemessenen Querbeschleunigungen innerhalb des komfortablen Bereichs größer, wenn der Richtungsänderungswinkel einer Kurve größer ist. Wenn die Querbeschleunigung durch einen langen Übergangsbogen o.ä. langsam ansteigt, nimmt sie häufig besonders hohe Werte an, die der Fahrer auch noch als angenehm empfindet. Plötzlich auftretende Querbeschleunigungen hingegen werden vom Fahrer als unangenehm empfunden.

Auch hier hat Lehert in seiner Literaturrecherche [61] Grenzwerte für die von einem als „normal“ klassifizierten Fahrer tolerierten Querbeschleunigungen erwähnt. Der Median aus elf Studien beträgt hier  $4 \frac{m}{s^2}$ . Der Minimalwert lag hierbei bei  $2 \frac{m}{s^2}$  und der Maximalwert bei  $6 \frac{m}{s^2}$ . Bei diesen Werten muss allerdings beachtet werden, dass es sich bei den Studien teilweise um ältere Studien handelt und sich im Bereich der Fahrdynamik und Fahrwer-

ke moderner Fahrzeuge sehr viel weiterentwickelt hat. Daher ist das Empfinden bei Querschleunigungen bei modernen Fahrzeugen im Vergleich zu den in den Studien betrachteten Fahrzeugen deutlich verschoben. Auch die Fahrzeugklasse muss bei weiteren Untersuchungen Beachtung finden, da Querschleunigungen in einem Sportwagen eher toleriert werden, als in einem Kleinwagen. Auch hier werden die konkreten Werte später in der Umsetzung genauer definiert.

**Zeitlücke** Die Zeitlücke beschreibt den zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Definiert ist sie als der Zeitunterschied, mit dem zwei Fahrzeuge einen festen Beobachtungspunkt passieren. Der Gesetzgeber gibt eine Zeitlücke von zwei Sekunden als geforderten Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug vor. Oft wird als Daumenwert auch der halbe Tachowert in Metern angegeben. Liegt der Abstand unter 1,5 Sekunden, gilt es laut Gesetz als Ordnungswidrigkeit, unter 0,9 Sekunden wird vom Gesetzgeber ein Bußgeld erhoben. In der Praxis werden diese Mindestabstände aber häufig unterschritten und zu dichtes Auffahren ist in Deutschland sehr oft anzutreffen. Hartwich beschreibt schon in seiner Dissertation [44], dass die gesetzlichen Vorgaben zum Abstand in der Praxis nicht eingehalten werden und vor allem bei höheren Geschwindigkeiten deutlich unterschritten werden. Auch Filzek beschreibt in seiner Dissertation [32] eine Probandenstudie mit 24 Probanden, die zum Ergebnis kam, dass die gesetzlichen Mindestabstände, trotz Versuchsleiters auf dem Beifahrersitz, teilweise deutlich unterschritten werden. Abbildung 4.10 stellt die Ergebnisse dieser Probandenstudie dar.

Man kann erkennen, dass im überwiegenden Teil der gefahrenen Zeit (83 Prozent) die Zeitlücke unterhalb von 1,5 Sekunden liegt. In 41 Prozent der Zeit wurde sogar ein Abstand von weniger als 0,9 Sekunden aufgezeichnet, was einem Bußgeld gleichkommen würde.

Letztendlich wird die Zeitlücke aber von vielen Faktoren bestimmt. Schulz et al. beschreiben in [92] Abhängigkeiten vom Alter und Geschlecht des Fahrers, von seinem Wohlbefinden und von Umwelteinflüssen wie Anzahl der Spuren, Sichtverhältnisse und der Verkehrsdichte. In diesem Abschnitt konnten zwar keine exakten Grenzwerte festgelegt werden, die beschriebenen Untersuchungen liefern aber gute Anhaltspunkte wie die Klassifikationsgrenzen für Fahrstile bezüglich der Zeitlücke für die weitere Entwicklung der Fahrstilerkennung aussehen können.

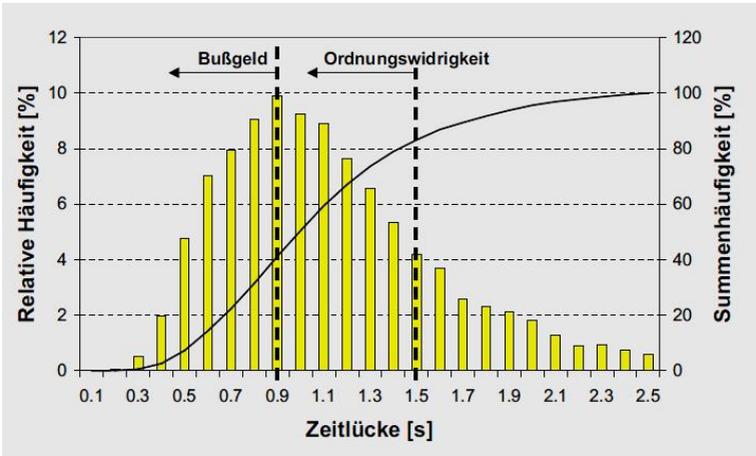


Abbildung 4.10: Zeitliche Häufigkeit der Zeitlücken bei Folgefahrten auf Autobahnen, aus [32]

### Aufbau und Funktion Gesamtsystem

Die Aufteilung auf die verschiedenen Straßenklassen, wie sie durch die Unterteilung der Eingangsparameter realisiert ist, spiegelt sich auch im Aufbau des Systems wieder. Die Grundstruktur ist in Abbildung 4.11 zu finden. Für jede Straßenklasse existiert ein eigenes Teilsystem, welches den Fahrstil für die entsprechende Straßenklasse detektiert. Innerhalb dieser Teilsysteme werden dann die einzelnen Parameter für sich verarbeitet. Die Verarbeitung der Parameter innerhalb der Untersysteme beschreibt der Autor weiter unten.

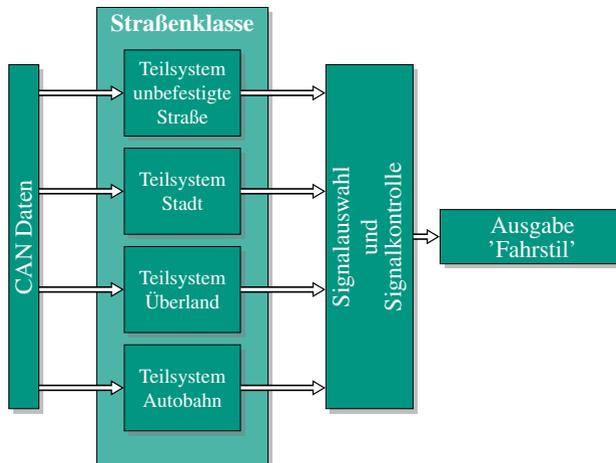


Abbildung 4.11: Systemstruktur Fahrstilerkennung, übersetzt aus [22]

In einem separaten Block erfolgt dann eine Signalauswahl und eine Signalkontrolle. Die Signalauswahl selektiert, welches Signal aktuell entsprechend der gerade befahrenen Straßenklasse benötigt wird. Die Signalkontrolle dient dazu, zu verhindern, dass das Signal ständig zwischen zwei verschiedenen Stufen hin- und herwechselt. Dies geschieht durch eine Mindestzeit, die das Signal konstant bleiben muss. Diese Zeit wird so festgelegt, dass der Fahrer nicht von zu häufigen Signalwechseln irritiert wird, das System selbst aber trotzdem auf Fahrstilwechsel während der Fahrt dynamisch reagieren kann. Außerdem wird durch die Signalkontrolle sichergestellt, dass der Fahrstil nur zwischen zwei benachbarten Fahrstilen wechselt und nicht beispielsweise direkt von *sportlich* zu *komfortabel* springt oder umgekehrt. Dies würde den Fahrer ebenfalls irritieren.

### Aufbau und Funktion Teilsysteme

Die Teilsysteme für die einzelnen Straßenklassen sind aufgebaut, wie es in Abbildung 4.12 beispielhaft für das Teilsystem *Überlandstraßen* dargestellt ist.

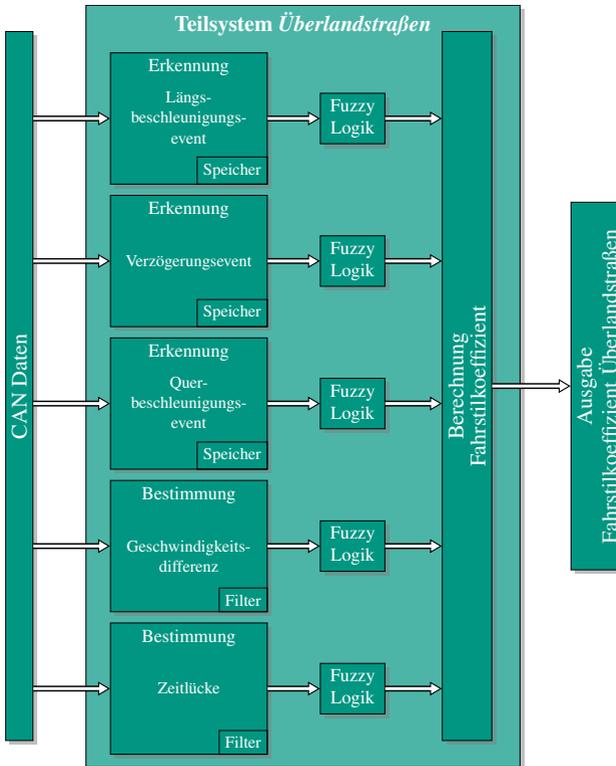


Abbildung 4.12: Struktur Teilsystem Überlandstraßen, übersetzt aus [22]

Für jede relevante Eingangsgröße existiert ein eigener Block, in dem die Werte permanent eingelesen werden. Im Falle von Längsbeschleunigung, Querbeschleunigung und Verzögerung wird zuerst einmal eine Korrektur der Werte vorgenommen, um streckenbedingte Einflüsse zu reduzieren. Wie im Abschnitt 4.3.1 beschrieben, ist die tolerierte Querbeschleunigung stark vom Kurvenradius abhängig. Mit steigendem Kurvenradius sinkt der Maximalwert der tolerierten Querbeschleunigung durch den „Normalfahrer“. Um im weiteren Verlauf eine einheitliche Bewertung der Querbeschleunigung vornehmen zu können, wird diese mit einem kurvenradiusabhängigen Faktor multipliziert. Dadurch werden alle Werte auf das Toleranzmaß des Fahrers für Querbeschleunigungen bei einem Kurvenradius von 50 Me-

tern bezogen und lassen sich somit besser der entsprechenden Klasse zuordnen. Auch die Längsbeschleunigung wird korrigiert, um Abhängigkeiten von der Straßensteigung zu eliminieren und den daraus entstandenen Längsbeschleunigungswert, der sich dann immer auf eine Längsbeschleunigung in der Ebene bezieht, universell weiterverwenden zu können. Dies erfolgt für Beschleunigungen und Verzögerungen sowohl in Bergauf- als auch in Bergabpassagen und korrigiert über einen Faktor den situationsbedingten Vor- oder Nachteil durch die Hangabtriebskraft.

Nach der Wertekorrektur wird überprüft, ob der Wert einen gewissen Grenzwert für eine Mindestzeit überschreitet. Man spricht dann von einem stattgefundenen Ereignis. Der Schwellenwert hierfür wurde entsprechend der gefundenen Werte für real in der Praxis auftauchende Werte gewählt. Dies dient dazu, dass Eingangsparameter nur dann für die Fahrstilerkennung benutzt werden, wenn sie auch interessante Werte für die Klassifizierung liefern. Außerdem wird beispielsweise ein Bremsmanöver nur dann erkannt, wenn tatsächlich das Bremspedal gedrückt wird. Auch Rückwärtsfahrten werden bei der Klassifizierung nicht berücksichtigt, da diese Manöver für den Fahrstil nicht aussagekräftig sind. Sind alle Bedingungen für eine Verwendung des Eingangswertes erfüllt, wird der entsprechende korrigierte Wert in den Speicher geschrieben. Um die Berücksichtigung von Ausreißern zu vermeiden, wird der zweitgrößte Wert in diesem Speicher dann an die Fuzzy Logik weitergeleitet, um den Fahrstilkoefizient zu berechnen. Es sind auch andere Werte wie der Median oder der Mittelwert denkbar, jedoch lieferten die Simulationen mit dem zweitgrößten Wert bisher gute Ergebnisse, sodass dieser Wert beibehalten wurde. Bei den Eingangsparametern Geschwindigkeitsdifferenz und Zeitlücke ist das anders. Die Geschwindigkeitsdifferenz bezeichnet die Differenz zwischen dem gesetzlichen Geschwindigkeitslimit und der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit. Dabei wird bei der Zeitlücke mit einem Kalman-Filter ein gewichteter Mittelwert über die vergangene Fahrzeit berechnet, wobei eine exponentielle Vergessensfunktion angewendet wird. Das bedeutet, dass aktuellere Werte einen viel größeren Einfluss auf das Ergebnis haben als Werte, die länger in der Vergangenheit liegen. Diese Werte werden aber nicht komplett ignoriert, sondern haben auch weiterhin einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dieses Vorgehen unter Zuhilfenahme der Speicher und des Kalman-Filters gewährleistet, dass für die weitere Bewertung durch die Fuzzy-Logik immer repräsentative Werte für die betrachtete vorangegangene Fahrt berücksichtigt werden.

In der Fuzzy Logik werden die Werte dann entsprechend der Fuzzy-Regeln den drei verschiedenen Fahrstilklassen zugeordnet. Eine Gesamtübersicht, was die Fuzzy Logik ist und wie sie funktioniert ist in Abschnitt 4.1.1 zu finden. Dabei kann ein Wert auch verschiedenen Klassen zu unterschiedlichen Anteilen zugeordnet werden. Dies wird durch die Zugehörigkeitsfunktion festgelegt. Die Zugehörigkeitsfunktion legt fest, zu welchem Anteil ein bestimmter Eingangswert zu einer bestimmten Menge gehört. Um eine Klassifikation realisieren zu können, muss sich die Summe der Anteile immer zu eins ergeben. In dieser Arbeit wurde mit Trapez- und Dreieckfunktionen eine sehr einfache Umsetzung der Zugehörigkeitsfunktionen verwendet, die sich durch eine einfache Erstellung und Berechnung auszeichnen und auch völlig ausreichend für die benötigte Klassifizierung waren. In Abbildung 4.13 ist eine solche Zugehörigkeitsfunktion am Beispiel des Parameters „Längsbeschleunigung“ dargestellt.

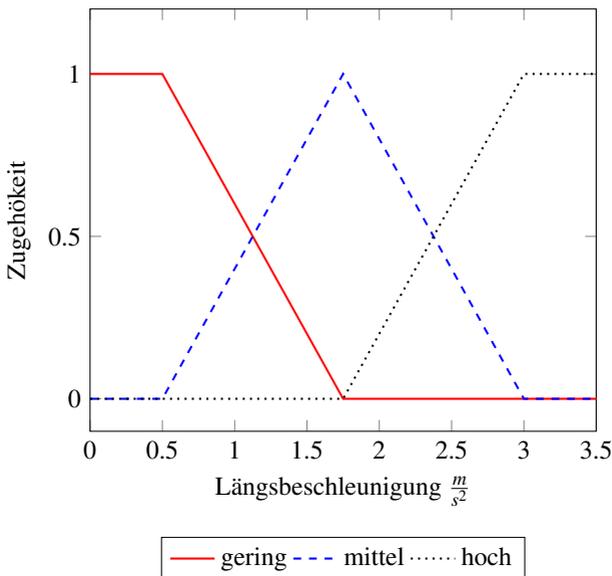


Abbildung 4.13: Zugehörigkeitsfunktion für den Parameter Längsbeschleunigung

Die Linien beschreiben hier die Zugehörigkeit des Parameters „Längsbeschleunigung“ zu den verschiedenen Klassen. Liegt der Wert unter  $0,5 \frac{m}{s^2}$

gehört er voll zur Klasse *gering* (rote Linie). Liegt er zwischen  $0,5 \frac{m}{s^2}$  und  $1,75 \frac{m}{s^2}$  gehört er nur zu einem gewissen Anteil  $x$  zur Klasse *gering* und zum Anteil  $1 - x$  zur Klasse *mittel* (blaue gestrichelte Linie). Zwischen  $1,75 \frac{m}{s^2}$  und  $3 \frac{m}{s^2}$  gehört er zu einem gewissen Anteil  $x$  zur Klasse *mittel* und zum Anteil  $1 - x$  zur Klasse *hoch* (schwarze gepunktete Linie). Über  $3 \frac{m}{s^2}$  wird der Parameter vollständig zur Klasse *hoch* zugeordnet.

Danach werden die Fuzzy-Regeln bzw. Inferenz-Regeln angewendet. Dabei werden linguistische Variablen über verschiedene Operatoren verknüpft und somit neue Mengen gebildet. Auch hier fanden die Regeln in ihrer einfachsten Form Anwendung. Im Falle dieser Arbeit sahen die drei Regeln für die Längsbeschleunigung beispielhaft wie folgt aus:

WENN „Längsbeschleunigungsverhalten\_Landstraße“ ist *gering* DANN  
 Fahrstilhinweis ist „komfortabel“  
 WENN „Längsbeschleunigungsverhalten\_Landstraße“ ist *mittel* DANN  
 Fahrstilhinweis ist „normal“  
 WENN „Längsbeschleunigungsverhalten\_Landstraße“ ist *hoch* DANN  
 Fahrstilhinweis ist „sportlich“

Das bedeutet, dass drei neue Mengen mit den Namen *komfortabel*, *normal* und *sportlich* gebildet werden. Anschließend bei der Defuzzifizierung werden diese Klassen dann wieder auf scharfe Werte, in unserem Fall eine ganze Zahl (1 für komfortabel, 2 für normal und 3 für sportlich), umgewandelt. Dies erfolgt wieder durch Zugehörigkeitsfunktionen, die in diesem Fall aber trivial sind. Ausgangswerte der Fuzzy-Logik-Blöcke sind dann die sogenannten *Fahrstilhinweise* für jeden einzelnen Eingangsparameter dieses Teilsystems. Anschließend wird dann der *Fahrstilfaktor* für das jeweilige Teilsystem berechnet. Dies geschieht über zwei gewichtete Summen. Zuerst wird ein gewichteter Mittelwert aller Fahrstilhinweise des Teilsystems berechnet.

$$\overline{Fsh} = \frac{\sum_{n=1}^N (g_n \cdot Fsh_n)}{\sum_{n=1}^N (g_n)} \quad (4.1)$$

Dabei steht  $N$  für die Gesamtzahl der Fahrstilhinweise bzw. die Eingangsparameter in diesem Teilsystem.  $g_n$  bezeichnet den Gewichtungsfaktor zum

dazugehörigen Fahrstilhinweis  $Fsh_n$ . Für das Teilsystem *Überlandstraßen* ergibt sich für den Mittelwert der Fahrstilhinweise dann folgende Formel:

$$\overline{Fsh} = \frac{g_{al} \cdot Fsh_{al} + g_{-al} \cdot Fsh_{-al} + g_{aq} \cdot Fsh_{aq} + g_v \cdot Fsh_v + g_d \cdot Fsh_d}{g_{al} + g_{-al} + g_{aq} + g_v + g_d} \quad (4.2)$$

Die Indizes stehen dabei für:

- $al$  Längsbeschleunigungsverhalten
- $-al$  Verzögerungsverhalten
- $aq$  Querbeschleunigungsverhalten
- $v$  Geschwindigkeitsverhalten
- $d$  Abstandsverhalten

Als zweiten Schritt wird dann der Fahrstilfaktor  $Fsf$  des Teilsystems aus dem gewichteten Mittelwert der Fahrstilhinweise  $\overline{Fsh}$  aus Gleichung 4.1 und dem Maximum aller Fahrstilhinweise auch mit Hilfe einer gewichteten Summe berechnet:

$$Fsf = g_{max} \cdot \max_{1 \leq n \leq N} Fsh_n + g_{avg} \cdot \overline{Fsh} \quad (4.3)$$

Dabei beschreibt  $g_{max}$  den Gewichtungsfaktor für den Maximalwert und  $g_{avg}$  den Gewichtungsfaktor für den Durchschnittswert aller Fahrstilhinweise. Diese beiden Gewichtungsfaktoren müssen sich zu eins summieren, damit ein Ausgangswert im korrekten Intervall berechnet wird. Für das Teilsystem *Überlandstraßen* ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift mit  $\overline{Fsh}$  aus Gleichung 4.2:

$$Fsf = g_{max} \cdot \max(Fsh_{al}, Fsh_{-al}, Fsh_{aq}, Fsh_v, Fsh_d) + g_{avg} \cdot \overline{Fsh} \quad (4.4)$$

Die Indizes sind die Gleichen wie in Gleichung 4.2 beschrieben. Der Fahrstilfaktor wird dann über den Ausgang des Teilsystems an die Signalauswahl auf der obersten Ebene weitergeleitet. Das weitere Verfahren im Gesamtsystem (Signalauswahl und Signalkontrolle) wurde schon im Abschnitt 4.3.1 beschrieben.

## 4.4 Funktionstest in der Simulation

Für einen ersten Funktionstest der Fahrstilerkennung wurde die Simulation genutzt, da sie reproduzierbares Testen ermöglicht und äußere Einflüsse nicht auftreten bzw. kontrolliert werden können. Die verwendete Umgebung, das Vorgehen und die Ergebnisse der Validierung werden in diesem Abschnitt beschrieben.

### 4.4.1 Validierungsumgebung bzw. -framework

Für die Validierung der Fahrstilerkennung wurde eine Umgebung geschaffen, die eine Validierung des Systems ermöglicht. Dabei wird wie schon für das Testen der Hinweise die Fahrzeugsimulationssoftware „CarMaker“ der Firma „IPG“ eingesetzt. In diesem Fall wird eine Kombination aus „CarMaker“ und „Matlab/Simulink“ verwendet. Dabei wird die betrachtete Teststrecke in CarMaker simuliert. Es werden drei Testfahrten mit angepassten Parametern des Fahrermodells durchgeführt, um dadurch jeweils eine *komfortable*, eine *normale* und eine *sportliche* Fahrt zu simulieren. Während der Simulation werden sämtliche für die Fahrstilerkennung benötigten Parameter aufgezeichnet und gespeichert. Im Anschluss werden diese Aufzeichnungen an bestimmten charakteristischen Punkten zerteilt. Dies sind Stellen, an denen die Geschwindigkeit in den Aufzeichnungen gleich null ist, beispielsweise Stoppschilder. Diese sind örtlich immer am selben Punkt bei der Simulation. Danach werden die einzelnen Teil-Aufzeichnungen in verschiedenen Konstellationen kombiniert, um neue Aufzeichnungen zu generieren, bei denen sich der Fahrstil gerade an diesen charakteristischen Punkten ändert. Das Vorgehen ist in Abbildung 4.14 illustriert.

Die so erstellten Aufzeichnungen, bei denen sich der Fahrstil während der Testfahrt ändert, werden im Folgenden *Mixe* genannt. Nach dem Generieren der *Mixe* werden diese so abgespeichert, dass sie in einer Simulink-Simulation ausgelesen werden und dem Fahrstil-Erkennungs-System zugeführt werden können. Dieses berechnet dann den Fahrstil für den entsprechenden *Mix*. Der Verlauf des Fahrstils wird dann auch abgespeichert und kann dann mit dem Referenz-Fahrstil des Fahrermodells aus der CarMaker-Simulation verglichen werden, um zu überprüfen, in wie weit der tatsächliche Referenz-Fahrstil der Simulation und der vom System erkannte Fahrstil übereinstimmen.

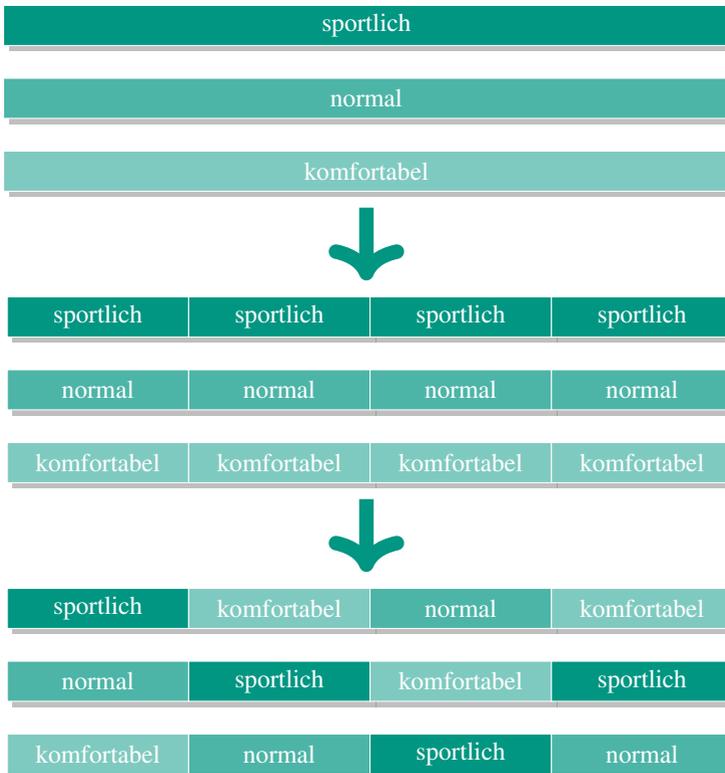


Abbildung 4.14: Ablauf der Generierung von Aufzeichnungen mit wechselndem Fahrstil

#### 4.4.2 Erster Validierungsschritt

Der erste Validierungsschritt wurde von Grabengießer in seiner Masterarbeit [40] durchgeführt und wird in dieser Arbeit für eine vollständige Darstellung der Zusammenhänge nochmal aufgegriffen. Zuerst wurde ein allgemeiner Funktionstest des Fahrstilerkennungssystems durchgeführt. Die Umsetzung des Systems in Matlab/ Simulink ermöglicht ein kontinuierliches Überprüfen der schrittweise erstellten Einzelfunktionen mit Hilfe von generischen Vektoren. Mit zunehmenden Erstellungsfortschritt des Systems können auf diese Art und Weise auch verknüpfte Funktionen, Teilsysteme und das Gesamtsystem getestet und hinsichtlich ihrer Arbeitsweise beurteilt

werden. Dabei ist im ersten Schritt die generelle Arbeitsfähigkeit sicherzustellen und eventuelle Fehlermeldungen beim Kompilieren des Systems zu beheben. Nachdem dieser Funktionstest ein positives Ergebnis lieferte, wurde eine Validierung mit einer Teststrecke durchgeführt. Bei der Teststrecke handelt es sich um einen Rundkurs mit einer Länge von 23 Kilometern Landstraße mit einigen Ortsdurchfahrten. Dadurch konnte in diesem ersten Validierungsschritt nur die Arbeitsweise der Teilsysteme *Stadt* und *Überlandstraßen* validiert werden. Die Teilsysteme *unbefestigte Straße* und *Autobahn* lieferten bei diesem ersten Schritt der Validierung keine Beiträge zur Bewertung des Fahrstils. Ein Bild der Simulationsumgebung und der in diesem Schritt betrachteten Teststrecke ist in Abbildung 4.15 zu finden.



Abbildung 4.15: Simulationsumgebung CarMaker (links) und Streckenverlauf der simulierten Versuchsfahrten (rechts), aus [40]

Der Fahrer wurde, wie bereits weiter oben erwähnt, in der Simulation jeweils für eine *komfortable*, eine *normale* und eine *sportliche* Fahrweise unterschiedlich parametrisiert. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle A.1 im Anhang im Abschnitt A.1 zu finden. Im verwendeten Fahrermodell ist die sinkende Toleranzgrenze für hohe Querschleunigungswerte mit steigender Geschwindigkeit nicht implementiert, sodass die vorgesehene Korrektur der Querschleunigungswerte in Abhängigkeit der Kurvigkeit der Strecke nicht erfolgen kann. Dadurch ist in den Ergebnissen mit einem größeren Einfluss des Streckenverlaufs auf den ermittelten Fahrstil zu rechnen.

Für die ersten Tests wurde eine Grundparametrisierung des Fahrstilerkennungssystems verwendet, dass auf den oben genannten Literaturgrenzwerten

ten basiert. Einige dieser Systemparameter sind in Tabelle A.2 im Anhang im Abschnitt A.1 dargestellt. Es sind hier nur die Teilsysteme *Stadt* und *Überlandstraßen* beschrieben, da die anderen beiden Teilsysteme auf der verwendeten Teststrecke gar nicht berücksichtigt werden. Außerdem wurde das Abstandsverhalten im Teilsystem *Überlandstraße* nicht berücksichtigt, da andere Verkehrsteilnehmer und Folgefahrten in diesem ersten Schritt nicht simuliert wurden. In den Abbildungen 4.16, 4.17 und 4.18 sind die Auswertungen der drei verschiedenen Fahrten mit verschiedenen Fahrstil-Mixen dargestellt. Dabei ist der Signalverlauf des Fahrstils über der Fahrzeit der Simulation aufgetragen. Die rote gestrichelte Linie stellt bei allen Fahrten den Referenz-Fahrstil aus der CarMaker Simulation dar. Die grüne durchgezogene Linie beschreibt den Fahrstil, wie ihn das Fahrstilerkennungssystem anhand der Fahrdaten aus der CarMaker Simulation erkannt hat. Man kann direkt erkennen, dass die Signalkontrolle korrekt arbeitet, denn es treten keine extremen Wechsel vom Fahrstil *sportlich* zum Fahrstil *komfortabel* oder umgekehrt auf. Die Mindestzeit, die das Signal konstant bleiben muss, war bei allen drei Testfahrten auf fünf Sekunden eingestellt, daher gibt es auch sehr kurze Phasen für einzelne Fahrstile. Die unterschiedlichen Längen der einzelnen Testfahrten kommen dadurch zustande, dass die Aufteilung der ursprünglichen Testfahrten ortsbasiert stattfindet. Werden die zerteilten Testfahrten nun zu den *Mixen* zusammengesetzt, sind die einzelnen Anteile der Fahrstile nicht gleich auf die *Mixe* verteilt. Die *Mixe*, die einen größeren Anteil *sportlicher* Fahrt haben, dauern daher nicht so lange, als *Mixe* mit einem hohen Anteil *komfortabler* Fahrt, da der Fahrer die gleiche Strecke sportlich schneller absolviert, als wenn er komfortabel unterwegs ist. Bei der Auswertung existieren drei Möglichkeiten. Der vom System erkannte Fahrstil kann mit dem zu dem Zeitpunkt vom Fahrer ausgeführten Fahrstil übereinstimmen. Dies wird im Folgenden als *exakte* oder *korrekte Klassifizierung* bezeichnet. Bereiche, in denen das System einen benachbarten Fahrstil erkennt, werden als *abweichende Klassifizierung* bezeichnet. *Fehlklassifizierungen* oder falsche Klassifizierungen bezeichnen Bereiche, in denen das System den gegenteiligen Fahrstil erkennt. Wenn der Fahrer beispielsweise einen *komfortablen* Fahrstil ausführt, das System aber einen *sportlichen* Fahrstil erkennt oder umgekehrt, wäre dies eine *Fehlklassifizierung*.

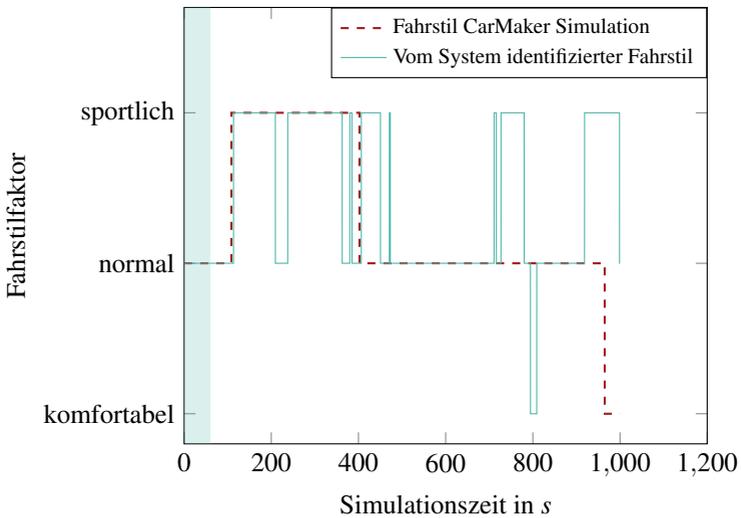


Abbildung 4.16: Ergebnisse für Mix 1 aus [40]

### Erste Fahrt

Prinzipiell folgt der vom System erkannte Fahrstil gut der Vorgabe. *Abweichende Klassifizierungen* treten im Bereich von Fahrstilwechseln in der Vorgabe besonders häufig auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass das System die Aktionen, die mit einem neuen Fahrstil ausgeführt werden, erst erkennen und die Bewertung einbeziehen muss. Treten länger keine, für den Fahrstil interessanten Fahrsituationen bzw. Events auf, kann die Verzögerung im Fahrstilwechsel auch sehr lang werden. Dies liegt nicht direkt am System, sondern an der Tatsache, dass nur bestimmte Fahrsituationen den Fahrstil direkt beeinflussen und dieser nur in diesen Situation klar bestimmt werden kann. Dadurch ist die Erkennung deutlich durch Strecken- und Situationseinflüsse bestimmt. Auch weitere sporadische Abweichungen in der Erkennung können durch einen möglichen Streckeneinfluss erklärt werden, da beispielsweise die Erreichung hoher Querbeschleunigungen zur Klassifizierung eines *sportlichen* Fahrers an die Kurvigkeit des aktuellen Streckenabschnitts gebunden ist. Im Fahrstilerkennungssystem wird der Versuch unternommen, diesen Streckeneinfluss durch die Korrektur des Querbeschleunigungswerts in Abhängigkeit des Kurvenradius zu reduzieren. Allerdings

kann die Korrektur in der Simulation nicht umgesetzt werden, sodass die Streckeneinflüsse sich hinsichtlich der Querbeschleunigung in vollem Ausmaß auswirken. Dies wäre bei Realfahrten vielleicht etwas reduziert, jedoch kommen dann weitere Verkehrseinflüsse dazu, die die Erkennung beeinträchtigen können. Die Auswertung der ersten Fahrt ist in Abbildung 4.16 zu finden. In 73 Prozent der Zeit wird der *korrekte* Fahrstil erkannt. *Abweichende Klassifizierungen* werden in 23 Prozent der Zeit vorgenommen und der Anteil an *Fehlklassifizierungen* liegt bei nur drei Prozent.

## Zweite Fahrt

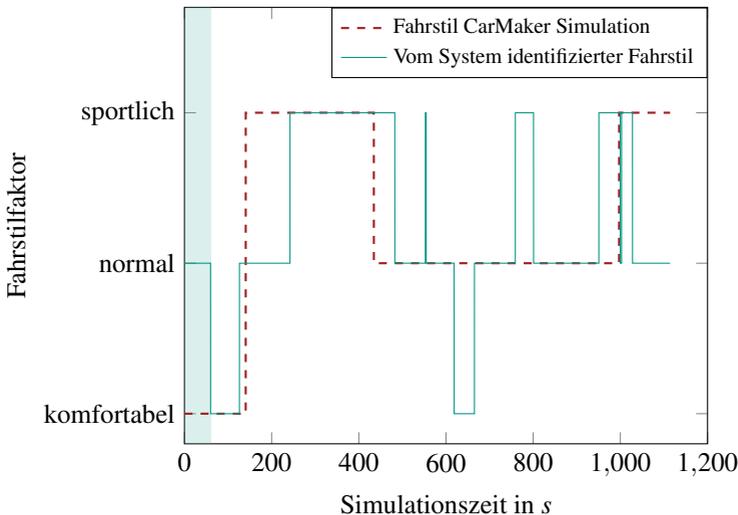


Abbildung 4.17: Ergebnisse für Mix 2 aus [40]

Bei der Auswertung der zweiten Fahrt fällt auf, dass keinerlei *Fehlklassifizierungen* auftreten. Insgesamt folgt der erkannte Verlauf der Vorgabe mit kleinen Abweichungen sehr gut. Die Anpassungszeit nach Fahrstilwechseln ist bei dieser Testfahrt relativ lang, was aber an dem abrupten Wechsel vom Fahrstil *komfortabel* zum Fahrstil *sportlich* liegen kann. Die Abweichung zu Beginn der Fahrt liegt an der im System festgelegten Initialisierungspha-

se von 60 Sekunden Dauer. In dieser Zeit wird immer der Fahrstil *normal* ausgegeben, um dem System die Möglichkeit zu geben, sich zu adaptieren.

Die Auswertung der zweiten Fahrt zeigt Abbildung 4.17. Wie bereits erwähnt treten keinerlei *Fehlklassifizierungen* auf. Der Anteil der *korrekten* Klassifizierungen liegt bei 60, der Anteil an *abweichenden* Klassifizierungen bei 40 Prozent.

### Dritte Fahrt

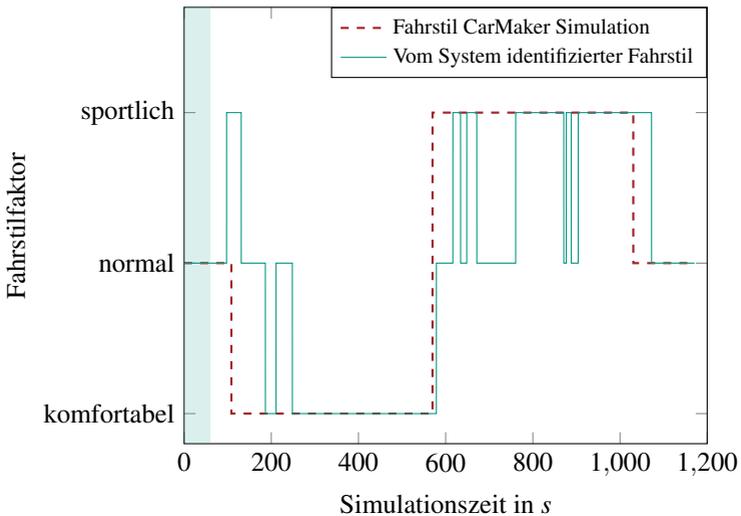


Abbildung 4.18: Ergebnisse für Mix 3 aus [40]

Auch der *Mix 3* liefert ähnliche Ergebnisse, wie die anderen beiden *Mixe*. Auch hier folgt der erkannte Verlauf gut der Vorgabe, wenn auch wieder kleine Abweichungen auftreten. Auch hier treten vor allem bei den Fahrstilwechseln wieder Abweichungen auf, was wie auch in den beiden anderen Fahrten ein strecken- bzw. situationsspezifischer Einfluss sein kann. Die Auswertung der zweiten Fahrt ist in Abbildung 4.18 dargestellt. Der Anteil *korrekter* Klassifikationen liegt hier bei 71 Prozent, der Anteil *abweichender* Klassifikationen bei 26 Prozent und der Anteil an *Fehlklassifizierungen* bei drei Prozent.

## Gesamtergebnis

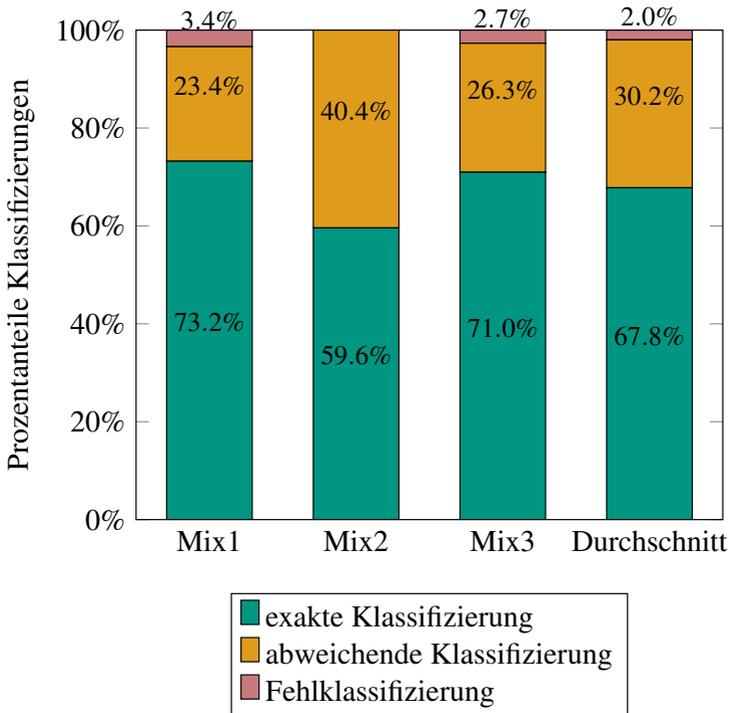


Abbildung 4.19: Gesamtergebnis Validierungsschritt 1 nach [40]

Abbildung 4.19 zeigt das Gesamtergebnis des ersten Validierungsschritts. Im Durchschnitt über die drei Testfahrten erreicht das Fahrstilklassifikationssystem über 68 Prozent der Zeit eine *exakte* Klassifikation. Der Anteil der *abweichenden* Klassifikationen liegt bei 30 Prozent und der Anteil der *Fehlklassifizierungen* bei nur zwei Prozent. Dies zeigt ein gutes Potential des umgesetzten Systems, da es sich bei der Applikation um ein Grundsetup handelt und mit weiteren Parameteranpassungen noch etwas mehr an Performance erreicht werden könnte. Da das vom System erkannte Signal als Eingang für eine Adaption eines Fahrerassistenzsystems und nicht für ein sicherheitskritisches System fungieren soll, ist eine hundertprozentig kor-

rekte Klassifizierung zwar wünschenswert, aber keine Voraussetzung für einen Einsatz des Systems. Weitere Tests und eine Anpassung der Parameter sind aber unerlässlich, um das System weiter zu verbessern. Die Anpassung der Parameter kann über eine einzelne Parameterdatei sehr einfach erfolgen.

### 4.4.3 Zweiter Validierungsschritt

Da im ersten Validierungsschritt zum einen nicht alle Teilsysteme auf ihre Funktion überprüft wurden, sondern vor allem das Teilsystem *Autobahn* außen vor gelassen wurde, wurde ein weiterer Schritt der Validierung realisiert. Dies erfolgte im Rahmen der Bachelorarbeit von Philipp Grausam [41] auf Vorgabe der Aufgabenstellung des Autors dieser Arbeit und wird hier aufgegriffen, um den Fluss der Arbeit zu erhalten. Dabei war das Ziel alle Teilsysteme und die einzelnen Bewertungsanteile getrennt zu testen, aber auch alle Teilsysteme gemeinsam in möglichst realitätsnahen Szenarien auf eine korrekte Erkennung hin zu überprüfen. Dabei wurde die Strategie verfolgt, das System von innen heraus zu validieren. Dabei wurde auf der Ebene innerhalb eines Teilsystems begonnen, danach wurden die Teilsysteme als Ganzes validiert. Auch hier wurde das Vorgehen gemeinsam mit dem Autor dieser Arbeit erarbeitet und dann von Grausam umgesetzt und ausgewertet.

Für die Parameter in der Simulation wurden ähnliche Werte wie im ersten Validierungsschritt in Abschnitt 4.4.2 benutzt. Sie wurden geringfügig an den Gegebenheiten der hier durchgeführten Tests angepasst, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten. Sie sind in Tabelle A.3 im Anhang zu finden

### Systemverhalten unter bestimmten Einflüssen

Zuerst wird das Systemverhalten unter bestimmten Einflüssen getestet. Dabei können einzelne Verhaltensweisen innerhalb eines Teilsystems untersucht werden, die teilweise in mehreren Teilsystemen verwendet werden. Da im Teilsystem *Überlandstraßen* alle verwendeten Verhaltensweisen vorkommen, wird diese Straßenklasse für den Test ausgewählt. Eine einzelne Betrachtung der Verhaltensweisen in den anderen Teilsystemen ist nicht mehr nötig, da die Bewertung in diesen identisch verläuft. Für die Tests des Systemverhaltens unter bestimmten Einflüssen werden Testszenarien generiert, die jeweils eine oder mehrere Verhaltensweisen kombiniert abtesten.

Für das Testen des Querbeschleunigungsverhaltens bietet sich beispielsweise eine Teststrecke mit vielen Kurven mit unterschiedlichen Kurvenradien an. Das Längsbeschleunigungs-, Verzögerungs- und Geschwindigkeitsverhalten kann gemeinsam mithilfe einer geraden Strecke, auf der viele unterschiedliche Geschwindigkeitsbegrenzungen gelten, überprüft werden. Dies führt zu häufigem Bremsen und Beschleunigen. Das Abstandsverhalten lässt sich mit einer Folgefahrt auf der Landstraße überprüfen.

**Testfall Kurven** Im Testfall Kurven wird das Querbeschleunigungsverhalten überprüft. Dabei wird eine 10,8 Kilometer lange Strecke abgefahren auf der sich Kurven verschiedener Länge und mit verschiedenem Radius aneinanderreihen. Der Streckenverlauf ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Auf der Strecke sind in ungefähr gleichen Abständen drei Stoppschilder platziert, um ähnlich wie im ersten Validierungsschritt in Abbildung 4.14 im Abschnitt 4.4.1 illustriert, charakteristische Punkte in den Aufzeichnungen zu haben, an denen man die Aufzeichnungen aufteilen kann, um Fahrstiländerungen während der Testfahrt zu realisieren.

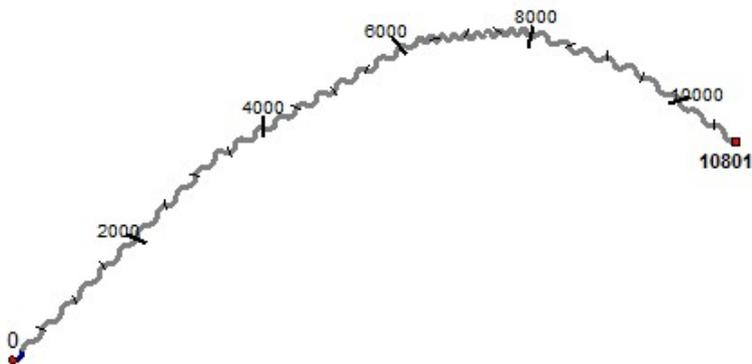


Abbildung 4.20: Streckenprofil des Testfalls Kurven in CarMaker, aus [41]

Für die Auswertung des Fahrstils werden bei diesem Test alle Gewichtungsfaktoren für Verhaltensweisen, außer der Gewichtungsfaktor für die Verhaltensweise *Querbeschleunigung*, auf null gesetzt, damit andere Verhaltensweisen keinen Einfluss auf die Bewertung des Fahrstils haben. Alle einzelnen Verläufe für die Auswertung würden den Umfang dieser Arbeit

sprengen. Daher wird für die einzelnen Verläufe auf die Arbeit von Philipp Grausam [41] verwiesen. Für die Auswertung wurden, wie schon im ersten Validierungsschritt, die Klassifikationen wieder in *exakte*, *abweichende* und *Fehlklassifizierungen* unterteilt.

Insgesamt ergibt sich im Schnitt über drei Testfahrten mit verschiedenen *Fahrstilmixen* ein Anteil von 90 Prozent *exakter* Klassifizierungen. *Abweichende* Klassifizierungen ergeben sich zu acht Prozent und *Fehlklassifizierungen* treten nur in zwei Prozent der Zeit auf. Man kann beobachten, dass das Fahrstilsignal der Vorgabe sehr gut folgt und *abweichende* und *Fehlklassifizierungen* eigentlich nur bei Fahrstilwechseln auftreten, die auf Grund der Umsetzung des Systems nur mit einer Verzögerung erkannt werden können. Die Dauer dieser Verzögerung ist abhängig von der Speichergröße bzw. der Größe des Fensters, über das beim Kalman-Filter der Mittelwert gebildet wird. Je größer diese Parameter sind, desto träger wird das System, d.h. die Verzögerung mit der Fahrstilwechsel erkannt werden, vergrößert sich. Je kleiner die Parameter gewählt werden, desto dynamischer kann das System auf Fahrstilwechsel reagieren. Es wird dadurch aber auch anfälliger für Störungen. Daher muss ein Mittelweg bei der Wahl der Parameter gefunden werden. Bei diesen Test wählte man für die Speichergröße drei Werte. Bei einem *Fahrstilmix* gibt es zu Beginn eine Abweichung, da die Testfahrt mit dem Fahrstil *komfortabel* beginnt, das System aber während seiner Initialisierungsphase von 60 Sekunden, in der es zuerst einmal Informationen über den Fahrstil sammelt, immer den Fahrstil *normal* ausgibt

**Testfall Tempolimit** Für diesen Testfall wurde eine 10 Kilometer lange gerade Strecke mit vielen verschiedenen Geschwindigkeitslimits implementiert. In diesem Testfall werden gleich drei Verhaltensweise überprüft. Durch die vielen Änderungen im Geschwindigkeitslimit wird der Fahrer zu häufigen Brems- und Beschleunigungsvorgängen gezwungen, was die Untersuchung des Längsbeschleunigungs- und Verzögerungsverhaltens ermöglicht. Außerdem kann als dritte Verhaltensweise die Geschwindigkeitseinhaltung bei Tempolimits getestet werden. Das Profil der Strecke aus CarMaker ist in Abbildung 4.21 zu finden.

Bei der Auswertung ergibt sich, dass der Fahrstil in 80 Prozent der Zeit *exakt* klassifiziert wird. In 19 Prozent der Zeit treten *abweichende* Klassifizierungen auf und *Fehlklassifizierungen* schlagen mit nur einem Prozent zu Buche. In diesem Fall sind wieder die Filtergröße und die Speichergröße entschei-

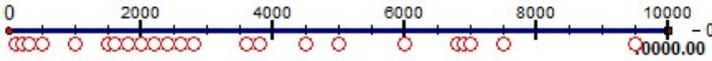


Abbildung 4.21: Vereinfachte Darstellung des Streckenprofils des Testfalls Tempolimit in CarMaker, aus [41]

dende Parameter. Für diesen Testfall ließen sich mit einer Filtergröße von 500 und einer Speichergröße von nur zwei Werten die besten Ergebnisse erzielen.

**Testfall Folgefahrt** In diesem Testfall soll nur die Bewertung des Folgeverhaltens mit Hilfe der Zeitlücke überprüft werden. Dazu wird eine lange gerade Strecke benutzt. Im Parameterfile wurde die Zeitlücke, die vom System als normal bewertet wird, auf 1,3 Sekunden eingestellt. Um Einflüsse anderer Verhaltensweisen wieder auszuschließen, wurden alle anderen Gewichtungsfaktoren für diesen Testfall wieder auf null gesetzt.

Für die Auswertung ergibt sich ein Anteil von 91 Prozent an *exakten* Klassifizierungen. Ein *abweichender* Fahrstil wird in neun Prozent der Zeit erkannt. Es erfolgen keinerlei *Fehlklassifizierungen* in diesem Testfall.

Da in diesem Testfall ausschließlich das Abstandsverhalten überprüft wird, besteht ein Fahrstilwechsel lediglich aus einer Änderung des Abstandes zum Vordermann. Es zeigt sich, dass die vorgenommenen Fahrstilwechsel sicher erkannt werden. Kurze abweichende Klassifizierungen nach Fahrstilwechseln wie sie in allen drei Kombinationen vorkommen, sind die Folge des Einregelns auf einen bestimmten Abstand durch den Fahrer nach einem Fahrstilwechsel. Es hat sich auch in diesem Testfall gezeigt, dass die Filtergröße des Kalman-Filters für das Abstandsverhalten eine wichtige Rolle spielt. Mit einer Filtergröße von 1000 werden in diesem Testfall die besten Ergebnisse erzielt.

### Systemverhalten in komplexen Szenarien

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt 4.4.3 alle einzelnen Verhaltensweisen im Fahrstilerkennungssystem getestet wurden, soll das System in diesem Abschnitt in komplexen Szenarien auf seine Funktion und die Ge-

nauigkeit der Klassifizierung hin überprüft werden. In diesen Szenarien kann jedes Teilsystem im Ganzen und das Zusammenspiel der Teilsysteme getestet und eine finale Bewertung des Systems getätigt werden. Im Anschluss können Aussagen über eine geeignete Parametrierung für den Realbetrieb getroffen werden. Für diese Test wurden vier Szenarien ausgewählt, die im Folgenden zusammen mit der Auswertung beschrieben werden.

**Testfall Stadt** In diesem Testfall soll das Teilsystem *Stadt* getestet werden. Da der Fahrstil in diesem Teilsystem nur anhand der Verhaltensweisen Längsbeschleunigung, Verzögerung und Geschwindigkeit bestimmt wird und diese im Testfall Tempolimit im Abschnitt 4.4.3 bereits untersucht wurden, reicht es aus, die Teststrecke aus diesem Testfall für den neuen Testfall etwas zu modifizieren. Dafür wurden die Geschwindigkeitslimits auf ein normales Niveau für innerstädtische Straßen angepasst. Außerdem wurden einige Kurven mit kleinem Radius eingebaut, um Brems- und Beschleunigungsphasen, wie sie in der Stadt beispielsweise beim Abbiegen auftreten, zu simulieren. Das Profil der Strecke aus CarMaker ist in Abbildung 4.22 zu finden.

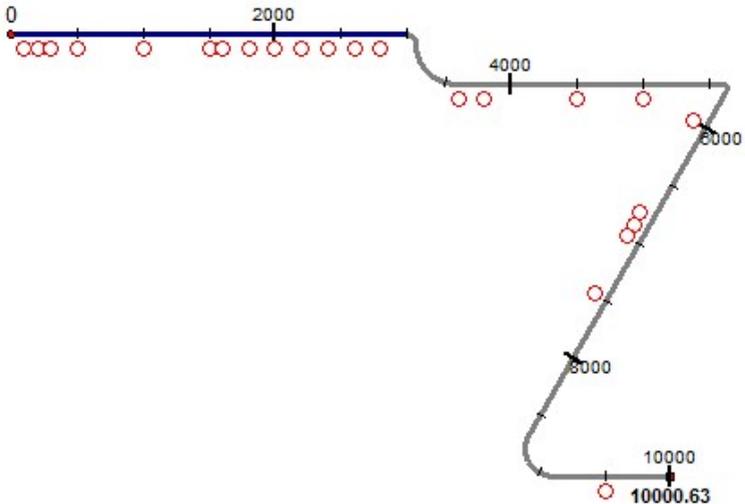


Abbildung 4.22: Streckenprofil des Testfalls Stadt in CarMaker, aus [41]

Bei der Auswertung ist festzustellen, dass zwei der drei Testfahrten nahezu perfekte Ergebnisse zeigen. Bis auf die geringe Verzögerung, mit der Fahrstilwechsel erkannt werden, wird der vorgegebene Fahrstil sicher erkannt. In einer Testfahrt wird für eine längere Zeit ein *normaler* Fahrstil anstelle von *komfortabel* erkannt. Der Grund hierfür ist, dass die bei CarMaker vorgegebenen Maximalwerte für die Längsbeschleunigung bei Schaltvorgängen überschritten und somit vom System als etwas „sportlichere“ Fahrweise interpretiert wurden. Das Fahrstilerkennungssystem berechnet bei Auftreten eines Beschleunigungsevents sowohl einen gewichteten Mittelwert, als auch den Maximalwert der erkannten Beschleunigung. Über zwei Parameter lässt sich die Gewichtung einstellen, mit welcher der Maximalwert bzw. der gewichtete Mittelwert in die Berechnung des Fahrstils einfließen. Durch eine Gewichtung des gewichteten Mittelwerts mit eins und des Maximalwerts mit null werden in diesem Testfall die besten Ergebnisse erzielt. Dadurch kann der Einfluss der Beschleunigungspeaks etwas gemindert werden. Insgesamt ergibt sich ein Anteil von 90 Prozent an *exakten* Klassifizierungen für diesen Testfall. *Abweichende* Klassifizierungen treten in zehn Prozent der Zeit auf, während keine *Fehlklassifizierungen* auftreten.

**Testfall Autobahn** Das Teilsystem Autobahn bewertet während der Fahrt das Längsbeschleunigungs-, Geschwindigkeits- und das Abstandsverhalten. Die Strecke für diesen Testfall besteht aus drei Spuren. Bei der Strecke handelt es sich um einen Rundkurs, der für die Testfahrten mehrfach durchfahren werden kann. Auf der Strecke sind von CarMaker kontrollierte, autonom fahrende Verkehrsteilnehmer verteilt. Abbildung 4.23 zeigt einen Screenshot einer Testfahrt dieses Testfalls. Durch mehrmalige Spurwechsel des Testfahrzeugs (gelber Beetle) wechseln sich Freifahrten und Folgefahrten hinter den autonomen Fahrzeugen ab. Die in Abbildung 4.23 zu erkennende blaue Fläche visualisiert den Abdeckungsbereich des eingebauten Radarsensors, der den Abstand zum Vordermann misst.

In diesem Testfall wurde der Abstand, welcher als *normal* bewertet wird auf 1,5 Sekunden festgelegt, was dem gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsabstand entspricht. Die Parameter für die Zeitlücke im Fahrermodell sind im Anhang in Tabelle A.3 zu finden.

Bei Auswertung der drei Simulationen mit verschiedenen *Fahrstilmixen* ergibt sich im Durchschnitt ein Anteil von 82 Prozent an *exakten* Klassifizierungen, während in 17 Prozent der Zeit der Fahrstil *abweichend* klassifiziert

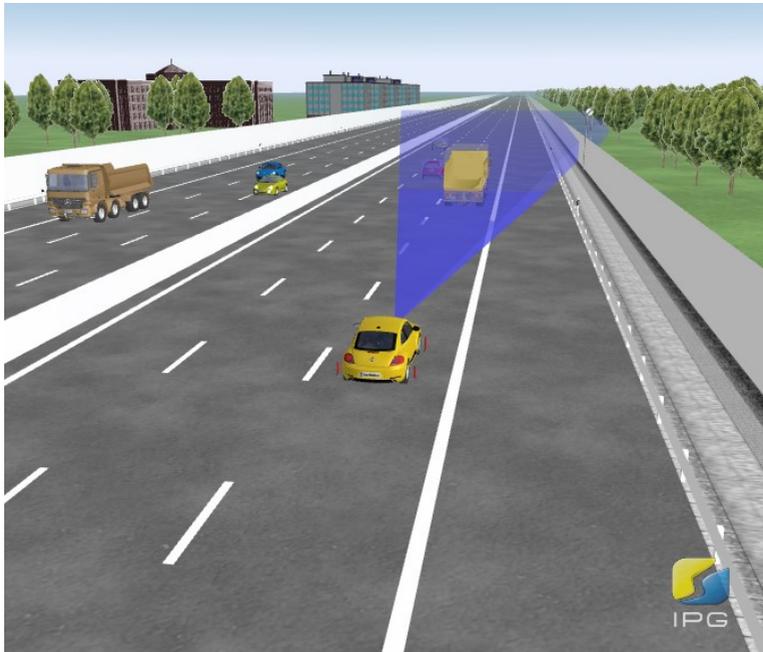


Abbildung 4.23: Screenshot des Testfalls Autobahn in CarMaker, aus [41]

wird und in einem Prozent der Zeit *Fehlklassifizierungen* auftreten. Bei einer Testfahrt ist besonders ein Fahrstilwechsel von *komfortabel* zu *sportlich* interessant, welcher erst nach über 100 Sekunden richtig erkannt wird. Ein normaler Fahrstil wird sofort identifiziert, jedoch eine sportliche Fahrweise erst nach geraumer Zeit. Der Grund hierfür kann sein, dass sich der Fahrer im Moment des Fahrstilwechsels gerade in der Folgefahrt befindet und sich der Fahrstilwechsel zuerst einmal nur im Abstandsverhalten widerspiegelt. Da dies allein aber nicht ausreicht, um den erkannten Fahrstil zu verändern, dauert es so lange, bis auch wieder Längsbeschleunigungsevents oder eine Geschwindigkeitsanpassung stattfinden, bevor der Wechsel im Fahrstil vom System erkannt wird. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass spezifische Fahrsituationen oder Verkehrseinflüsse die Erkennung des Fahrstils durch das System beeinträchtigen können.

**Testfall KIT-Runde** Die sogenannte KIT-Runde ist ein Rundkurs um Karlsruhe mit einer Streckenlänge von knapp 80 Kilometern. Der Verlauf in Google-Maps ist auf der linken Seite in Abbildung 4.24 zu sehen. Diese Strecke wurde von Rauner in seiner Diplomarbeit [83] inklusive der vorliegenden Geschwindigkeitslimits erfasst. Über das kml-Dateiformat (spezielles Datenformat für Routendaten) kann der Verlauf von Google Maps direkt in CarMaker importiert werden. Nach der Einarbeitung der von Rauner erfassten Geschwindigkeitslimits (in Abbildung 4.24 auf der rechten Seite durch die roten Kreise dargestellt), hat man dadurch eine realistische Strecke, die sich als finaler Testfall für das Fahrstilerkennungssystem sehr gut eignet, da alle Straßenklassen abgedeckt sind. Somit wird während der Fahrt jedes Teilsystem aktiviert und trägt seinen Teil zur Erkennung des Fahrstils bei. Es werden mehrere Ortschaften (Malsch, Michelbach) und Städte (Karlsruhe, Gaggenau) durchfahren. Dazwischen finden mehrere Überlandfahrten statt. Schließlich wird noch eine größere Strecke auf der Autobahn A5 in Richtung Karlsruhe zurückgelegt.

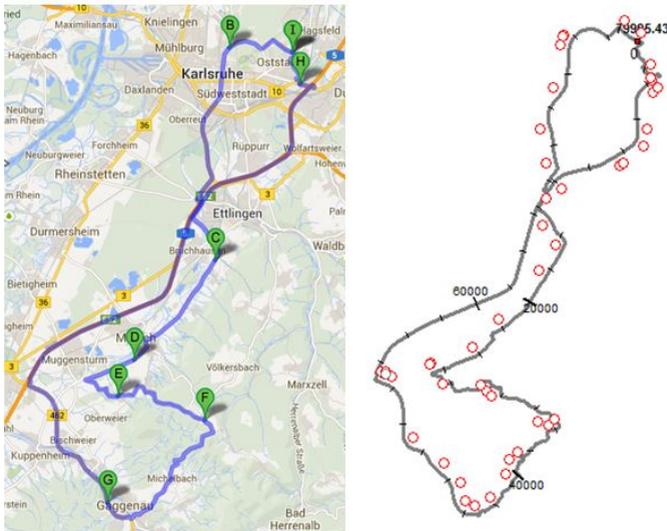


Abbildung 4.24: Verlauf KIT-Runde in Google Maps, aus [83] (links) und Verlauf KIT-Runde inklusive Geschwindigkeitslimits aus CarMaker (rechts)

Als erster finaler Testfall wird die KIT-Runde ohne Verkehr simuliert, um Einflüsse von anderen Verkehrsteilnehmer ausschließen zu können und das System und seine einzelnen Teilsysteme unbeeinflusst testen zu können. Als Durchschnitt von drei Testfahrten mit unterschiedlichen *Fahrstilmixen* ergab sich ein Anteil von 83 Prozent an *exakten* Klassifizierungen. *Abweichende* Klassifizierungen liegen durchschnittlich in 15 Prozent der Fahrzeit vor, *Fehlklassifizierungen* beschränken sich auf einen Anteil von 2 Prozent.

Die Hauptursache für die *abweichenden* Klassifizierungen sind Strecken- bzw. Situationseinflüsse, die von außen auf das System wirken und seine Klassifizierungsfähigkeit beeinträchtigen. Ein solcher Einfluss ist beispielsweise die Abhängigkeit des tolerierten Maximalwerts der Querbeschleunigung durch den Fahrer vom Radius der befahrenen Kurve. Dieser Maximalwert sinkt mit steigendem Kurvenradius. Auf kurvenarmen Strecken bzw. auf Strecken, auf denen nur Kurven mit großem Radius vorkommen, sind große Querbeschleunigungen nur durch sehr hohe Geschwindigkeiten erreichbar, die außerhalb des gesetzlich Erlaubten liegen können. Im Fahrstilerkennungssystem ist eine Querbeschleunigungskorrektur implementiert, welche die aktuelle Querbeschleunigung mit einem von dem Kurvenradius der befahrenen Kurve abhängigen Faktor multipliziert, um diese Abhängigkeit auszugleichen. Allerdings beachtet das CarMaker Fahrermodell diese sinkende Toleranzgrenze nicht und deshalb bringt die Querbeschleunigungskorrektur für diesen Testfall keinen Mehrwert und wurde daher deaktiviert. Da das Fahrermodell von CarMaker eine gekapselte Softwarekomponente ist, ließ sich diese Toleranzgrenze auch nicht einfach in das Modell integrieren.

Teilweise treten im Verlauf einige kurze Fahrstilwechsel auf. Dies liegt an der gewählten Parametrierung für die Speicher. Hier lieferten zwei Speicherwerte die besten Ergebnisse.

**Testfall KIT-Runde mit Verkehr** Für den komplexesten Testfall wurde die KIT-Runde aus dem vorherigen Test um Verkehr auf der Strecke erweitert, so dass auch die Einflüsse durch andere Verkehrsteilnehmer berücksichtigt wurden. Der Verkehr wurde derart realisiert, dass das Testfahrzeug an mehreren Stellen der Strecke auf ein vor ihm fahrendes Fahrzeug trifft, welches mit einer bestimmten Geschwindigkeit fährt. Abhängig vom Fahrstil hält das Testfahrzeug dann einen bestimmten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Ein *sportlicher* Fahrer überholt zudem seinen Vordermann öfters

als ein *normaler* Fahrer. Ein *komfortabler* Fahrer überholt nicht. Die Überholrate ist ebenfalls ein Parameter des Fahrermodells und kann in CarMaker eingestellt werden.

Bei der Simulation der KIT-Runde mit Verkehr ergab sich im Mittel über drei *Fahrstilmixe* ein Anteil von 80 Prozent an *exakten* Klassifizierungen. Der Anteil der *abweichenden* Klassifizierungen lag bei 19 Prozent, *Fehlklassifizierungen* bei lediglich einem Prozent. Diese Zahlen sprechen für einen erfolgreichen Abschlusstest des Systems, bei dem alle Teilsysteme (bis auf das Teilsystem *unbefestigte Straße*) mindestens einmal aktiv waren und alle Verhaltensweisen bewertet wurden.

Der Verkehr war in diesen Tests allerdings nicht zufällig verteilt, sondern das Testfahrzeug trifft während der Testfahrten immer an einer bestimmten Stelle der Strecke auf ein vorausfahrendes Fahrzeug, fährt eine Zeit lang hinter diesem her oder überholt es. Zufällige Einflüsse, wie beispielsweise ein Abbremsen des vorausfahrenden Fahrzeuges aufgrund eines weiteren Vordermannes, sind in der Simulation nicht umgesetzt. Es ist daher zu erwarten, dass der Einfluss auf die Ergebnisse durch zufälligen Verkehr bei realen Testfahrten größer sein wird

### **Gesamtergebnis zweiter Validierungsschritt und Fazit**

Das Gesamtergebnis für den zweiten Validierungsschritt ist zweigeteilt zu betrachten. Dargestellt ist das Gesamtergebnis in Abbildung 4.25.

Man kann erkennen, dass insgesamt eine sehr gute Erkennung des vorgegebenen Fahrstils gewährleistet ist. Für das Systemverhalten unter bestimmten Einflüssen, d.h. die Testfälle Kurven, Tempolimit und Folgefahrt ergibt sich im Durchschnitt ein Anteil von 87 Prozent an *exakten* Klassifizierungen. Dies zeigt, dass das System die einzelnen Verhaltensweisen zuverlässig erkennt und richtig bewertet. *Abweichende* Klassifizierungen kommen in zwölf Prozent der Zeit vor und *Fehlklassifizierungen* in nur einem Prozent der Zeit. Für komplexe Szenarien ergibt sich ein ähnliches Bild. Im Durchschnitt über die Testfälle Stadt, Autobahn und KIT-Runde mit und ohne Verkehr ergibt sich ein Anteil von 84 Prozent *exakter* Klassifizierungen. *Abweichende* Klassifizierungen belaufen sich auf 15 Prozent und *Fehlklassifizierungen* liegen nur zu einem geringen Anteil von 1 Prozent vor.

Insgesamt kann von einer erfolgreichen Validierung gesprochen werden. Der Fahrstil wird sowohl bei einzelnen Verhaltensweisen, als auch in komplexen Szenarien mit ausreichender Erkennungssicherheit erkannt. Wie be-

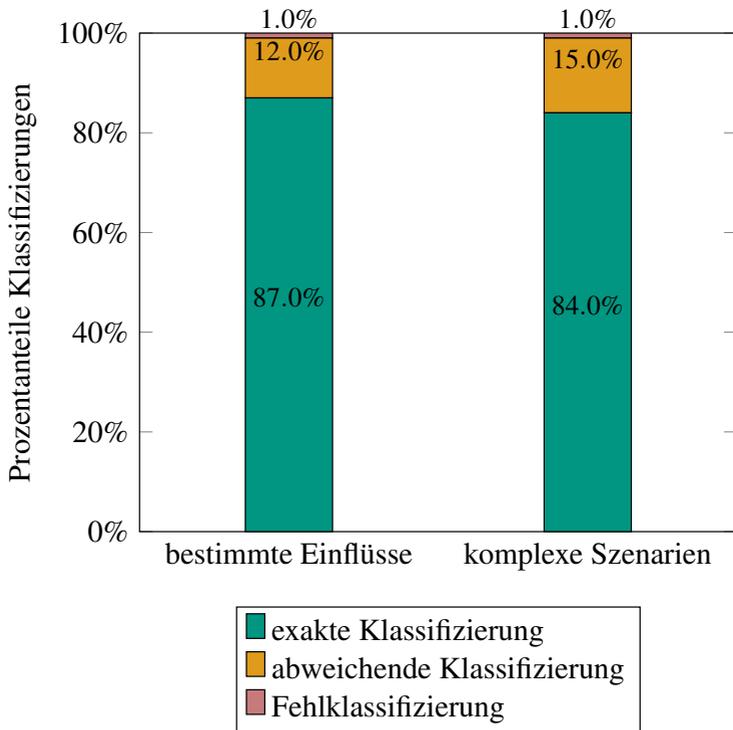


Abbildung 4.25: Gesamtergebnis Validierungsschritt 2 aus [41]

reits im ersten Validierungsschritt beschrieben, soll das Fahrstilsignal nicht als Eingang für ein sicherheitskritisches System dienen und somit ist eine hundertprozentige Erkennung zwar wünschenswert, aber nicht notwendig. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Ergebnisse nur in der Simulation generiert wurden und im Realbetrieb weitere zufällige Einflüsse auf das System wirken können, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden können. Dies kann die Ergebnisse im Realtest bedeutend beeinträchtigen.

Einen sehr großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Systems hat die Applikation der Parameter. Weiterführende Infos zum Einfluss der einzelnen Parameter sind in [41] zu finden. Im zweiten Validierungsschritt wurden alle Parameter händisch eingestellt, um sie möglichst gut an die Rahmenbedin-

gungen der Tests anzupassen. Da es sich jedoch um eine große Anzahl an Parametern handelt und viele der Parameter Abhängigkeiten untereinander aufweisen, gestaltet es sich als sehr schwieriges Unterfangen die Parameter ohne Hilfsmittel optimal zu applizieren. Daher wurde von Grausam vorgeschlagen eine rechnergestützte Parameteroptimierung in Erwägung zu ziehen, welche im nächsten Abschnitt vorgestellt werden soll.

## 4.5 Parameteroptimierung

Um die große Anzahl der Parameter des Fahrstilerkennungssystems handhaben zu können und sie optimiert für einen bestimmten Testfall zu applizieren, entwickelte Konstantin Pandl gemeinsam mit dem Autor dieser Arbeit in seiner Bachelorarbeit [78] ein Verfahren, mit dem die Parameter rechnergestützt optimiert werden können. Die Vorgabe in der Aufgabenstellung war eine Optimierung der Parameter auf vorgegebene Testfahrten. Das entwickelte Verfahren ist zweistufig und basiert auf der statistischen Versuchsplanung und evolutionären Algorithmen. Es wird im folgenden Abschnitt vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Verfahren angewendet, um das System für die Verwendung im Fahrsimulator zu optimieren

### 4.5.1 Vorarbeiten

Um eine Optimierung der Parameter effektiv durchführen zu können, waren einige Vorarbeiten von Nöten, die im folgenden Abschnitt beschrieben sind.

#### **Trainings- und Testdatengenerierung**

Für eine Optimierung benötigt man Trainingsdaten, anhand derer die Optimierung durchgeführt wird und Testdaten, um zu überprüfen, in wie weit sich das optimierte Ergebnis auf andere Daten übertragen lässt. Das Vorgehen für die Generierung dieser Daten soll im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

**Teststrecken** Da bei einer Optimierung auf nur einer Teststrecke eine Überanpassung an die Eigenheiten dieser Strecke zu erwarten ist, war es nötig zusätzlich zur KIT-Runde, die in [41] von Grausam zur Validierung des Systems verwendet wurde, weitere Strecken für die Optimierung zu

verwenden. Mit der KIT-Nord-Runde und der KIT-Ost-Runde wurden zwei weitere Strecken erstellt, die eine ausgewogene Mischung an Straßenklassen ähnlich der KIT-Runde aufweisen, damit alle Teilsysteme des Fahrstilerkennungssystems bei der Simulation zur Geltung kommen. Deren Verläufe in Google Maps und CarMaker sind in den Abbildungen 4.26 und 4.27 dargestellt.

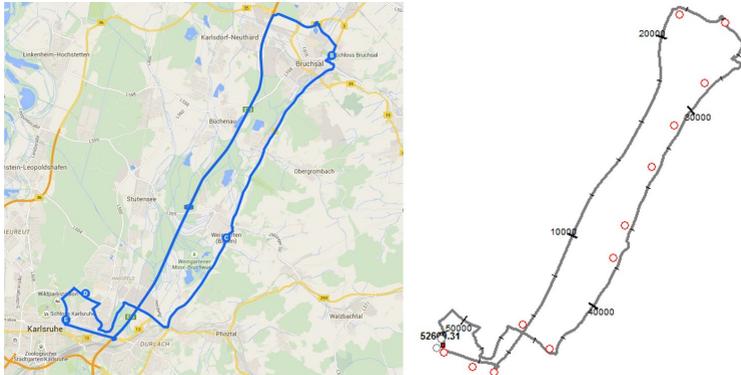


Abbildung 4.26: Linke Seite: KIT-Nord-Runde in Google Maps, Rechte Seite: KIT-Nord-Runde in CarMaker, aus [78]

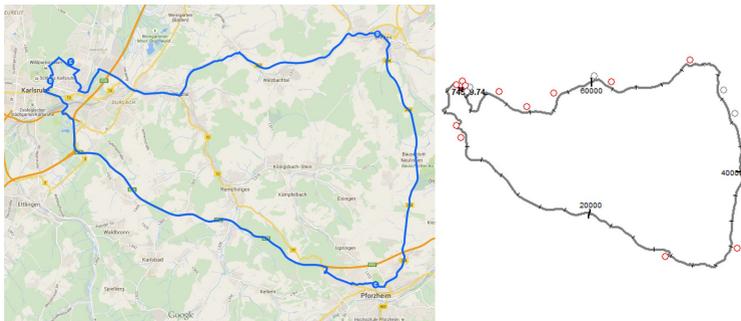


Abbildung 4.27: Linke Seite: KIT-Ost-Runde in Google Maps, Rechte Seite: KIT-Ost-Runde in CarMaker, aus [78]

Wie schon bei den vorangegangenen Validierungen wurden auch hier Stopp-Schilder platziert, um Testfahrten mit wechselnden Fahrstilen einfacher rea-

lisieren zu können. Die Geschwindigkeitslimits und Straßenklassen wurden mit Hilfe der Karten von OpenStreetMap identifiziert.

Für die Generierung der Testfahrten mit wechselnden Fahrstilen wurde das bereits bekannte Verfahren aus Abbildung 4.14 verwendet. Als Parameter für die drei unterschiedlichen Fahrstile des Fahrermodells wurden die Vorgaben von CarMaker für die dort als „defensiv“, „normal“ und „aggressiv“ benannten Fahrstile appliziert. Die verwendeten Fahrerparameter sind im Anhang in Tabelle A.4 zu finden.

**Testdaten** Für diese Arbeit werden beispielsweise die Daten der KIT-Runde mit Mix 2 und die KIT-Ost-Runde mit Mix 3 als Trainingsdaten benutzt. Als Testdatensatz, um die Optimierung zu überprüfen, wurde die KIT-Nord-Runde mit Mix 1 verwendet. Pandl wertet in seiner Arbeit [78] weitere Strecken aus.

### Parallelisierung

Die Simulation einer Testfahrt wurde mit Hilfe einer Parallelisierung in Matlab durch Verwendung der „MATLAB Parallel Computing Toolbox“ und einer „parfor“ Schleife erheblich beschleunigt. Durch die Parallelisierung konnte die Berechnungsdauer bei Verwendung von acht Prozessen auf einem PC mit 8 GB Arbeitsspeicher und einem Intel Core i7-2600 Quad-Core-Prozessor mit Hyperthreading auf 28,7% der Rechenzeit mit nur einem Arbeiter reduziert werden. Dies entspricht dann einer Berechnungsdauer von 21 Sekunden pro Simulation einer Teststrecke mit einer bestimmten Fahrstilkombination.

### 4.5.2 Optimierungsproblem

Ein Optimierungsproblem lässt sich ganz allgemein entweder als Minimierungs- oder Maximierungsproblem darstellen. Nach Jungnickel [51] hat eine Minimierungsproblem die Form

$$\min f(x), x \in S,$$

hierbei ist  $S$  eine Menge, *Suchraum* genannt, und  $f : S \rightarrow \mathbb{R}$  eine Abbildung, die hier *Zielfunktion* heißt. Analog stellt sich das allgemeine Maximierungsproblem wie folgt dar:

$$\max f(x), x \in S,$$

Da sich jedes Maximierungsproblem in ein Minimierungsproblem umformen lässt und in der Literatur meist Minimierungsprobleme beschrieben sind, wird im folgenden Optimierung stets als Synonym für Minimierung verwendet. Es gibt verschiedene Teilgebiete der Optimierung, die sich in der Art der Menge  $S$  und Linearität bzw. Nichtlinearität der Abbildung  $f$  unterscheiden.

Im Falle der Parameteroptimierung in dieser Arbeit stellt  $S$  die Menge der zu optimierenden Parameter  $x_i$  dar. Für die meisten Parameter (Schwellenwerte und Gewichtungsfaktoren) des Fahrstilerkennungssystems gilt  $x_i \in \mathbb{R}$ . Es gibt jedoch auch Parameter, wie die Speichergrößen, für die  $x_i \in \mathbb{N}$  gilt. Gesucht waren in dieser Arbeit also die Werte für die Parameter  $x_i$ , die den System- und Modellparametern der Fahrstilerkennung entsprechen, welche die Zielfunktion (beschrieben im übernächsten Abschnitt) minimieren.

### Einzelkriterielle und multikriterielle Optimierung

Bei der Optimierung kann man zwischen einzelkriteriellen und der multikriteriellen Optimierung unterscheiden. Sofern die Zielfunktion  $f$  eindimensional ist, spricht man von einzelkriterieller Optimierung. Ist  $f$  mehrdimensional, spricht man von multikriterieller Optimierung. Bei der multikriteriellen Optimierung ist das Ergebnis eine *Pareto Front*. Ein Ergebnis ist in Anlehnung an Zitzler et al. [115] *genau dann pareto-optimal, wenn es in keinem seiner Zielfunktionswerte verbessert werden kann, ohne gleichzeitig einen anderen Zielfunktionswert zu verschlechtern*. Abbildung 4.28 zeigt eine solche Pareto-Front.

### Zielfunktion

Die Zielfunktion ist in der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert:

$$f_{\text{gewichtet}}(\vec{x}) = f_{\text{abweichend}}(\vec{x}) + 2 \cdot f_{\text{fehl}}(\vec{x}).$$

In dieser Zielfunktion steht  $\vec{x}$  für den Vektor der zu optimierenden Parameter  $x_i$ .  $f_{\text{abweichend}}(\vec{x})$  steht für die aus der Parameterkombination resultierenden *abweichenden* Klassifizierungen für eine Testfahrt auf einer Strecke

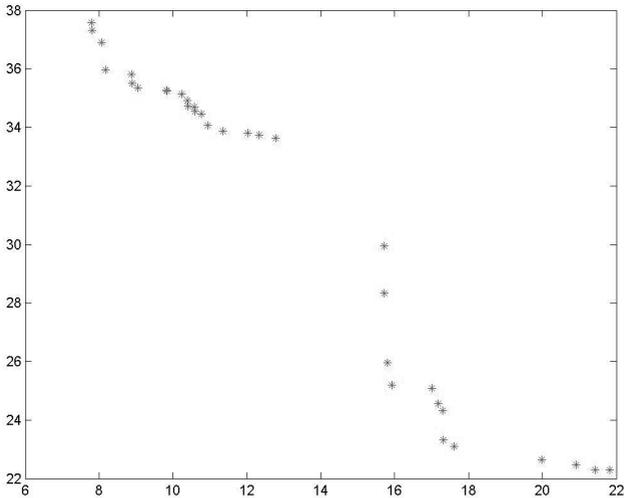


Abbildung 4.28: Beispiel einer Pareto Front. Auf der x- und y- Achse sind die Zielgrößen der zweidimensionalen Zielfunktion aufgetragen. Jeder Punkt repräsentiert eine komplette Parametereinstellung des zu optimierenden Systems und ist Teil der Pareto Front, aus [78]

und  $f_{\text{fehl}}(\vec{x})$  für die aus der Parameterkombination resultierenden *Fehlklassifizierungen* für die gleiche Testfahrt. Der Grundgedanke hinter dieser Zielfunktion ist, dass eine *abweichende* Klassifizierung für die Anwendungsfälle weniger schwerwiegend ist als ein *Fehlklassifizierung*. Daher wird die *Fehlklassifizierung* in der Zielfunktion doppelt so stark gewichtet. Dennoch sollen beide Anteile minimiert werden, um dadurch gleichzeitig den Anteil an *exakten* Klassifizierungen zu maximieren. Es handelt sich in diesem Fall zwar um eine eindimensionale Zielfunktion, jedoch ist die spätere Optimierung doch eine multikriterielle, da gleichzeitig auf mehreren Fahrstrecken optimiert werden soll, um eine sogenannte *Überoptimierung* möglichst zu vermeiden.

## Restringierte Optimierung

Bei dem vorliegenden Optimierungsproblem handelt es sich außerdem um ein sogenanntes *restringiertes* Optimierungsproblem. Dies bedeutet, dass für verschiedene Parameter Einschränkungen gelten können. Allgemein sieht ein solches Optimierungsproblem nach Jungnickel [51] wie folgt aus:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{unter } \mathbf{g}(x) \leq \mathbf{0} \\ & \quad \mathbf{h}(x) = \mathbf{0} \\ & \quad \mathbf{x} \in \mathcal{S} \end{aligned}$$

Dabei enthält  $\mathbf{g}$  die Ungleichungsrestriktionen und  $\mathbf{h}$  die Gleichungsrestriktionen, beide stellen Nebenbedingungen dar.

Solche Einschränkungen bzw. Restriktionen treten bei der Parameteroptimierung mehrfach auf. Der Suchbereich für die Parameter soll sich in einem physikalisch möglichen und sinnvollen Bereich bewegen. Für die Mindestdauer eines Events sind negative Werte nicht möglich und zu große Werte in der Praxis unrealistisch. Dies schränkt den Suchraum für diese Parameter ein. Nach Michalewicz [72] besteht der Suchraum immer aus zwei disjunkten Teilmengen, einem zulässigen Zulässigkeitsbereich und einem unzulässigen Bereich. Der Zulässigkeitsbereich ist dabei als  $F := \{x \in X : g(x) \leq 0, h(x) = 0\}$  definiert. Jedes  $x \in F$  nennt man eine zulässige Lösung.

## Eigenschaften des Suchraums

Bei den Lösungen eines Optimierungsproblems muss zwischen *globalen* und *lokalen* Optimalpunkten unterschieden werden [51]. Für einen *globalen* Optimalpunkt  $y$  gilt immer  $f(x) \leq f(y) \forall x \in \mathcal{S}$  und  $x \neq y$ . *Lokale* Optimalpunkte hingegen stellen nur in einer Umgebung eine optimale Lösung dar.

Suchräume bzw. Zulässigkeitsbereiche lassen sich in einen *unimodalen* Raum, der nur ein Optimum besitzt, oder einen *multimodalen* Raum, der mehr als ein Optimum – wovon mindestens eines global ist, aber auch lokale auftreten können - unterteilen.

Ist der betrachtete Suchraum *unimodal*, bieten sich einfache, schnelle Suchverfahren an. Diese suchen zielgerichtet nach einer Verbesserung und können dadurch das globale Optimum finden.

Da davon auszugehen ist, dass der Suchraum beim vorliegenden Optimierungsproblem nicht *unimodal* ist, weil verschiedene Einflussparameter berücksichtigt werden müssen, muss ein Verfahren verwendet werden, welches ein globales Optimum in einem *multimodalen* Suchraum finden kann.

### **Überanpassung und Validierung**

Eine Optimierung findet auf Basis der Trainingsdaten statt. Um zu testen, wie erfolgreich die Optimierung war, ist es sinnvoll das Optimierungsergebnis anschließend auf Basis eines Datensatzes zu überprüfen, der nicht für die Optimierung verwendet wurde. Dieser Datensatz wird dann Testdatensatz genannt. Dieses Vorgehen nennt sich Validierung.

Nach Bramer [15] kann es bei der Optimierung vorkommen, dass die Parameter zu sehr auf irrelevante Aspekte der Trainingsdaten optimiert sind. Die Zielfunktion ist dann zwar gut auf die Trainingsdaten optimiert, liefert aber bei den Testdaten ein schlechtes Ergebnis. Man spricht dabei von einer Überanpassung oder Überoptimierung. Um die Gefahr dafür zu verringern, sollten die Trainingsdaten möglichst unterschiedlich sein und den Suchraum bestmöglich abdecken.

## **4.5.3 Unterteilung von Optimierungsverfahren**

Optimierungsverfahren lassen sich auf vielfältige Weise unterteilen. Die möglichen Unterteilungen sollen im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

### **Direkte und indirekte Optimierungsverfahren**

Die erste mögliche Unterteilung von Optimierungsverfahren ist die Unterteilung in direkte und indirekte Optimierungsverfahren. Direkte Optimierungsverfahren arbeiten nur mit dem Zielfunktionswert, daher auch der Name. Die Lösung erfolgt dabei Schritt für Schritt bzw. iterativ. Dabei muss nicht unbedingt jeder Schritt eine Verbesserung der Zielfunktion zur Folge haben. Direkte Verfahren werden oft angewandt, wenn die Optimierung

eines Systems an einem Computermodell eines Systems durchgeführt wird [93].

Indirekte Verfahren, auch analytische Verfahren genannt, nutzen neben dem Funktionswert der Zielfunktion auch die Ableitungen dieser. Damit kann das Optimum in einem Berechnungsschritt gefunden werden. Im einfachsten Fall ist dies nach Schwefel [93] die Extremwertbestimmung mit der ersten Ableitung der Zielfunktion.

Bei der hier benötigten Parameteroptimierung ist eine Bildung der Ableitung aufgrund der hohen Komplexität nicht möglich, sodass auf direkte Verfahren zurückgegriffen werden muss.

### **Exakte und probabilistische Optimierungsverfahren**

Bei den meisten Optimierungsverfahren wird als Startpunkt eine zufällig konstruierte Initiallösung verwendet [37]. Die Unterteilung in exakte und probabilistische Optimierungsverfahren orientiert sich an den nachfolgenden Optimierungsschritten. Agiert das Verfahren in den Optimierungsschritten deterministisch, spricht man von exakten Optimierungsverfahren. Bei probabilistischen Optimierungsverfahren hingegen haben die Optimierungsschritte immer eine randomisierte Komponente. Diese ermöglicht laut Gerdes et. al [37] oft eine breitere Abdeckung des Suchraums, als dies bei den meisten exakten Verfahren der Fall ist. Die Zufallskomponente in der Optimierung sorgt aber auch dafür, dass jede neue Optimierung unterschiedlich verlaufen und zu einem anderen Ergebnis führen kann. Es ist vor allem nicht sichergestellt, das globale Optimum tatsächlich zu finden.

Bei dem vorliegenden Problem bietet sich ein probabilistisches Verfahren an, um den Suchraum möglichst gut abzudecken. Als Startlösung können die von Grausam in [41] erarbeiteten Parametereinstellungen genutzt werden.

### **Geeignete Verfahren für das vorliegende Problem**

Die Anforderungen des vorliegenden Problems an das Optimierungsverfahren lassen sich wie folgt beschreiben:

- es liegt ein multikriterielles Optimierungsproblem vor
- es sind Nebenbedingungen vorhanden
- der Suchraum ist multimodal, ein globales Optimum ist erwünscht

- eine Ableitung der Zielfunktion ist nicht möglich
- eine probabilistische Komponente ist sinnvoll, um den Suchraum möglichst gut abzudecken

Außerdem muss auch die Berechnungsdauer berücksichtigt werden. Diese kann durch eine mögliche Parallelisierung verringert werden.

Da eine Ableitung der Zielfunktion nicht möglich ist, muss ein direktes Verfahren verwendet werden. Prinzipiell wäre der Einsatz eines Suchverfahrens wie das Gradientenverfahren möglich. Da dieses aber nicht sicher das globale Optimum findet, sondern oft in lokalen Optima „hängen bleibt“, müsste eine zusätzliche Zufallskomponente eingebaut werden, damit das Verfahren mehrfach von verschiedenen Punkten im Suchraum startet. Dann wäre die Wahrscheinlichkeit das globale Optimum zu finden erhöht. Dies wäre aber sehr rechenaufwändig und daher nicht praktikabel. Daher bietet sich ein Verfahren an, welches von sich aus auf einer zufallsgesteuerten Komponente beruht. Ein Beispiel hierfür sind evolutionäre Algorithmen, welche im Abschnitt 4.5.5 näher beschrieben werden. Um die Anzahl der Parameter im Voraus zu verringern und so die Berechnungsdauer zu verkürzen wird ein weiteres Verfahren vorgeschaltet (siehe Abschnitt 4.5.4).

#### **4.5.4 Design of Experiments oder Statistische Versuchsplanung**

Die statistische Versuchsplanung ist kein Optimierungsverfahren an sich, hilft hier aber bei der Verringerung der benötigten Simulationen. Die Eigenheiten und Eigenschaften dieses Verfahrens und die Anwendungsmöglichkeiten, sowie die Umsetzungsmöglichkeiten für verschiedene Zielsetzungen werden im Folgenden vom Autor vorgestellt.

##### **Beschreibung und Anwendungsmöglichkeiten**

Die statistische Versuchsplanung ist ein Verfahren, um die statistischen Zusammenhänge zwischen Eingangsfaktoren und Ausgangsfaktoren eines Systems mit möglichst wenig Versuchen zu bestimmen. Im Englischen ist das Verfahren unter dem Namen „design of experiments“ oder kurz DoE bekannt. Zentraler Bestandteil dieses Verfahrens ist das Aufstellen eines sogenannten Versuchsplans, der aus einer Anzahl von Messpunkten (Versuchen) besteht. Durch eine geschickte Wahl der Lage dieser Messpunkte im

Suchraum ist es möglich, die Komplexität und damit die Rechenzeit für das Finden der statistischen Zusammenhänge im Rahmen zu halten.

Es gibt allgemein zwei Anwendungsfälle für die statistische Versuchsplanung. Der erste ist die von Mastinu et al. in [69] beschriebene Approximation eines komplexen Systems durch ein einfacheres mathematisches Modell. Dieses Modell nennt man dann Metamodell und die Berechnungszeit für dieses Modell beträgt nur einen Bruchteil der ursprünglichen Berechnungszeit für das komplexe System. Mit diesem Modell kann dann vergleichsweise einfach – etwa durch ein indirektes Optimierungsverfahren - ein globales Optimum gesucht werden.

Der zweite mögliche Anwendungsfall der statistischen Versuchsplanung, welcher in dieser Arbeit angewendet wird, ist das Auffinden von Faktoren oder Faktorkombinationen, die einen signifikanten Einfluss auf den Ausgangswert des Systems haben.

Im vorliegenden Fall sind die Systemparameter der Fahrstilerkennung die Faktoren und die Klassifizierungsgüte der Ausgang des Systems. Ein Versuch entspricht in diesem Fall einer Simulation des Fahrstilerkennungssystems auf einer vorgegebenen Strecke mit einer bestimmten Parameterkombination. Da das Fahrstilerkennungssystem Nichtlinearitäten aufweist, ist der Ansatz, ein vereinfachtes mathematisches Modell für das System zu generieren, nicht sehr vielversprechend. Daher wird in dieser Arbeit das Ziel verfolgt, mit der statistischen Versuchsplanung die signifikanten Parameter des Systems zu identifizieren und im Nachfolgenden mit einem weiteren Verfahren zu optimieren.

### **Wahl des Testfeldes**

Ein Testfeld beschreibt die Sammlung aller verwendeten Tests im Rahmen eines Optimierungsverfahrens. Für die Generierung des Testfeldes gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Anforderungen bei der vorliegenden Problemstellung an das Testfeld sehen laut Pandl [78] wie folgt aus:

- Stetiger Parameterbereich
- Große und gleichmäßige Abdeckung des Suchraums gewünscht
- „Moderate“ Anzahl an Versuchen bzw. Simulationen von Testfahrten

Im folgenden sollen verschiedene Möglichkeiten für die Erstellung eines Testfeldes bzw. Versuchsplans beschrieben und auf ihre Eignung für die vorliegende Problemstellung hin überprüft werden.

**Vollfaktorieller Versuchsplan** Der vollfaktorielle Versuchsplan deckt alle möglichen Parameterkombinationen ab. Dabei wächst jedoch der Rechenaufwand exponentiell. Deshalb ist ein vollfaktorieller Versuchsplan in der Praxis nicht praktikabel. Nach Siebertz [96] berechnet sich der Versuchsaufwand  $n_r$  aus:

$$n_r = n_l^{n_f}.$$

Dabei steht  $n_f$  für die Anzahl der Faktoren, in unserem Fall die Parameter und  $n_l$  für die Anzahl der Faktorstufen. Da ein großer Teil der 58 Faktoren stetig sind, ergibt sich für diese eine unendliche Anzahl an Faktorstufen und somit direkt auch unendlicher Rechenaufwand: Für einen unendlichen Rechenaufwand ergibt sich trivialerweise auch eine unendliche Berechnungsdauer. Auch eine Einschränkung auf eine endliche Anzahl von Faktorstufen, würde bei einem vollfaktoriellen Design zu nicht praktikablen Rechenzeiten führen. Nimmt man für jeden Parameter eine Unterteilung in nur fünf Faktorstufen an ergäbe sich ein Rechenaufwand von

$$n_r = 58^5 = 656.356.768 \text{ Simulationen.}$$

Dies verdeutlicht noch einmal eindrucksvoll, dass man Möglichkeiten finden muss, die Anzahl der Simulationen durch eine geeignete Wahl des Versuchsplans oder durch eine Reduzierung der zu veränderbaren Parameter zu verringern.

**Monte-Carlo-Verfahren** Das Monte-Carlo-Verfahren wird den sogenannten *raumfüllenden Designs* zugeordnet. Dabei werden die Testpunkte zufällig im Suchraum verteilt [96]. Diese Methode ist sehr einfach, hat jedoch auch Nachteile. Durch die zufällige Anordnung der Testpunkte kann es zu einer ungünstigen Verteilung der Testpunkte im Raum kommen. Daher müssen genug Testpunkte verteilt werden, um den Suchraum gut abzudecken, was die Rechenzeit wieder erhöht. Das Quasi Monte-Carlo-Verfahren ist eine Erweiterung des Verfahrens, welches versucht, die ungünstige Verteilung

der Punkte durch eine Anreicherung der Zwischenräume mit zusätzlichen Testpunkten auszugleichen. Hier wächst die Rechenzeit aber noch einmal.

**Latin Hypercube** Das Latin Hypercube Verfahren zum Erstellen eines Versuchsplans zählt ebenfalls zu den *raumfüllenden Designs*. Das Verfahren ist eine Erweiterung von Latin Squares (zu deutsch: Lateinische Quadrate). Lateinische Quadrate stellen ein Feldschema dar, bei dem  $n$  verschiedene Symbole in ein Feld bestehend aus  $n$  Spalten und  $n$  Zeilen derart eingetragen werden müssen, dass jedes Symbol genau einmal in jeder Spalte und jeder Zeile auftritt. Ein Beispiel für ein Lateinisches Quadrat mit den ganzen Zahlen eins bis fünf ist in Abbildung 4.29 zu sehen.

4	1	2	5	3
3	2	5	4	1
5	3	1	2	4
1	5	4	3	2
2	4	3	1	5

Abbildung 4.29: Ein Beispiel für ein Lateinisches Quadrat mit den ganzen Zahlen eins bis fünf als Symbole

Für einen statistischen Versuchsplan bedeutet das, dass in jeder Zeile und jeder Spalte genau ein Versuch durchgeführt wird. Bei einem zweidimensionalen Suchraum mit zwei Faktoren  $A$  und  $B$  mit jeweils vier Faktorstufen  $\{1, 2, 3, 4\}$  würde das dann aussehen, wie in Abbildung 4.30 dargestellt. Die dabei durchzuführenden Versuche sind dann den einzelnen Zeilen in Tabelle 4.2 dargestellt. Insgesamt müssen in diesem Fall vier Versuche durchgeführt werden. Im ersten Versuch wird beim Faktor  $A$  der Wert auf 1 gesetzt und bei Faktor  $B$  auf 3. Beim zweiten Versuch wird bei Faktor  $A$  der Wert auf 2 gesetzt und bei Faktor  $B$  auf 4, usw. Für zwei Faktoren und vier Faktorstufen werden in diesem Fall vier Versuche benötigt, um eine gute und gleichmäßige Abdeckung des Suchraums durch die Versuche zu gewährleisten. Man muss allerdings zusätzlich beachten, dass die beiden Faktoren jeweils auf

unterschiedliche Werte gesetzt werden, um die Einflüsse von A und B klar trennen zu können (Stichwort: Lineare Abhängigkeit).

		X		
	X			
<b>B</b>			X	
				X
	1	2	3	4
	<b>A</b>			

Abbildung 4.30: Beispiel für ein zweidimensionales Latin Hypercube Testfeld mit zwei Faktoren mit jeweils vier Faktorstufen, aus [78]

<b>A</b>	<b>B</b>
1	3
2	4
3	2
4	1

Tabelle 4.2: Versuchsplan für das zweidimensionale Testfeld aus Abbildung 4.30

Das Latin-Hypercube-Verfahren ist eine effiziente Methode *raumfüllende Designs* mit möglichst wenigen Testpunkten zu erstellen. Gegenüber dem Monte-Carlo-Verfahren mit einer ähnlichen Suchraumabdeckung, kann das Latin-Hypercube-Verfahren die Größe des Versuchsplans und damit die benötigte Rechenzeit um ca. 50% verringern [96].

Für die Parameteroptimierung benötigt die Simulation eines mit Hilfe des Latin-Hypercube-Verfahrens erstellten Testfeldes nur wenige Minuten, was eine vertretbare Rechenzeit für das Finden der signifikanten Parameter darstellt.

## 4.5.5 Evolutionäre Algorithmen

### Allgemein

Evolutionäre Algorithmen sind Optimierungsalgorithmen, die zu den *probabilistischen* Optimierungsverfahren zu zählen sind. Sie sind durch die Theorie nach Darwin motiviert, die besagt, dass nur der Stärkere überlebt. Sie lassen sich in zwei unterschiedliche Klassen (genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien) unterteilen, wobei genetische Algorithmen dabei bei binären Suchräumen ihre Anwendung finden und evolutionäre Algorithmen für reelle Suchräume geeignet sind. Oft wird in der Literatur diese Unterscheidung jedoch nicht beachtet und die beiden Begriffe werden synonym verwendet.

Evolutionäre Algorithmen sind fast universell einsetzbar und zeichnen sich nach Gerdes [37] durch eine Suche in einem sehr breiten Raum aus. Des weiteren ermöglicht die Kreuzung von Individuen einen Informationsaustausch zwischen vielversprechenden Regionen des Suchraums. Ein gute Übersicht über evolutionäre Algorithmen findet man im Artikel von Ghosh und Dehuri [38].

### NSGA-II - Nondominated Search Algorithm II

Die Abkürzung NSGA-II steht für „Nondominated Search Algorithm II“ und stellt eine Weiterentwicklung des NSGA dar. Deb beschreibt in seinem Kapitel [19] im Buch [105] von Wang den hier ausgewählten NSGA-II als Algorithmus, der für viele Anwendungen anwendbar ist und daher häufig im Bereich der multikriteriellen Optimierung eingesetzt wird. Deb beschreibt die Vorteile des NSGA-II in [19] darin, dass er eine geringere Komplexität in der Sortierung als der NSGA und andere multikriterielle evolutionäre Algorithmen aufweist. Außerdem verwendet der NSGA-II einen sogenannten elitären Ansatz und benötigt keinen Teilungsparameter, was ihn zusätzlich schneller macht, als andere Algorithmen.

Die Sortierungskomplexität des NSGA-II beträgt nur  $O(MN^2)$  anstatt  $O(MN^3)$  bei anderen evolutionären Algorithmen. Im Falle der Parameteroptimierung liefert das hier aber keinen großen Vorteil, da die hohe Rechenintensität in dieser Arbeit durch die Bewertung bzw. die Simulation des Fahrstilerkennungssystems hervorgerufen wird.



**Definition 3.** „Ein Individuum dominiert über ein anderes, sofern die Zielfunktion dieses Individuums in mindestens einer Dimension besser ist als die des anderen und in keiner Dimension schlechter.“ [78]

Mit dieser Definition werden die Individuen in die Pareto-Fronten eingeteilt. Die zwei Dimensionen in der Optimierung sind hierbei der Zielfunktionswert für die KIT Runde mit Mix 2 und die KIT Ost-Runde mit Mix 3. Zusätzlich wird ein Distanzwert berechnet, der den Abstand zwischen den Individuen angibt. Nach der Einteilung in die Pareto-Fronten werden Individuen aus der Population ausgewählt und miteinander gekreuzt. Die Größe, der dabei entstehenden Kreuzungspopulation kann über den Parameter „Kreuzungsrate“ festgelegt werden. Für jeden Parameter der beiden neuen Individuen, die bei der Kreuzung entstehen, gilt:

$$x_k = \alpha_k \cdot u_k + (1 - \alpha_k) \cdot w_k$$

für das erste „Kreuzungsindividuum“ und

$$x_k = (1 - \alpha_k) \cdot u_k + \alpha_k \cdot w_k$$

für das zweite „Kreuzungsindividuum“, wobei  $x_k$  der k-te Parameter des neuen Individuums  $x$  ist,  $u$  und  $w$  die zwei zu kreuzenden Individuen sind und  $\alpha$  ein Vektor von zufällig generierten Werten zwischen null und eins.

Anschließend wird die sogenannte Mutation durchgeführt und damit eine Mutationspopulation erstellt. Die Größe dieser Population kann über den Parameter „Mutationsrate“ festgelegt werden. Für die Mutation wird ein Individuum ausgewählt und genau ein Parameter wird durch einen zufälligen Wert aus dem jeweils gültigen Suchbereich ersetzt.

Die Individuen der Kreuzungspopulation und der Mutationspopulation werden anschließend simuliert und dadurch der für die Bewertung nötige Zielfunktionswert ermittelt. Die beiden Populationen werden mit der ursprünglichen Population vereinigt und somit eine Gesamtpopulation erstellt, die alle Individuen aus allen drei Populationen enthält. Alle Individuen werden danach erneut nach ihrer Pareto-Front und innerhalb der Fronten nach dem Distanzwert sortiert. Die besten Individuen gehen in die neue Population über, die genau so groß ist wie die Ursprungspopulation, der Rest der Individuen wird verworfen. Danach erfolgen iterativ wieder die Schritte Kreuzung und Mutation. Diese Iteration wird solange ausgeführt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Dieses kann unterschiedlich gestaltet sein.

Im Falle dieser Arbeit wurde ein Minimalanteil von Individuen in der ersten Pareto-Front als Abbruchkriterium definiert.

Als Populationsgröße wurde für die im Nachfolgenden gezeigten Ergebnisse 72 gewählt. Als zusätzliches Abbruchkriterium wurde außerdem festgelegt, dass sich alle Individuen in der selben Pareto-Front befinden müssen. Alle Optimierungen wurden mit einer Kreuzungsrate von 80% und einer Mutationsrate von 30% durchgeführt. Durch eine geschickte Wahl dieser beiden Parameter kann die Konvergenz des Algorithmus gegen die tatsächliche Front bzw. eine vollständige Abdeckung der Front über den gesamten Bereich erreicht werden. Aber auch die Wahl der eigentlichen Kreuzungs- und Mutationsoperationen trägt dazu bei. Das Verharren in lokalen Minima kann nur durch einen ausreichend großen Anteil an mutierten Individuen verhindert werden. Allerdings verlangsamt dies auch wiederum die Konvergenz des Algorithmus, da aus Individuen in der ersten Front immer wieder weit entfernte Individuen generiert werden können, was wiederum eine gute Abdeckung des gesamten Suchraums sicherstellt. Die Verzögerung der Konvergenz kann durch eine Verringerung der Mutationsintensität über den Verlauf des Algorithmus abgemildert werden [39].

### 4.5.6 Ergebnisse der Parameteroptimierung

Im folgenden sollen die Ergebnisse der Optimierung dargestellt werden. Um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, wird dabei nur auf die Daten eingegangen, die auch im Konferenzbeitrag [23] verwendet wurden. Man muss erwähnen, dass es sich beim dem Optimierungsverfahren um ein probabilistisches Verfahren handelt und deshalb bei mehreren Optimierungsdurchläufen durchaus unterschiedliche Optimierungsergebnisse entstehen können. Weitere Auswertungen von weiteren Optimierungen mit teilweise leicht unterschiedlichen Randbedingungen und eine Übersicht aller verwendeten Parameter inklusive der dazugehörigen Suchbereiche sind in [78] zu finden.

#### Ergebnisse Design of Experiments

Zuerst wurden mit Hilfe der in Abschnitt 4.5.4 beschriebenen Latin-Hypercube-Testfelder die für das Fahrstilerkennungssystem signifikanten Parameter bestimmt. Dafür wurde die Software JMP von SAS verwendet. Bei den Versuchen wurden 19 der ursprünglich 58 Parameter

als signifikant identifiziert. Signifikanz bezieht sich hierbei auf die 2:1-Gewichtung der *Fehlklassifizierungen* im Verhältnis zu den *abweichenden* Klassifizierungen. Es wurden auch noch weitere Untersuchungen durchgeführt. Diese sind in [78] zu finden. Diese 19 identifizierten Parameter wurden dann für die in der Folge durchgeführten Optimierungen verwendet.

### Ergebnisse Systemparameteroptimierung

Die Ergebnisse, die durch die Optimierung auf Basis der 19 signifikanten Parameter entstanden sind, sind in Abbildung 4.32 dargestellt. Um den Vorteil der statistischen Versuchsplanung zu verdeutlichen wurden neben der Optimierung mit Hilfe der 19 signifikanten Parameter, weitere Optimierungen durchgeführt, bei denen 19 Parameter zufällig aus den ursprünglichen 58 Parameters ausgewählt wurden. Dies wurde fünf mal durchgeführt und dann wurde der Mittelwert über die Ergebnisse gebildet. Die blauen Balken stellen die Ausgangsbasis dar. Der grüne Balken zeigt die Ergebnisse der Optimierung mit den 19 signifikanten Parametern. Die orangenen Balken repräsentieren den Mittelwert der fünf Optimierungen mit 19 zufällig ausgewählten Parametern.

Auf der KIT Runde mit Mix 2 konnte die Zielfunktion mit DoE um 61,5% verbessert werden. Bei zufällig ausgewählten Parametern ergibt sich zwar auch eine Verbesserung, diese ist mit 34,6% jedoch nur etwas mehr als halb so groß. Für den zweiten Trainingsdatensatz, die KIT Ost-Runde mit Mix 3, erreicht man mit DoE eine Verbesserung um 35%. Hier wird mit zufällig ausgewählten Parametern eine Verbesserung von 25% erzielt. Auf dem Testdatensatz kann mit DoE mit 13,2% immerhin eine kleine Verbesserung erreicht werden. Mit den zufällig gewählten Parametern wurde auf dem Testdatensatz keinerlei Verbesserung erreicht. Dies zeigt, dass der Einsatz von DoE die Optimierung hier deutlich verbessert, indem gezielter optimiert werden kann.

### Weitere Optimierungen - Fuzzy Logik

**Parameter Fuzzy Logik** Die 58 Systemparameter sind nicht die einzigen, im Fahrstilerkennungssystem vorkommenden Parameter. Auch die Fuzzy-Logik Blöcke müssen parametrisiert werden. Die Parameter können mit der Grafik in Abbildung 4.33 gut beschrieben werden.

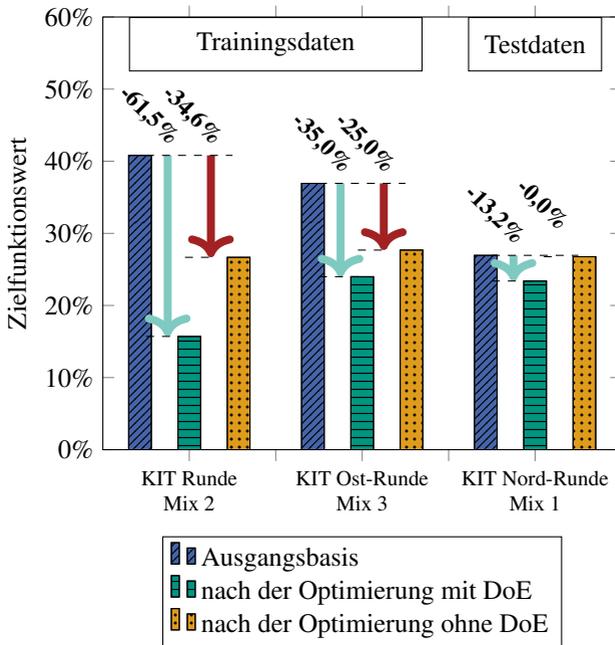


Abbildung 4.32: Ergebnisse der Systemparameteroptimierung

Abbildung 4.33 zeigt die Zugehörigkeitsfunktion für die Variable „Längsbeschleunigungsverhalten Überlandstraßen“. Sie besteht aus einer Dreiecksfunktion für den Fahrstil *normal* bzw. die Klasse *normal* und jeweils einer Trapezfunktion für die Fahrstile *komfortabel* (Klasse *niedrig*) und *sportlich* (Klasse *hoch*). Die Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Logik, wie sie bei der Fahrstilerkennung realisiert sind, können einfach mit nur zwei Parametern repräsentiert werden. Diese sind zum einen die Position des Dreieckshochpunktes bzw. der Mitte des Dreiecks auf der x-Achse, welche auch gleichzeitig den Anfangs- bzw. Endpunkt eines Trapezes beschreibt. Der zweite Parameter ist der Abstand vom Dreiecksmittelpunkt zu den Trapezseiten. Dies entspricht gleichzeitig auch genau der halben Dreiecksbreite. Für die Fuzzy-Logik Blöcke, die die Geschwindigkeitseinhaltung bewerten, entfällt der Parameter für die Dreiecksmitte, da hier immer null, also eine genaue Geschwindigkeitseinhaltung als *normal* klassifiziert werden soll.

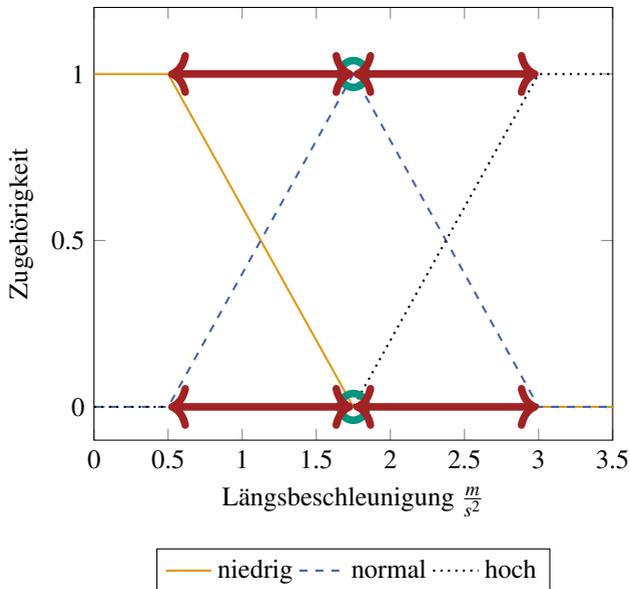


Abbildung 4.33: Fuzzy Parameter für die Variable „Längsbeschleunigungsverhalten Überlandstraßen“. Der grüne Kreis und die roten Pfeile sind eine grafische Darstellung der Parameter, die zu optimieren sind.

Für die Ausgangsfunktion ergibt sich auch ein einzelner Parameter für die Breite des Dreiecks für den Fahrstil *normal*.

Insgesamt ergeben sich so weitere 18 Parameter, die die gesamte Applikation der Fuzzy-Logik Blöcke repräsentieren. Eine Analyse mit statistischer Versuchsplanung ist hier nicht notwendig, da die entsprechenden Gewichtungsfaktoren bereits Auskunft über den Einfluss eines Fuzzy-Systems geben. Somit wird die Optimierung hier mit allen 18 Parametern durchgeführt, um die unten stehenden Ergebnisse zu erzeugen.

**Ergebnisse Fuzzy Parameter Optimierung** Die Ergebnisse der Optimierung der Fuzzy Logik Parameter sind in Abbildung 4.34 dargestellt.

Durch die Optimierung der Fuzzy-Logik-Parameter konnten noch einmal erhebliche Verbesserungen in der Zielfunktion erreicht werden. Auf dem ersten Trainingsdatensatz, der KIT Runde mit Mix 2, wurde eine Verbesse-

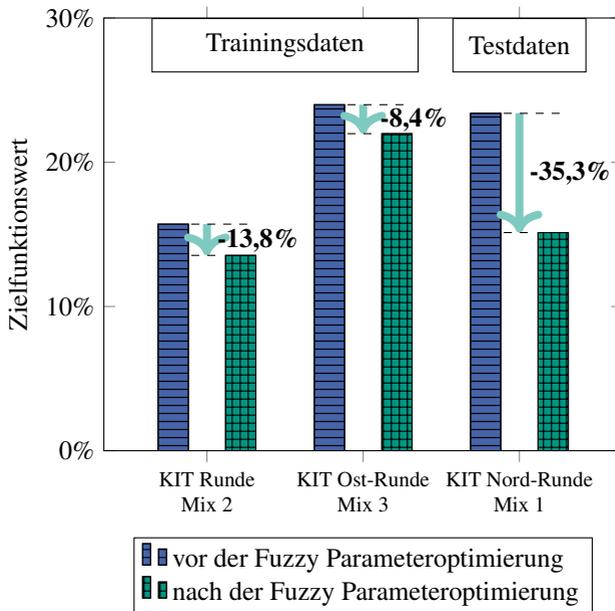


Abbildung 4.34: Ergebnisse der Fuzzy Parameteroptimierung

rung von 13,8% erzielt. Die Verbesserung der Zielfunktion auf dem zweiten Trainingsdatensatz, der KIT Ost-Runde mit Mix 3, betrug 8,4%. Besonders beeindruckend ist die Verbesserung auf dem Testdatensatz, der KIT Nord-Runde, um 35,3%. Im Gegensatz zur Optimierung der Systemparameter, bei der die Verbesserung auf den Trainingsdaten bedeutend höher ausfiel als die Verbesserung auf den Testdaten, ist somit bei der Optimierung der Fuzzy-Logik-Parameter die Verbesserung auf den Testdaten höher als auf den Trainingsdaten. Dies kann daran liegen, dass das Potential für Verbesserungen auf den Testdaten einfach höher war, weil die ursprünglichen Parameter auf den Trainingsdaten einfach schon in der Grundeinstellung besser gepasst haben, als bei den Testdaten. Oder es liegt an den unterschiedlichen Charakteristiken der einzelnen Teststrecken und der damit verbundenen Parametereinstellung, welche für die unterschiedlichen Teststrecken optimal ist und der damit verbundenen Tatsache, dass die Trainingsdaten von anderen Strecken stammen, als die Testdaten.

## Ergebnis nach zwei Optimierungsschritten

Nach der Durchführung beider Optimierungsschritte (Systemparameter Optimierung und Fuzzy-Logik Parameter Optimierung) konnte die Zielfunktion in allen Datensätzen, d.h. sowohl auf den Trainingsdaten, als auch auf den Testdaten, erheblich verbessert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.35 zu finden.

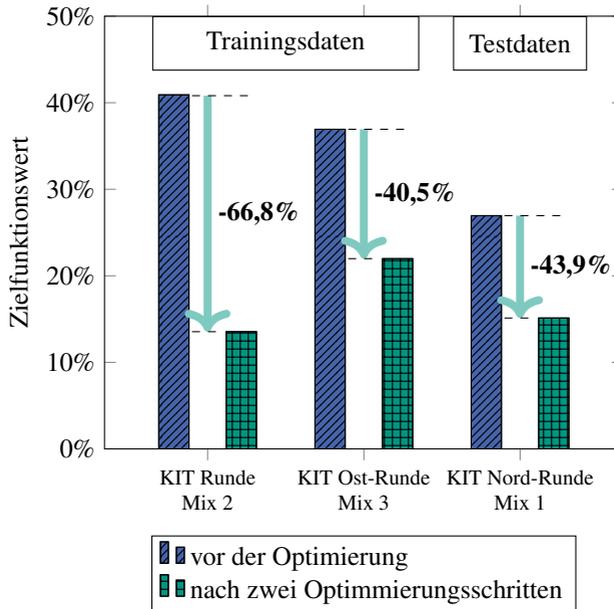


Abbildung 4.35: Ergebnisse nach zwei Optimierungsschritten

Auf dem ersten Trainingsdatensatz, der KIT Runde mit Mix 2, konnte eine Verbesserung von insgesamt 66,8% erzielt werden. Auf dem zweiten Trainingsdatensatz, der KIT Ost-Runde mit Mix 3, betrug die Verbesserung 40,5% und auch auf dem Trainingsdatensatz, der KIT Nord-Runde mit Mix 1, war die Verbesserung mit 43,9% sehr beeindruckend. Insgesamt kann von einer sehr erfolgreichen Optimierung der Parameter gesprochen werden.

### 4.5.7 Iterative Optimierung

Pandl beschreibt in seiner Arbeit [78] einen weiteren Optimierungsschritt. Auf anderen Daten führte er nach der Fuzzy-Logik-Parameter-Optimierung eine erneute Optimierung der Systemparameter durch und konnte damit eine weitere signifikante Verbesserung im Hinblick auf die Zielfunktion erreichen. Als Folgerung daraus wird ein iterativer Optimierungsprozess vorgeschlagen, wie er in Abbildung 4.36 abgebildet ist.

Dabei wird mit einem festgelegten Standardparameterset begonnen. Dann wird zuerst eine Systemparameteroptimierung durchgeführt. Im Anschluss wird eine Optimierung der Fuzzy-Logik-Parameter durchgeführt. Nun kann erneut eine Systemparameteroptimierung durchgeführt werden.

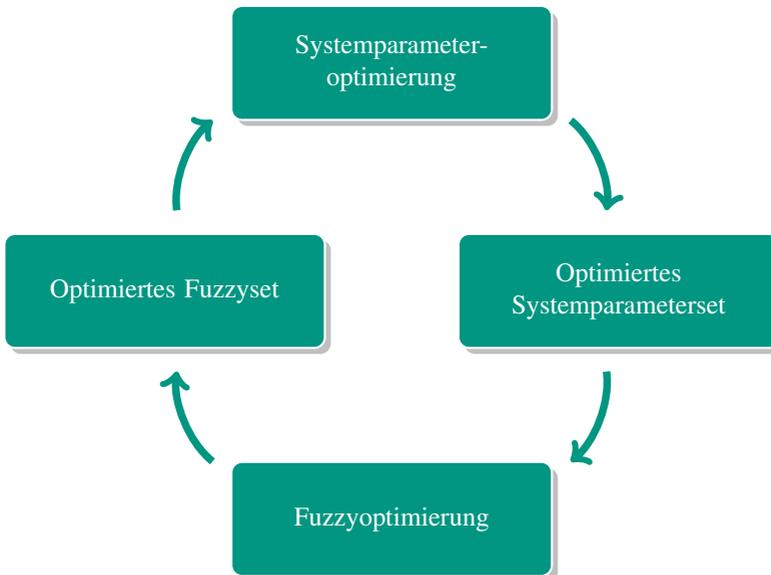


Abbildung 4.36: Iterativer Optimierungsprozess

Diese iterative Schleife kann solange wiederholt werden, bis ein vorher definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist. Das kann beispielsweise so definiert werden, dass die Optimierung endet, sobald sich die Zielfunktion nicht mehr um einen Mindestwert verbessert. Hierbei ist allerdings die Wahl eines sehr

gut generalisierbaren Trainingsdatensatzes von enormer Wichtigkeit, um eine Überanpassung zu verhindern.

Eine weitere Möglichkeit ist die parallele Optimierung der System- und der Fuzzy-Logik Parameter. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass nicht zu viele Parameter gleichzeitig optimiert werden, da es sein kann, dass der Algorithmus entweder zu lange braucht oder sogar überhaupt nicht mehr konvergiert. Man kann hierbei bei wenigen Parametern anfangen und sich langsam an die mögliche Maximalzahl herantasten.

### **4.5.8 Fazit zur Parameteroptimierung**

In diesem Abschnitt wurde die Optimierung der Parameter beschrieben. Sie stützt sich auf Werte aus der Simulation und auf Basis dieser Werte kann von einer sehr erfolgreichen Optimierung der Parameter gesprochen werden. Auf den Trainingsdatensätzen konnte die Zielfunktion um bis zu 66,8% verbessert werden. Auf dem Testdatensatz erfolgte eine Verbesserung um 43,9%.

Das vorliegende Framework kann weiter ausgebaut werden, um eine fast vollständig automatisierte Optimierung der Parameter zur ermöglichen. Dabei kann dann auch eine iterative Optimierung mit einem vorher definierten Abbruchkriterium ausgeführt werden. So könnte das Fahrstilerkennungssystem bei entsprechend vorliegenden Daten einfach an ein anderes Fahrzeug oder andere Umgebungsbedingungen angepasst werden, um auch bei geänderten Randbedingungen eine hohe korrekte Klassifizierungsrate zu gewährleisten.

Ein Nachteil ist allerdings, dass alles nur auf Werten aus der Simulation basiert. Es wäre wünschenswert Tests oder sogar eine Optimierung auf Daten aus dem Realversuch durchzuführen. Allerdings ist dies nicht einfach umzusetzen, wie im nächsten Abschnitt erklärt wird. Wenn man jedoch Realfahrdaten mit passender Referenz hätte, wäre es möglich die Optimierung schnell und automatisiert auf diesen Daten durchzuführen.

## **4.6 Validierung des Fahrstilerkennungssystems anhand von Realfahrdaten**

Da alle Validierungsergebnisse der Fahrstilerkennung bisher auf Daten aus der Simulation beruhten, war es das Ziel von Vigreux in seiner Arbeit [104]

eine Validierung mit Realfahrdaten durchzuführen. Ein entsprechend ausgestattetes Fahrzeug stand leider nicht zur Verfügung, sodass man nicht direkt Testfahrten mit parallel ausgeführter Fahrstilerkennung durchführen konnte. Jedoch standen Datenaufzeichnungen von Testfahrten zur Verfügung, die alle für die Fahrstilerkennung benötigten Signale beinhalteten. Diese wurden Vigreux zusammen mit einer entsprechenden Aufgabenstellung vom Autor dieser Arbeit zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Daten wurde eine Validierung angestrebt. Der entsprechende Ansatz wurde von Vigreux zusammen mit dem Autor dieser Arbeit entworfen und final von Vigreux implementiert und angewendet.

### 4.6.1 Ansatz

Der kritische Punkt bei der Validierung mit Realfahrdaten ist die Generierung einer Referenz, die dazu genutzt werden kann, die Klassifizierung des Fahrstilerkennungssystems zu bewerten. In den vorangegangenen Validierungsschritten wurde jeweils die Parametrierung des Fahrermodells als Referenz genutzt. Diese steht bei Realfahrdaten natürlich nicht zur Verfügung. Eine Erzeugung der Referenz in realen Testfahrten ist sehr aufwändig und kann im Regelfall nur subjektiv erfolgen. Die passiert normalerweise händisch und ist damit sehr aufwändig. Dazu müssen Befragungen der Testfahrer stattfinden, die ihren eigenen Fahrstil entsprechend einschätzen müssen, um ihn mit dem vom System erkannten Fahrstil vergleichen zu können. Eine weitere Möglichkeit wäre einen Testleiter, der sich beispielsweise auf dem Beifahrersitz befindet, im Anschluss an die Testfahrt zu befragen. Vorteil hierbei wäre, dass der Testleiter im Gegensatz zu unterschiedlichen Fahrern immer eine ähnliche Auffassung und somit auch eine ähnliche Bewertungsgrundlage für den Fahrstil hat. Da der Fokus auf anderen Punkten lag und somit im Rahmen dieser Arbeit keine groß angelegten Testfahrten für die Fahrstilerkennung durchgeführt werden konnten, wurde von Vigreux ein anderer Ansatz verfolgt.

Es wurde neben der ursprünglichen, eine zweite, möglichst einfache, Methode implementiert, mit der auf Basis der zur Verfügung stehenden Testdaten der Fahrstil bewertet wurde. Dafür wurde der Ansatz von Lehert [61] verwendet, welche die sogenannte „Driver Capability Envelope“ nutzt. Genau genommen werden zwei dieser „Driver Capability Envelopes“ verwendet. Eine für den *komfortablen Fahrer* und eine für den *Normalfahrer*. Diese beschreiben die akzeptierten Beschleunigungen durch den entsprechenden

Fahrertyp im kombinierten Fall von Längs- und Querbeschleunigung im g-g-Diagramm. Abbildung 4.37 zeigt die „Driver Capability Envelopes“ für den *komfortablen Fahrer* und den *Normalfahrer*. Diese sind geschwindigkeitsabhängig und orientieren sich an der Funktion von Schimmelpfennig aus dem Abschnitt 4.2.12 ([89] und [90]). In Abbildung 4.37 ist dies durch unterschiedliche Breiten der „Driver Capability Envelopes“ dargestellt. Der breiteste „Driver Capability Envelope“ steht dabei für die Geschwindigkeit von  $50,2 \frac{km}{h}$ , bei der der Fahrer die höchsten Querbeschleunigungen akzeptiert. Der schmalste „Driver Capability Envelope“ beschreibt Geschwindigkeiten unter  $9 \frac{km}{h}$  und über  $120 \frac{km}{h}$ . Die dünnen Linien stehen dabei für Geschwindigkeitswerte dazwischen.

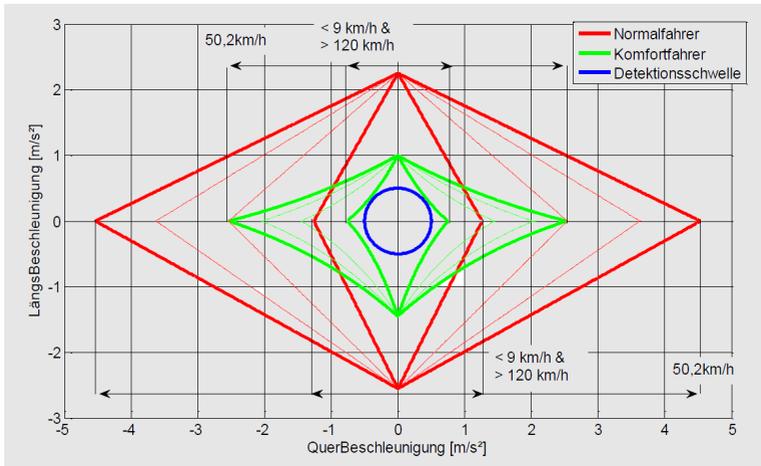


Abbildung 4.37: Capability Envelopes für Normal- und Komfortfahrer, aus [61]

Für die Bewertung des Fahrstils werden sogenannte Events zu Rate gezogen. Ein Event ist eine Reihe von Messwerten, die in mindestens einer Beschleunigungsrichtung den Grenzwert von  $0,5 \frac{m}{s^2}$  für mindestens eine Sekunde überschreiten. Liegen alle Messwerte dann innerhalb des „Driver Capability Envelopes“ für den *komfortablen Fahrer*, wird das Event als *komfortables* Event erkannt. Liegen mindestens zehn Messwerte (entspricht ungefähr einer Sekunde) außerhalb des „Driver Capability Envelopes“ für den *komfortablen Fahrer*, aber innerhalb des „Driver Capability Envelopes“ für den *Normalfahrer*, wird das Event als *normales* Event erkannt. Liegen mindes-

tens zehn Messwerte außerhalb der beiden „Driver Capability Envelopes“ wird das Event als *sportliches* Event erkannt.

Der Fahrstil wird dann als prozentualer Anteil der entsprechenden Events einer Klasse an der Summe aller Events ausgedrückt. Um ein eindeutiges Fahrstilsignal zu erzeugen, könnte man die Klasse mit dem höchsten Anteil an Events über einen bestimmten Zeitraum angeben.

## 4.6.2 Ergebnisse

Im ersten Schritt wurden die Ergebnisse aus dem Verfahren von Lehert [61] mit dem Fahrstil, der sich direkt aus den Fahrermodell-Parametern aus der Simulation ergibt, verglichen. Für das Verfahren von Lehert wurde dabei jedes Event für sich betrachtet und im Anschluss eine Glättung des entstehenden Signals mit Hilfe eines Kalman-Filters realisiert. Dabei ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Ausgangssignalen. Die Ergebnisse sind in der Arbeit von Vigreux [104] nachzulesen. Eine detaillierte Auswertung würde Rahmen dieser Arbeit sprengen. Die Ergebnisse von Vigreux bescheinigen dem Verfahren von Lehert eine gute Abbildung des tatsächlichen Fahrstils und somit scheint das Verfahren für einen Vergleich mit dem System von Grabengießer geeignet zu sein.

Im Anschluss wurden beide Verfahren, also das Verfahren von Lehert [61] als Referenz und das Verfahren von Grabengießer [40] als zu validierendes Signal, auf Aufzeichnungen von realen Testfahrten angewendet. Auch hierbei ergab sich eine gute Übereinstimmung, was auf eine gute Erkennung des Fahrstils durch das System von Grabengießer schließen lässt. Detaillierte Ergebnisse sind in der Arbeit von Vigreux [104] zu finden. Dort wird auch erneut auf die starke Abhängigkeit der Fahrstilerkennung von den gewählten Parametern eingegangen.

## 4.7 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung und der Test eines Fahrstilerkennungssystems beschrieben. Die Implementierung des Systems erfolgte mit Matlab/Simulink und nutzt das Konzept der Fuzzy-Logik zur Klassifikation des Fahrstils. Im ersten Test mit definierten Strecken und vorgegebenen Fahrverhalten konnte dem System bereits eine gute positive Klassifizierungsrate anhand von Simulationsdaten bescheinigt werden. Die Tests

wurden in einem zweiten Schritt erweitert und auf alle verfügbaren Straßenklassen ausgedehnt. Die Anpassung der Parameter des Systems geschah händisch, um einen möglichst hohen Anteil an *exakten* Klassifizierungen zu erhalten. Im Zuge dessen wurde eine starke Abhängigkeit der Klassifizierung von den Parametern erkannt. Daher erfolgte im nächsten Schritt eine computergestützte Optimierung der Parameter mit einem Verfahren, das die beiden Methoden statistische Versuchsplanung und evolutionäre Algorithmen vereint. Dabei wurde eine signifikante Verbesserung der Klassifikation basierend auf einer vorher festgelegten Zielfunktion erreicht. Insgesamt konnte ein Framework geschaffen werden, welches erlaubt, die Parameter auf beliebige Fahrzeuge und Strecken zu optimieren.

Da kein entsprechend ausgestattetes Fahrzeug zur Verfügung stand, um Realversuche mit aktiver Fahrstilerkennung durchzuführen, konnten abschließende Tests des Systems simulativ mit Daten aus Realfahrten stattfinden. Der kritische Punkt war dabei die Generierung eines Referenzsignals. Dazu wurde ein zweites einfaches Verfahren, welches auf anderen Methoden bzw. Bewertungskriterien beruht, zur Fahrstilerkennung implementiert und mit Simulationsdaten validiert. Die positive Validierung erlaubt es, das System als Referenz zu nutzen. Beim Vergleich der Ausgangssignale beider Systeme ergab sich eine gute Übereinstimmung, was basierend auf den Erkenntnissen aus der Simulation auf eine gute Abbildung des Fahrstils durch das System schließen lässt.

Die Testmöglichkeiten waren jedoch beschränkt und daher kann zwar aus den erfolgreichen Tests auf eine gute Klassifizierung in der Praxis geschlossen werden. Allerdings sollte dies mit Testfahrten mit Probanden ausführlich untersucht werden, ob die Klassifizierung auch mit dem subjektiven Empfinden der Probanden übereinstimmt. Dafür müssten die Systemparameter im Voraus auf das verwendete Fahrzeug und die gefahrene Strecke hin optimiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Parametrierung wäre eine Optimierung auf einen großen Pool aus unterschiedlichen Strecken, Fahrzeugen und Fahrern. Würden diese Daten vorliegen, könnte man das System für einen *durchschnittlichen* Fahrer in einem *durchschnittlichen* Fahrzeug auf einer *durchschnittlichen* Strecke optimieren. Dadurch könnte man eine Überoptimierung verhindern und das System würde auf allen Strecken, für alle Fahrzeuge und für jeden Fahrer befriedigende, wenn auch nicht optimale Ergebnisse liefern.

Da das Ausgangssignal jedoch nicht für sicherheitskritische Systeme verwendet werden soll, sondern für die Parametrierung eines Fahrerassistenz-

systems genutzt wird, ist eine perfekte Erkennung zwar wünschenswert, aber nicht unbedingt notwendig. Im folgenden wird das Ausgangssignal der Fahrstilerkennung genutzt, um eine Basisadaption der Fahrhinweise zu realisieren.

## 5 Hinweisadaption

Die Hinweise, die in Kapitel 3 beschrieben wurden, eignen sich sehr gut dazu, an verschiedene Parameter der Fahrt angepasst zu werden, um somit zum einen besser zur Situation zu passen und folglich eine bessere Energieeinsparung zu ermöglichen. Zum anderen können sie aber auch an den Fahrer (beispielsweise an seine Reaktionszeit) angepasst werden. Dadurch könnte die Akzeptanz des Fahrers für das System gesteigert werden.

Zu Beginn des Kapitels sollen die erforderlichen Grundlagen für ein Verständnis des Konzepts der Adaption beim Leser gelegt werden. Für die Adaption kommt final ein zweistufiges Konzept zur Anwendung, dessen Beschreibung direkt anschließt. Das Konzept wurde zwar ganzheitlich entwickelt, bisher aber auf Grund von Einschränkungen durch beispielsweise den statischen Fahrsimulator nur teilweise umgesetzt. Diese Umsetzung eines Teils des Konzepts wird am Ende des Kapitels beschrieben. Die Erstellung des Konzepts sowie die Implementierung der Anpassung an die Reaktionszeit wurde von Oliver Bohnenberger auf Basis einer vom Autor dieser Arbeit erarbeiteten Aufgabenstellung in seiner Masterarbeit [11] umgesetzt und vom Autor dieser Arbeit entsprechend adaptiert, parametrisiert und im Gesamtsystem implementiert.

### 5.1 Grundlagen

#### 5.1.1 Tolerierte Querbeschleunigung

Die erste Basis für die Adaption der Fahrhinweise bildet die tolerierte Querbeschleunigung durch den Fahrer. Dieser Parameter wurde bereits im Abschnitt 4.3.1 im Kapitel 4 genauer beleuchtet. Für die Hinweise ist die aktuell tolerierte Querbeschleunigung, abhängig vom aktuellen Fahrstil, interessant. In vielen Forschungsarbeiten wird dabei die tolerierte Querbeschleunigung des Normalfahrers beschrieben ([89], [90], [35], [55] und [26]). Sie ist von vielen Parametern abhängig. Haupteinflussparameter ist dabei die aktuelle Fahrgeschwindigkeit. Schimmelfennig beschreibt die Sicherheitsgren-

ze des Normalfahrers mit einer von der Fahrgeschwindigkeit abhängigen Formel. Diese ist in Abschnitt 4.2.12 zu finden.

In anderen Forschungsarbeiten ([28] und [43]) wird die tolerierte Querbesehleunigung als Funktion des Kurvenradius beschrieben. In seiner Dissertation beschreibt Manns [68] weitere Abhängigkeiten.

Im Falle dieser Arbeit wird für die Berechnung der maximalen Kurvengeschwindigkeit für die Fahrhinweise ein Kennfeld benutzt, welches den Zusammenhang von Kurvenkrümmung und Geschwindigkeit beschreibt. Da man die Kurvengeschwindigkeit über die Kurvenkrümmung bzw. den Kurvenradius direkt in eine Querbesehleunigung umrechnen kann, ist somit die tolerierte Querbesehleunigung beschrieben.

### 5.1.2 Reaktionszeit

Besonders auf dem Gebiet der Unfallforschung ist die Reaktionszeit des Menschen ein wichtiges Thema. Für die Entwicklung von Systemen, die schnellere Bremsungen in Gefahrensituationen ermöglichen, wurden besonders im Bereich der Unfallvermeidung viele Untersuchungen zur Reaktionszeit unternommen. Jedoch spielt die Reaktionszeit auch im Bereich der Unfallrekonstruktion eine bedeutende Rolle. Die Reaktionszeit ist dabei von vielen Parametern abhängig.

Reaktionszeit bezeichnet die Zeit, die zwischen dem Einsetzen eines Reizes und der Reaktion auf diesen Reiz verstreicht. Im Falle der haptischen Übermittlung des Fahrhinweises zum Loslassen des Fahrpedals ist das die Zeit vom Vibrieren des Fahrpedals bis zum Zurückziehen des Fußes vom Fahrpedal durch den Fahrer. Die Reaktionszeit setzt sich dabei aus mehreren Komponenten zusammen. Zuerst muss erkannt werden, dass eine Situation bevorsteht und wie sie zu verstehen ist. Anschließend muss beurteilt werden ob eine Reaktion notwendig ist und wenn ja, was für eine. Dies ist alles Teil des mentalen Verarbeitungsprozesses. Auf diesen Prozess folgen noch die Zeiten, in denen die körperliche Bewegung stattfindet, um die Reaktion zu tätigen und die Zeit, die die betätigten Gerätschaften für die Reaktion benötigen. Die Reaktionszeit ist dabei von vielen Stimuli und temporären Variablen beeinflusst [42]. Einen sehr großen Einfluss auf die Reaktionszeit des Fahrers auf eine Gefahrensituation hat die Tatsache, ob der Fahrer mit dieser Situation rechnet oder nicht. Ein Fahrer, der auf eine mögliche Gefahrensituation vorbereitet ist, kann auf diese sehr viel schneller reagieren, als ein Fahrer, für den die Situation völlig überraschend eintritt. Robinson

et al. [86] zeigen außerdem, dass sich die Reaktionszeit auf visuelle Ereignisse verlängert, wenn verkehrsreiche Kreuzungen bevorstehen oder es erforderlich ist, das Geschehen im Rückspiegel regelmäßig zu beobachten. Weitere Variablen sind unter anderem die Anzahl an Entscheidungs- bzw. Wahlmöglichkeiten, die Einfachheit der unterscheidbaren Signale, die Geschwindigkeit des Fahrzeugs sowie Alter und Erfahrung des Menschen.

Eine detaillierte Betrachtung der Reaktionszeit im Hinblick auf den Straßenverkehr ist außerdem in [52] zu finden. Klebelsberg beschreibt darin auch die Zusammensetzung der Reaktionszeit und gibt Anhaltspunkte über typische Reaktionszeiten bei verschiedenen Arten von Reaktionen. Dabei wird zwischen *Einfachreaktionen*, *Mehrfachreaktionen* und *Wahlreaktionen* unterschieden. Alle diese Arten von Reaktionen können im Straßenverkehr auftreten. Die Reaktionszeiten sind dabei sehr unterschiedlich.

Die Enzyklopädie „Discovery“ von Bertelsmann [79] nennt die in Abbildung 5.1 dargestellten Reaktionszeiten. Dabei ist zu erkennen, dass die Reaktionszeiten bei optischen Reizen länger sind, als die bei akustischen Reizen, welche wiederum etwas länger sind, als die Reaktionszeiten auf taktile bzw. haptische Reize. Die dargestellten Zeiten gelten jedoch für einfache Reaktionen unter voller Konzentration auf die vorliegende Aufgabe ohne jegliche Ablenkung. Daher sind sie nur als Orientierung zu sehen. Die kürzeren Reaktionszeiten bei akustischen und taktilen Reizen sind auf die schnellere Wahrnehmung von Berührungen und Geräuschen zurückzuführen. Scott und Gray belegen in einer Studie am Fahrsimulator die kürzeren Reaktionszeiten auf haptische und akustische Reize [94].

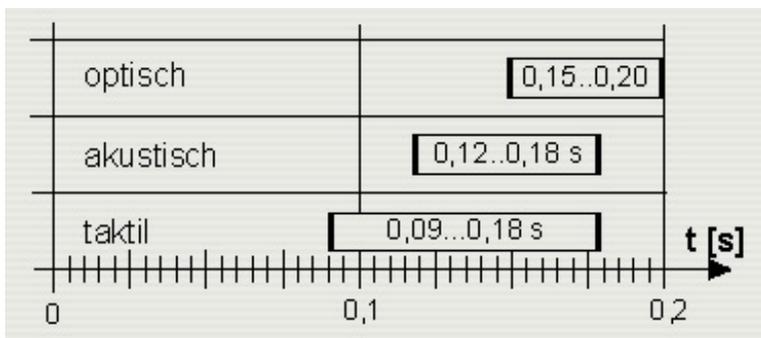


Abbildung 5.1: Menschliche Reaktionszeiten aus [79]

Wie bereits im Kapitel 3 erwähnt, ist der visuelle Kanal beim Fahrer während der Erfüllung der Fahraufgabe bereits sehr stark ausgelastet. Um ihn nicht weiter zu belasten, ist es von Vorteil weitere Informationen auf dem auditiven oder dem haptischen Kanal zu übermitteln. Im Folgenden sollen die beiden Kanäle hinsichtlich der Reaktionszeiten gegenüber gestellt werden. Der Vorteil beider Kanäle ist, dass sie weitgehend unabhängig vom Straßengeschehen und der Blickrichtung des Fahrers wahrgenommen werden können. Es gibt allerdings auch Ausnahmen, in denen es zum Überhören eines Signals kommen kann, wenn die visuelle Beanspruchung gleichzeitig sehr hoch ist [67]. Im Falle von haptischen Signalen konnten ebenso verlängerte Reaktionszeiten nachgewiesen werden, wenn gleichzeitig mehrere visuelle Signale verarbeitet werden mussten [53]. Da diese Phänomene im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit betrachteten Fahrhinweisen jedoch weniger kritisch sind und außerdem nur sehr selten auftreten, werden sie im weiteren nicht weiter betrachtet.

Wie bereits erwähnt hat es einen sehr großen Einfluss auf die Reaktionszeit, ob der Fahrer mit einem Ereignis rechnet oder nicht. Außerdem hat auch eine mögliche Ablenkung einen großen Einfluss. Mohebbi et al. untersuchten in einer Studie [74] den Einfluss von Ablenkungen, die mit einfachen oder komplexen Konversationen am Mobiltelefon realisiert wurden, auf die Reaktionszeiten bei taktilen und auditiven Hinweisen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Dabei beschreiben die schwarzen Balken die Reaktionszeiten ohne jeglichen Hinweis, die weißen Balken die Reaktionszeiten mit taktilen Hinweis und die grauen Balken die Reaktionszeiten mit akustischen Hinweis. Links stehen die Reaktionszeiten ohne Ablenkung, in der Mitte die Reaktionszeiten mit geringer Ablenkung durch eine einfache Konversation und rechts die Reaktionszeiten mit starker Ablenkung durch eine komplexe Konversation.

Eine einfache Konversation verlängert dementsprechend die Reaktionszeit auf auditive Hinweise (graue Balken) signifikant, während die Veränderung für den haptischen Hinweis (weiße Balken) nicht signifikant ist. Ebenso klar erkennbar ist die deutlich verkürzte Reaktionszeit gegenüber keinerlei Hinweisen (schwarzer Balken). Ein weiteres interessantes Ergebnis der Studie war, dass es keine signifikanten Korrelationen zwischen der Reaktionszeit und den fahrerspezifischen Variablen wie Alter, Geschlecht oder Erfahrung gab. Dies könnte daraus resultieren, dass die Probanden der Studie vorbereitet waren und mit einem Bremsvorgang gerechnet haben.

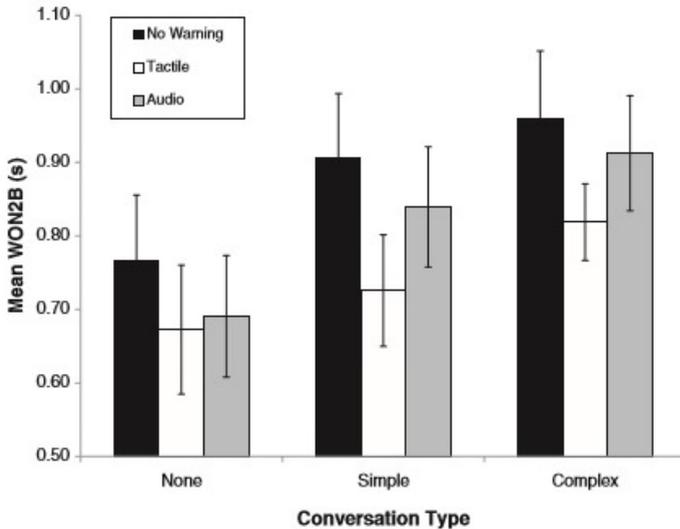


Abbildung 5.2: Mittlere Reaktionszeiten bis zur Bremsreaktion aus [74]

Es gibt weitere Forschungsergebnisse, die bestätigen, dass die Reaktionszeiten auf haptische Signale geringer ausfallen, als die Reaktionszeiten auf visuelle oder auditive Signale ([71] und [81]). Wird die Dauer und die Intensität der haptischen Hinweise modifiziert, kann damit Einfluss auf die Reaktionszeit genommen werden. Eine höhere Intensität führt dabei in der Regel zu kürzeren Reaktionszeiten. Tijerina et al. untersuchten in einer Studie [99] die Auswirkungen von Variationen der Dauer und der Intensität von Vibrationen bei einer Auffahrwarnung. Der Probandenkreis war dabei sehr klein, aber es konnten deutliche Auswirkungen der Modifikationen im Hinblick auf die Reaktionszeit festgestellt werden. Es wird jedoch erwähnt, dass es wichtig ist, die Vibrationsdauer oder -intensität nicht zu sehr zu erhöhen, da dies vom Fahrer dann als störend wahrgenommen werden kann.

Um konkrete Startwerte für die Reaktionszeit im Modell zu extrahieren wurden weitere Studien, die sich mit den Reaktionszeiten auf haptische Hinweise beschäftigen, untersucht. Es befassen sich zwar viele Studien mit der Wirksamkeit von haptischen Hinweisen, konkrete Reaktionszeiten wurden

allerdings kaum gemessen. Der Bereich von Reaktionszeiten in Studien, die sich auf die Reaktionszeit von der Signalübermittlung bis zur Bremsung fokussiert haben, erstreckt sich von 0,55 bis 1,4 Sekunden ([99], [74] und [87]). Da für die fahrstiladaptiven Fahrhinweise nur die Reaktionszeit bis zum Loslassen des Gaspedals gemessen werden soll, muss von den Werten noch die Pedalwechselzeit abgezogen werden. Die benötigte Zeit vom Loslassen des Gaspedals bis zum Treten der Bremse beträgt ungefähr 0,15 - 0,21 Sekunden [116]. Daraus ergeben sich eine Untergrenze von 0,4 Sekunden und eine Obergrenze von 1,25 Sekunden für den Bereich der Reaktionszeiten auf haptische Hinweise.

## 5.2 Konzept

Für die Adaption der Fahrhinweise wurde ein zweistufiges Konzept entwickelt. Im ersten Schritt sollen die Hinweise, im Speziellen die Ausrollhinweise vor einer Kurve, an den Fahrstil angepasst werden. Der zweite Schritt ist dann eine Anpassung an die Reaktionszeit des Fahrer auf vorangegangene Hinweise. Dies geschieht fortlaufend während der Fahrt. Im folgenden sollen die zwei Stufen einzeln erläutert werden.

### 5.2.1 Erste Stufe: Anpassung an den Fahrstil

Die Anpassung der Fahrhinweise an den Fahrstil wurde nur konzeptionell entwickelt, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt. Eine Umsetzung würde auch eine Testmöglichkeit voraussetzen, um sicher zu gehen, dass die Anpassung keine sicherheitskritischen Kurvengeschwindigkeiten hervorruft. Da die Fahrstilerkennung jedoch nicht im Fahrzeug umgesetzt wurde und somit auch die Anpassung im Fahrzeug nicht stattfinden kann, wurde auch die Anpassung an den Fahrstil nicht implementiert. Das Konzept der Anpassung wird jedoch im Folgenden beschrieben.

Im ersten Schritt sollen die Fahrhinweise an den, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, erkannten Fahrstil adaptiert werden. Die Anpassung hat jedoch nur Auswirkungen auf die Ausrollhinweise vor Kurven. Wie bereits im Abschnitt 5.1.1 beschrieben wird für die Berechnung der Maximalgeschwindigkeit in der Kurve ein Kennfeld verwendet, welches einen Zusammenhang von Kurvenkrümmung und Fahrgeschwindigkeit beschreibt. Es besteht aus mehreren Stützstellen die einer bestimmten Kurven-

krümmung eine passende Fahrgeschwindigkeit zuordnen. Nimmt man eine ebene Straße an, ergibt dies eine definierte Querbeschleunigung. Zwischen den Stützstellen wird zur Bestimmung der Kurvengeschwindigkeit bei dazwischenliegenden Radien linear interpoliert.

Das bisher verwendete Kennfeld ist in Abbildung 5.3 in blau dargestellt. Die blauen Punkte stellen dabei die Stützstellen dar. Für die Darstellung wurden die Werte des Kennfeldes entsprechend umgerechnet, um sie mit der Sicherheitsgrenze des Normalfahrers von Schimmelpfennig in rot vergleichen zu können.

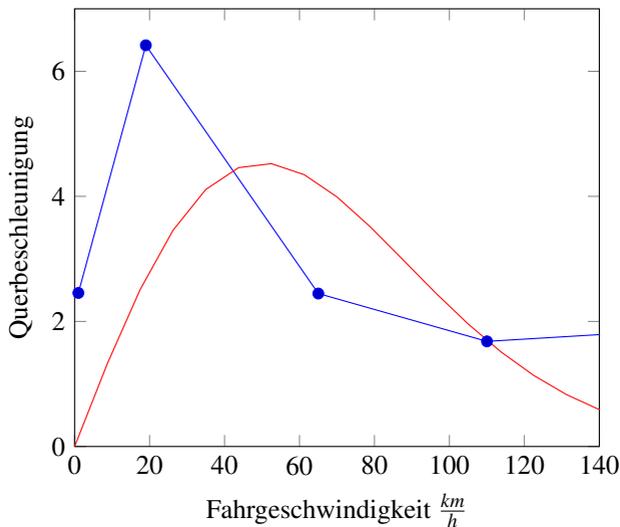


Abbildung 5.3: Kennfeld Kurvengeschwindigkeiten: in blau das bisher verwendete Kennfeld, in rot die Kurve zur akzeptierten Querbeschleunigung von Schimmelpfennig

Das verwendete Kennfeld wurde während den Testfahrten mit pilotierter Längsführung entwickelt. Da für die Entwicklung des Kennfeldes die Kurve von Schimmelpfennig als Basis zu Grunde gelegt wurde, liegt es nahe, diese als Vergleichswert zu nutzen. Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die beiden Kurven deutlich, weisen aber dennoch einen ähnlichen Verlauf auf. In beiden Kurven steigt die Querbeschleunigung zuerst bis zu einem Maximalwert an, bevor sie wieder abfällt. Im Kennfeld steigt die Querbeschleunigung im Bereich hoher Geschwindigkeit wieder minimal an, wäh-

rend sie in der Kurve von Schimmelpfennig immer weiter fällt. Für noch höhere Geschwindigkeiten wird der Abstand beider Kurven noch größer. Dies ist aber darauf zurückzuführen, dass die Untersuchungen von Schimmelpfennig schon vor über 30 Jahren durchgeführt wurden und sich die Fahrwerke von Fahrzeugen in dieser Zeit sehr stark verbessert haben, sodass sich auch die subjektiven Empfindungen beim Fahren mit Querbeschleunigung in einem Fahrzeug deutlich zwischen damals und heute unterscheiden. Außerdem ist die Kurve von Schimmelpfennig in seinen Ausführungen nur bis knapp unter  $140 \frac{km}{h}$  definiert, weil die Testfahrten, die zu dieser Kurve führten, nur innerhalb dieses Geschwindigkeitsbereichs durchgeführt wurden. Eine Extrapolation über diese Geschwindigkeit hinaus wäre daher nicht korrekt, da die Kurve nur an die Daten aus den Messfahrten gefittet wurde. Die höhere maximale Querbeschleunigung bei dem verwendeten Kennfeld lässt sich ebenfalls mit beiden oben genannten Begründungen erklären. Die niedrigere Querbeschleunigung beim Kennfeld im Bereich zwischen  $40 \frac{km}{h}$  und  $110 \frac{km}{h}$  könnte sich aus der veränderten Wahrnehmung der Querbeschleunigung durch die pilotierte Längsführung ergeben. Die Verschiebung des höchsten Punktes der Querbeschleunigung in Richtung kleinerer Geschwindigkeiten im Vergleich zur Kurve von Schimmelpfennig, ergab sich aus der Einschätzung bei Testfahrten, dass das Fahrverhalten vor allem in Kreisverkehren (Geschwindigkeit ca.  $25 \frac{km}{h}$ ) sehr träge anfühlte, wenn das Kennfeld mit den Parametern von Schimmelpfennig parametrisiert war.

Da sportliche und komfortable Fahrer eine andere Querbeschleunigung tolerieren, als der Normalfahrer es tut, bietet es sich an, die Fahrhinweise über das verwendete Kennfeld zu adaptieren. Auf der Basis verschiedener Studien zum Querbeschleunigungsverhalten von sportlichen und komfortablen Fahrern ([6], [106], [73], [43] und [28]) machte Oliver Bohnenberger in seiner Masterarbeit [11] Vorschläge für Kennfelder für komfortable und sportliche Fahrer. Er unterscheidet dabei zwischen der manuellen und der pilotierten Längsführung, da das wie bereits erwähnt einen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung der Querbeschleunigung haben könnte. Die vorgeschlagenen Kennlinien für die pilotierte Längsführung entsprechen vom Verlauf her dem ursprünglichen Kennfeld, welches für den sportlichen Fahrer in Richtung höherer und für den komfortablen Fahrer in Richtung niedrigerer Querbeschleunigungen verschoben wurde. Für die manuelle Längsführung orientiert sich Bohnenberger an dem Verlauf der „Sicherheitsgrenze des Normalfahrers“ von Schimmelpfennig und verschiebt sie wiederum für

sportliche Fahrer in Richtung höherer Querbeschleunigungen und für komfortable Fahrer in Richtung niedrigerer Querbeschleunigungen. Er schlägt konkrete Zahlen vor. Diese sind dabei auf Basis von Studien gewählt und berechnet, müssen aber zuerst im Fahrversuch auf Verwendbarkeit geprüft werden. Des Weiteren sind diese Werte stark fahrzeugabhängig, da das Empfinden der Querbeschleunigung stark vom Fahrwerk und dem Aufbau des verwendeten Fahrzeug abhängig ist. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit auf die konkrete Umsetzung dieser Variante der Anpassung verzichtet werden, da sie auf Grund fehlender Testfahrten nicht validiert werden kann. Auch Testfahrten im Fahrsimulator ergeben für die Validierung dieser Art von Adaption keinen Sinn, da der in dieser Arbeit verwendete statische Fahrsimulator keine Rückmeldung im Bezug auf Beschleunigungen an den Fahrer liefern kann.

### 5.2.2 Zweite Stufe: Anpassung an die Reaktionszeit

Die Reaktionszeit des Fahrers hat im Rahmen der Fahrhinweise einen großen Einfluss darauf, ob der Fahrer, wenn er auf einen Ausrollhinweis reagiert, mit der korrekten, mit einer zu hohen oder mit einer zu niedrigen Geschwindigkeit bei der entsprechenden Situation ankommt, für die der Ausrollhinweis gegeben wurde. Führt das Fahrzeug beispielsweise mit einer Geschwindigkeit von  $100 \frac{km}{h}$ , legt das Fahrzeug innerhalb einer Sekunde eine Strecke von fast 30 Metern zurück. Da die Reaktionszeiten sehr unterschiedlich für verschiedene Fahrer sein können und selbst der gleiche Fahrer in unterschiedlichen Situationen bzw. zu unterschiedlichen Zeiten sehr abweichende Reaktionszeiten haben kann, wobei die Unterschiede durchaus im Bereich von einer Sekunde liegen können, ist es unerlässlich die Fahrhinweise an die Reaktionszeit des Fahrers anzupassen. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Fahrhinweise für den Fahrer im aktuellen Zustand und in der vorliegenden Situation zu einem passenden Zeitpunkt kommen, sodass der Fahrer mit einer angemessenen Geschwindigkeit bei der Situation ankommt.

Im optimalen Fall bleibt der Fahrer auf dem Fahrpedal bis der Ausrollhinweis angezeigt und haptisch übermittelt wird und geht dann nach einer kurzen Reaktionszeit komplett vom Fahrpedal. Dann kann die Reaktionszeit gemessen werden. Geht der Fahrer schon vom Fahrpedal, bevor der Hinweis angezeigt bzw. übermittelt wird, muss die Zeit berechnet werden, die zu früh reagiert wurde. Dies erfolgt über die verbleibende Strecke, bis der Hinweis

angezeigt würde und die aktuelle Geschwindigkeit. Außerdem muss man sich die Frage stellen, ob eine zu frühe Reaktion vom Fahrer gewollt ist, weil beispielsweise die Geschwindigkeit bei den Situationen bei den vorherigen Hinweisen subjektiv als zu hoch wahrgenommen wurde. Eine zu späte Reaktion kann dementsprechend auch gewollt sein, weil die Geschwindigkeit bei den Situationen bei den vorherigen Hinweisen subjektiv als zu gering wahrgenommen wurde. Außerdem kann auch eine Ablenkung zu einer zu späten Reaktion führen. Für die Fälle, in denen der Fahrer nicht nach einer kurzen Reaktionszeit auf den Hinweis reagiert, gibt es verschiedene Herangehensweisen, damit umzugehen. Für diese Fälle werden von Bohnenberger in seiner Arbeit [11] drei verschiedene Konzepte vorgeschlagen, die im folgenden näher betrachtet werden sollen.

### **Erste Variante**

Bei der ersten Variante werden die Reaktionszeiten nur innerhalb eines vorher definierten Zeitintervalls angepasst, welches die natürliche Reaktionszeit auf haptische Hinweise darstellt. Liegen Messwerte der Reaktionszeit außerhalb dieses Intervalls, werden sie komplett ignoriert und als gewollte Reaktion oder eine Ablenkung interpretiert. Der Vorteil ist, dass ein Befolgen der Fahrhinweise stets zu der vorgegebenen Kurvengeschwindigkeit oder der Einhaltung der gesetzlich vorgegebenen Geschwindigkeit führt und mögliche Störgrößen nicht in das System gelangen. Nachteilig wirkt sich die Starrheit dieser Variante aus, denn ein vorsichtiger Fahrer, der immer zu früh vom Gaspedal geht, könnte die Hinweise im Extremfall nie zu sehen bzw. zu spüren bekommen. Durch das Einführen eines weiteren Hinweises, der den Fahrer über zu frühes bzw. spätes Reagieren informiert, könnte dem Problem entgegengewirkt werden. In Abbildung 5.4 ist das Systemverhalten für diese Variante abgebildet. Der Abstand zwischen der fein und der grob gestrichelten Linie resultiert aus der erwarteten Reaktionszeit des Fahrers, nachdem der Fahrhinweis übermittelt wurde. Je länger die gemessene Reaktionszeit des Fahrers, desto früher erfolgt die Übermittlung des Fahrhinweises.

### **Zweite Variante**

Bei dieser Variante werden alle Reaktionen des Fahrers als gewolltes Fahrverhalten interpretiert. Die Hinweise werden dann so angepasst, dass in Zu-

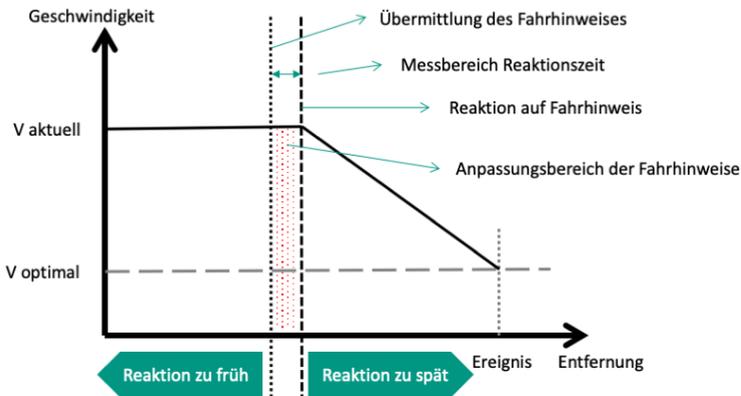


Abbildung 5.4: Anpassung Fahrhinweis - Variante 1, aus [11]

kunft das vom Fahrer gewünschte Verhalten realisiert wird. Geht der Fahrer beispielsweise zu früh vom Gas, wird davon ausgegangen, dass der Fahrer die Kurvengeschwindigkeit bei vorherigen Hinweisen als zu hoch empfunden hat und deshalb mit einer geringeren Geschwindigkeit bei der Situation ankommen möchte. Im Folgenden werden die Hinweise also früher übermittelt, damit die Kurvengeschwindigkeit dadurch sinkt. Umgekehrt wird angenommen, dass der Fahrer die Kurvengeschwindigkeit als zu niedrig empfindet, wenn er erst nach dem Hinweis vom Gas geht. Dementsprechend wird der Hinweis in der Zukunft dann später angezeigt, um die erzielte Kurvengeschwindigkeit dadurch zu erhöhen. In Abbildung 5.5 ist das Verhalten des Systems bei einer zu frühen Reaktion des Fahrers dargestellt. Die grauen Linien stehen dabei für die erwartete Reaktion des Fahrers bei geplanter Übermittlung des ersten Fahrhinweises. Nachdem der Fahrer beim ersten Fahrhinweis zu früh reagiert hat, wird der Fahrhinweis künftig zeitlich früher übermittelt, sodass der Fahrer beim Befolgen des angepassten Fahrhinweises die gewünschte niedrigere Kurvengeschwindigkeit erreicht. Bei einer zu späten Reaktion würde der Hinweis analog später kommen. Der Vorteil dieser Variante liegt darin, dass der Fahrer das System durch sein Verhalten aktiv beeinflussen kann. Der Nachteil dabei ist allerdings, dass die berechneten Geschwindigkeiten für die Situationen, die ein energieeffizientes Fahren gewährleisten, ignoriert werden.

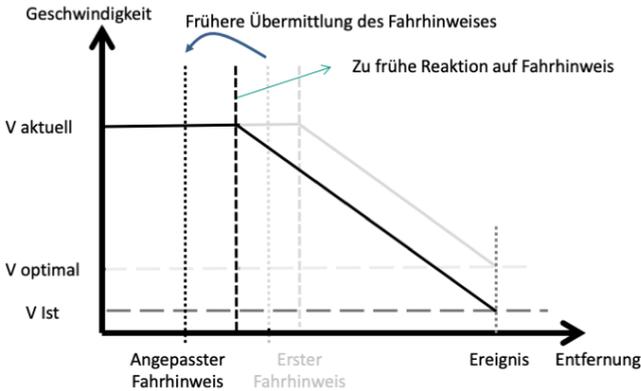


Abbildung 5.5: Anpassung Fahrhinweis - Variante 2, aus [11]

### Dritte Variante

Die dritte Variante der Anpassung basiert auf der Annahme, dass der Fahrer in den zukünftigen Situationen nach demselben Muster reagiert, wie er auf die bisherigen Hinweise reagiert hat. Das bedeutet, wenn der Fahrer bisher immer zu früh reagiert hat, wird er auch zukünftig zu früh reagieren, oder umgekehrt. Für diese Variante wird die zeitliche Differenz zwischen der Reaktion und dem Übermittlungszeitpunkt des Hinweises ermittelt. Diese Zeit wird dann in die Berechnung für den Übermittlungszeitpunkt des nächsten Hinweises aufgenommen. Abbildung 5.6 zeigt das Systemverhalten bei einer zu frühen Reaktion des Fahrers. Beim nächsten Mal wird der Hinweis dann entsprechend später angezeigt, sodass der Fahrer, wenn er wieder genauso früh reagiert, dann genau mit der berechneten Geschwindigkeit bei der Situation, in diesem Fall einer Kurve, ankommt. Reagiert der Fahrer zu spät, wird der Hinweis das nächste Mal früher übermittelt. Diese Anpassung des Übermittlungszeitpunkts wird im Laufe der Fahrt immer wieder verändert und an die durchschnittliche Reaktionszeit des Fahrers adaptiert. Somit wird der Fahrer automatisch an die optimale Geschwindigkeit für das Ereignis herangeführt, ohne sein Verhalten anpassen zu müssen. Reagiert er jedoch plötzlich anders als die Male zuvor, wird er dann nicht mit der passenden Geschwindigkeit bei der Situation ankommen.

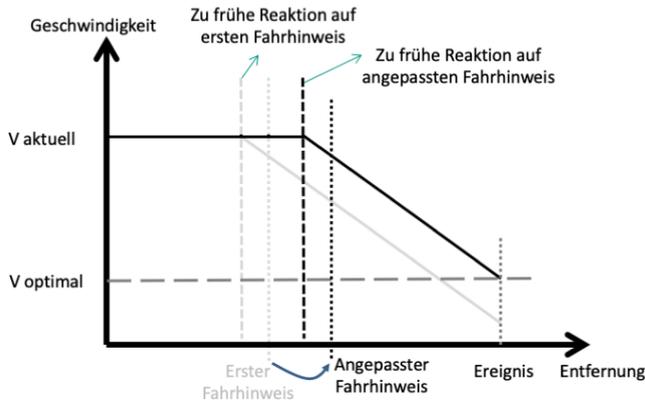


Abbildung 5.6: Anpassung Fahrhinweis - Variante 3, aus [11]

Dieses Konzept wurde als das umzusetzende Konzept ausgewählt, da die Adaption dazu dienen soll, die Fahrt des Fahrers möglichst weit in Richtung einer vorher berechneten energieoptimierten Fahrweise heranzuführen. Mit diesem Konzept kann dies gelingen, ohne dass der Fahrer bewusst sein Verhalten anpassen muss. Dabei wird der Nachteil bewusst in Kauf genommen, dass diese Anpassung nur im Mittel die richtige Anpassung sein kann. In außerordentlichen Situationen kann die Adaption daher auch einen negativen Einfluss auf die Korrektheit der Hinweise haben. Verändert sich das Reaktionsverhalten des Fahrers jedoch dauerhaft, kann dieses Verhalten angeleert werden und die Hinweise passen sich an das neue Verhalten des Fahrers an.

## 5.3 Umsetzung

Die Anpassung der Hinweise an die Reaktionszeit wurde ebenfalls in Matlab/Simulink innerhalb des Blocks für die Generierung des Fahrerhinweises implementiert. Dazu wurde ein zusätzlicher Block für die Adaption eingefügt. Grundsätzlich basiert die Anpassung auf einer Manipulation des Abstands bis zur Gaswegnahme. Zuerst wird dafür die Reaktionszeit des Fahrers auf einen Hinweis gemessen. Reagiert der Fahrer nachdem der Hinweis übermittelt wurde, ist das einfach über einen Zähler möglich. Dieser Zähler

wird in dem Moment gestartet, in dem der Hinweis übermittelt wird, und gestoppt, wenn der Gaspedalwinkel zu null wird, d.h. wenn der Fahrer das Gaspedal komplett verlassen hat. Dies wird als Reaktion auf den Hinweis gewertet. Der Zählerstand kann anschließend mit der Schrittweite der Simulation multipliziert werden, um die Reaktionszeit in Sekunden zu erhalten. „Reagiert“ der Fahrer schon bevor der Hinweis übermittelt wird, muss die Reaktionszeit geschätzt werden. Dies geschieht allerdings nur dann, wenn der Fahrer innerhalb einer bestimmten Entfernung zur Situation reagiert und vom Gas geht. Dafür wird die Reaktionszeit mit Hilfe der aktuellen Geschwindigkeit  $v$  und dem Abstand bis zum Hinweise  $s_{\text{Hinweis}}$  über den Zusammenhang

$$s_{\text{Hinweis}} = v \cdot t \Rightarrow t = \frac{s_{\text{Hinweis}}}{v}$$

abgeschätzt. Dabei wird zwar nicht die aktuelle Beschleunigung und somit die Änderung der Geschwindigkeit bis der Hinweis tatsächlich übermittelt werden würde berücksichtigt. Da diese aber im normalen Fahrbetrieb sehr klein ist, kann diese getrost vernachlässigt werden, ohne einen großen Fehler bei der Berechnung der Reaktionszeit zu machen. Reagiert der Fahrer also bevor der Hinweis gegeben wird, wird eine negative Reaktionszeit über oben genannten Zusammenhang abgeschätzt. Betätigt der Fahrer nach der Zeitmessung noch einmal das Fahrpedal wird der Zähler nicht nochmal gestartet und somit auch nicht noch einmal eine Zeit berechnet. Erst wenn die Situation passiert wurde, kann erneut eine Reaktionszeitmessung ausgelöst werden.

Alle gemessenen Reaktionszeiten werden dann in einem großen Vektor abgespeichert. Damit keine falschen Werte in diesen Vektor aufgenommen werden, sichert ein Mechanismus die Gültigkeit der Messung. Eine zu frühe Reaktion kann beispielsweise vor dem Ereignis vom Fahrer durch nochmaliges Gas geben korrigiert werden. In diesem Fall erfolgt eine zweite Messung, sobald der Fahrer nach dem Korrigieren wieder vom Gaspedal geht und das Ergebnis aus der ersten Messung wird damit überschrieben. Der Platzhalter im Vektor wird daher immer wieder mit dem aktuellen Messergebnis überschrieben, bis die Situation vorüber ist. Das Überschreiben kann hierbei durch eine weitere frühzeitige Reaktion oder durch Messwerte von Reaktionszeiten nach dem Fahrhinweis erfolgen.

Um einen repräsentativen Wert für die Reaktionszeit zu erhalten, wird für die Berechnung ein gewichteter Mittelwert verwendet. Dabei werden Re-

aktionszeiten, die zwischen 0,1 und 1,25 Sekunden liegen doppelt gewichtet, da Reaktionszeiten innerhalb dieser Zeitspanne laut Literatur für eine natürliche Reaktionszeit sprechen. Zeiten außerhalb dieser Zeitspanne können auf äußere Einflüsse wie Ablenkung oder auf ein gewolltes Verhalten des Fahrers hindeuten und sollen daher bei der Berechnung des Wertes für die Reaktionszeit, welcher nachher zu Anpassung verwendet wird, weniger stark berücksichtigt werden. Sowohl die Randwerte für die Zeitspanne, als auch die Gewichtungen sind jedoch Parameter, die jederzeit angepasst werden können, falls es neue Erkenntnisse in diesem Bereich geben sollte.

Mit Hilfe des repräsentativen Wertes für die Reaktionszeit kann dann die Manipulation des Abstandes bis zur Gaswegnahme erfolgen. Dafür muss die Reaktionszeit in eine Distanz umgerechnet werden. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten: eine Multiplikation mit der aktuellen Geschwindigkeit oder mit der Ableitung der Kurve des Abstandes bis zur Gaswegnahme. Dieser Abstand hängt zwar maßgeblich von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit ab, der Einfluss des Straßenverlaufs darf allerdings nicht komplett vernachlässigt werden. Da das Fahrzeug bei Gaswegnahme bei abfallender Straße weniger stark verzögert, als bei ebener Strecke oder gar bei einer Steigung, ergibt sich bei Berücksichtigung der Reaktionszeit in diesem Fall eine viel deutlichere benötigte Vergrößerung oder Verringerung des Abstandes bis zur Gaswegnahme, um die Reaktionszeit zu berücksichtigen. Daher wird die Kurve des Abstandes bis zur Gaswegnahme abgeleitet und diese Ableitung mit dem Wert für die Reaktionszeit multipliziert. Dieser Wert wird dann zum ursprünglichen Wert für den Abstand bis zur Gaswegnahme addiert, oder im Falle eine negativen Reaktionszeit von diesem subtrahiert, um so den neuen angepassten Wert für den Abstand bis zur Gaswegnahme zu erhalten. Innerhalb des Subsystems für die Anpassung bildet sich schließlich ein Kreislauf, der sich ständig an die Reaktionszeit des Fahrers anpasst. Da zu Beginn der Fahrt keine Messergebnisse vorliegen, wird aufgrund des Ergebnisses der Literaturrecherche mit einer Reaktionszeit von 0,5 Sekunden gerechnet. Dieser Wert erscheint plausibel für eine allgemeine Schätzung der Reaktionszeit auf den haptischen Fahrhinweis. Liegt schließlich ein gültiger Wert aus den Berechnungen vor, so wird der Initialwert ersetzt und nach jeder weiteren absolvierten Situation aktualisiert.



## 6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit präsentiert. Dabei handelt es sich um Erkenntnisse aus einer Probandenstudie, die an einem Fahr-simulator am Institut für Fahrzeugsystemtechnik durchgeführt wurde. Der Simulator wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt. Zu Beginn der Arbeit existierte nur ein mechanischer Aufbau, der um Aktor- und Sensorelemente inkl. Steuerelektronik erweitert wurde. Die Weiterentwicklung des Simulators wird zu Beginn des Kapitels erläutert, bevor dann die Probandenstudie genauer beleuchtet wird. Dabei wird auf den Versuchsaufbau mit Auswahl der Teststrecke und Probanden, sowie auf die Durchführung der Versuche eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse der Studie ausgewertet und am Ende diskutiert.

### 6.1 Simulator

Bei dem Simulator, der im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt wurde, handelt es sich um einen statischen Fahr-simulator. Das bedeutet, während des Betriebs steht der Simulator still und kann somit keine Fahrzeugbeschleunigung simulieren. Im Gegensatz dazu existieren auch dynamische Fahr-simulatoren, welche mit Hilfe von Aktoren und beweglichen Fahrzeugkabinen oder ähnlichem eine realistischere Abbildung der Fahrt inklusive Fahrzeugbeschleunigungen darstellen können. Beispiele für solche Simulatoren sind beispielsweise der Fahr-simulator von BMW in München, der Fahr-simulator von Daimler in Sindelfingen oder der Fahr-simulator der DLR in Braunschweig.

Der hier verwendete Fahr-simulator ist ein einfaches Modell, das für die im Rahmen dieser Arbeit getesteten Umfänge allerdings gut geeignet ist, da es eine zweckmäßige Fahr-situation darstellen kann. Die Einschränkungen der fehlenden Beschleunigungen im Vergleich zu komplexeren Fahr-simulatoren oder dem Realversuch wurde dabei in Kauf genommen, da im Rahmen dieser Arbeit nur die Adaption der Hinweise überprüft werden sollte und dies in diesem Simulator unter gleichbleibenden und reproduzierbaren

Bedingungen möglich war. Vor allem im Realversuch im echten Fahrzeug wären Effekte wie Ablenkung durch die Fahrsituation und andere Verkehrsteilnehmer nicht kontrollierbar gewesen und man hätte diese Effekte im Hinblick auf die Reaktionszeit nicht von der eigentlichen Reaktionszeit des Fahrers trennen können. Dies hätte eine Auswertung der Versuche deutlich erschwert.

### **6.1.1 Hardware**

Zu Beginn der Arbeit existierte ein mechanischer Grundaufbau, der aus einem Rahmen, einem Sitz, einem Kombiinstrument, einem Lenkrad und einer Schaltkonsole bestand. Dieser wurde zuerst um einen Monitor zur Darstellung der Simulationsumgebung erweitert. Um eine kostengünstige Lösung zu realisieren, entschied man sich für die Hardware G27 des Herstellers Logitech. Diese Hardware wird normalerweise für Rennspiele am PC benutzt und ist kostengünstig am Markt verfügbar. Für die Anbindung an das schon vorhandene Lenkrad wurde eine Kardanwelle verwendet, die in ihrer Länge verschiebbar ist. Dies ermöglicht eine Tiefenverstellung des Lenkrads, um es an unterschiedliche Fahrer adaptieren zu können. Der Aufbau nach der Integration der Kardanwelle ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

Auch das Bremspedal der Logitech Hardware wurde in den Aufbau des Simulators integriert. Die Integration des Kupplungspedals wurde ebenfalls vorgesehen, jedoch für die Umsetzung der Probandenstudie nicht umgesetzt, da es sich beim Fahrzeug in der Studie um eine batterieelektrisches Fahrzeug ohne schaltbares Getriebe handelt und somit kein Kupplungspedal benötigt wurde.

Um auch die haptische Übermittlung des Ausrollhinweises realisieren zu können, beschäftigte sich Wisam Naamnih in seiner Bachelorarbeit [75] mit der Integration eines aktiven Fahrpedals in den Simulatorenaufbau. Dabei handelt es sich um das Accelerator Force Feedback Pedal (AFFP) der Continental AG (siehe Abbildung 6.2) [18]. Aktive Fahrpedale bieten die Möglichkeit die Fahrpedalkennlinie aktiv zu verändern. Dies kann sowohl durch eine positive (additive Krafterhöhung) als auch eine negative (additive Kraftverminderung) Gegenkraft realisiert werden. Diese Gegenkraft wird durch Elektromotoren im Fahrpedal realisiert. Die Gegenkraft kann jedoch jederzeit durch zusätzlichen Kraftaufwand des Fahrers übersteuert werden, sodass dieser ständig die volle Kontrolle über das Fahrzeug behält. Durch kurzzeitige Krafterhöhungen im Fahrpedal kann ein Vibrieren oder auch ein



Abbildung 6.1: Foto des Grundaufbaus des Simulators

„Anklopfen“ des Fahrpedals am Fuß des Fahrers umgesetzt werden. Ein solches zweimaliges „Anklopfen“ wurde in dieser Arbeit realisiert, um dem Fahrer den Ausrollhinweis zu signalisieren.

Für die Verbindung von Sensoren und Aktoren mit dem Simulationsrechner wurde in der Masterarbeit von Robin Loeb1 [65] ein Ansatz unter Verwendung der Arduino Plattform untersucht. Bei der Arduino Plattform handelt es sich um eine Kombination aus Hardware und Software, wobei die Hardware aus einem Mikrocontroller und analogen und digitalen Ein- und Ausgängen besteht. Programmiert wird die Plattform über C und C++. Die Verwendung eines Mikrocontrollers stellte sich als ungeeignet heraus, da dieser alle Eingaben nur sequentiell verarbeiten kann und damit sehr schnell an die Grenzen seiner Rechenkapazität stößt. Darum wurde entschieden auf



Abbildung 6.2: Accelerator Force Feedback Pedal (AFFP) der Continental AG aus [18]

eine Lösung mit einem FPGA zu setzen. Die Abkürzung FPGA steht für „Field Programmable Gate Array“ und es handelt sich dabei um einen integrierten Schaltkreis, dessen Logikschaltung beliebig programmiert werden kann. Die Vorteile von FPGAs sind eine echte parallele Verarbeitung mehrerer Ein- und Ausgangssignale und damit verbunden eine deutlich geringere Reaktionszeit bei Ein- und Ausgaben und somit eine höhere Rechenleistung als Mikrocontroller bzw. Digitalsignalprozessoren. Für die Umsetzung wurde das Z-Turn Board der Firma MYIR Tech Limited eingesetzt. Es basiert auf der Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC Produktfamilie. Diese integriert die Flexibilität eines FPGAs mit der Leistungsfähigkeit einer Dual-Core ARM-CPU auf einem einzelnen Chip [111]. Außerdem verfügt dieses Board über eine Vielzahl von Ein- und Ausgängen, inklusive eines A/D-Wandlers und einem CAN-Controller, welche für die Anbindung von Lenkrad und Pedalerie benötigt wurden. Weiterhin besitzt das Board eine USB-Schnittstelle, die zur Verbindung mit dem Simulationsrechner genutzt wurde. Abbildung 6.3 zeigt das Board mit seinen verschiedenen Komponenten.

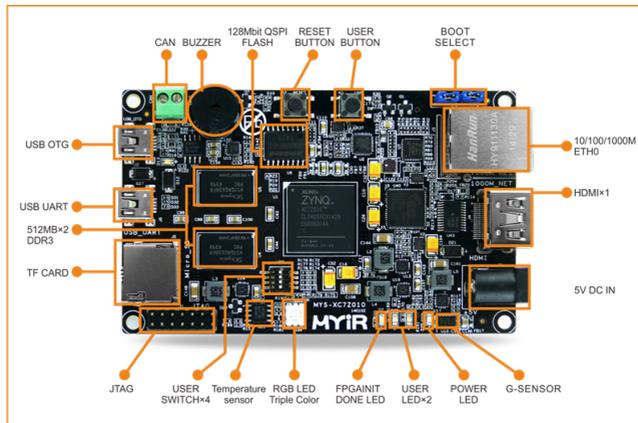


Abbildung 6.3: Z-Turn Board mit den verschiedenen Komponenten, aus [64]

## 6.1.2 Software

Die Software des Prüfstandes lässt sich grob in zwei Teile aufgliedern. Zum einen die Software auf dem Z-Turn-Board und zum anderen die Software auf dem Simulationsrechner.

Die Software auf dem Z-Turn Board dient der Erfassung der Sensordaten von Pedalerie und Lenkrad und der Ansteuerung des aktiven Gaspedals und der Elektromotoren in der Hardware des Lenkrads, die ein Rückstellmoment generieren und somit ein realistisches Fahrgefühl realisieren. Die Programmierung des Boards erfolgt durch Verilog für den Hardwareteil (FPGA) und durch C++ für die Software, die auf dem Prozessor zur Ausführung kommt. Mit Verilog werden die Ein- und Ausgangspins auf dem Board definiert und die Verbindungen zwischen den verschiedenen Komponenten wie A/D-Wandler und UART-Schnittstelle (USB-Verbindung) hergestellt. Außerdem wird die Ansteuerung der Motoren für das Feedback und die Kalibrierung des Lenkrades in Hardware umgesetzt. Der Softwareteil dient hauptsächlich der Steuerung der CAN-Kommunikation mit dem aktiven Fahrpedal.

Die Software auf dem Simulationsrechner dient zum einen der Integration der Hinweise in CarMaker und zum anderen der Kommunikation mit dem Z-Turn-Board. Die Integration erfolgt als kompiliertes Plugin-Modell über Simulink in CarMaker. Dadurch wird das Modell direkt in die Ausführungsdatei von CarMaker integriert und innerhalb von CarMaker simuliert.

In diesem Modell ist ebenfalls der Block zum Auslesen der Routendaten integriert.

Die Kommunikation mit dem Z-Turn-Board wurde mit Hilfe von serieller Kommunikation realisiert. Dabei existiert in Simulink ein spezieller Block, mit dem man die serielle Kommunikation steuern und die Daten zum Empfangen und Versenden definieren kann. Da sich dieser Block allerdings nicht in C-Code kompilieren lässt, wird die Simulation am Simulator mit „CarMaker for Simulink“ als Co-Simulation von CarMaker und Simulink durchgeführt, wobei nur der Kommunikationsteil in Simulink simuliert wird. Die Co-Simulation mit Simulink ist zwar erheblich langsamer als die reine Simulation mit CarMaker, jedoch konnte durch die Aufteilung der Modelle in Kommunikationsmodell und Hinweismodell eine Co-Simulation in Echtzeit erfolgen, was für den Anwendungsfall im Simulator vollkommen ausreichend ist.

## **6.2 Probandenstudie**

Mit dem im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Simulator wurde eine Probandenstudie durchgeführt, welche das Ziel hatte, die Wirksamkeit der Adaption der Hinweise an die Reaktionszeit zu überprüfen.

### **6.2.1 Planung und Aufbau der Studie inklusive Fragebogen**

Die Probandenstudie wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Martin Dembinsky [20] durchgeführt. Er war auch überwiegend für die Planung und die Akquirierung der Testpersonen verantwortlich. Die Erarbeitung des Testplans und die Definition der eigentlichen Experimente erfolgte in enger Abstimmung mit dem Autor dieser Arbeit, um sicherzugehen, dass die richtigen Daten für eine anschließende Erzeugung aussagekräftiger Ergebnisse im Hinblick auf Forschungshypothese und Forschungsfrage dieser Arbeit erhoben werden.

Der Ablauf der Probandenstudie ist der folgende: Nach dem Ankommen füllen die Probanden einen Fragebogen zu persönlichen Daten und ihren Erfahrungen bezüglich Fahrpraxis und Fahrerassistenzsystemen aus. Dabei werden neben persönlichen Daten wie Geschlecht, Geburtsjahr und Beruf/-Studiengang auch Informationen zur aktuell vorhandenen Fahrpraxis und

jährlichen Fahrleistung abgefragt. Außerdem sollen die Probanden eine Einschätzung ihres persönlichen Fahrstils abgeben. Dabei hatten sie folgende Optionen:

- komfortabel
- normal
- sportlich
- kann ich nicht beurteilen

Zusätzlich sollten sie für fünf verschiedene Fahrerassistenzsystemen (Tempomat, Adaptive Cruise Control, Porsche InnoDrive, Spurhalteassistent und Berganfahrhilfe) angeben, ob diese ihnen bekannt sind und/oder ob sie diese bereits genutzt haben.

Danach fuhren die Probanden auf einer speziellen Einfahrstrecke eine gewisse Zeit, um sich mit dem Simulator vertraut zu machen und zu spüren wie sich ein haptischer Fahrhinweis am Fahrpedal anfühlt. Danach sollten die Probanden einen weiteren Fragebogen ausfüllen, in dem sie angeben sollten, ob die haptischen Hinweise deutlich zu spüren waren und ob die Hinweise eindeutig zugeordnet werden konnten. Dabei stand eine vierstufige Skala von „Trifft zu“ bis „Trifft nicht zu“ zur Verfügung. Zusätzlich gab es noch die Option „Keine Angaben“ und ein Feld für „Weitere Bemerkungen“.

Dann folgten die eigentlichen zwei Testfahrten auf verschiedenen Teststrecken. Dabei wurde den Probanden nicht verraten, ob sie zuerst die adaptierte oder die nicht adaptierte Version der Fahrhinweise fahren, um eine Beeinflussung ausschließen zu können. In mehreren Studien wurde (beispielsweise [5] und [60]) nachgewiesen, dass ein Erwartungswert der Probanden die Ergebnisse einer Befragung signifikant beeinflussen kann. Daher wurde versucht durch einen sogenannten Blindtest, im Gegensatz zu einem offenen Test, diese Art von Beeinflussung zu vermeiden. Nach jeder Testfahrt wurde der gleiche Fragebogen ausgefüllt, um die subjektiven Eindrücke der Testpersonen festzuhalten. Dieser Fragebogen bestand aus insgesamt fünf Fragen. Bei der ersten Frage sollten die Testpersonen die Geschwindigkeit bei den Situationen auf einer fünfstufigen Skala von „Zu langsam“ bis „Zu schnell“ bewerten. Die zweite Frage bestand genau genommen aus neun Teilfragen. Dabei sollte das System mit dem System von Van der Laan [103] bewertet werden. Dabei werden neun Wortpaare mit einer fünfstufigen Skala

zwischen den Wortpaaren vorgegeben. Die Probanden sollten dann passend ein Kreuz an eine der Stellen zwischen den Wortpaaren setzen. Die Wortpaare lauten:

- Nützlich - Nutzlos
- Angenehm - Unangenehm
- Schlecht - Gut
- Nett - Nervig
- Effizient - Unnötig
- Ärgerlich - Erfreulich
- Hilfreich - Wertlos
- Nicht wünschenswert - Wünschenswert
- Aktivierend - Einschläfernd

Bei der dritten Frage wurde die Anzahl der vom System übermittelten Hinweise von den Testpersonen abgefragt, um analysieren zu können, ob die Probanden alle Hinweise auch wahrgenommen haben.

Danach sollten der Zeitpunkt der Hinweise auf einer fünfstufigen Skala von „zu früh“ bis „zu spät“ beurteilt werden, bevor die fünfte Frage den Probanden die Möglichkeit gab, eigene Anmerkungen zu geben.

In einem letzten Fragebogen ganz am Ende des Tests sollten die Probanden nochmal ein Gesamturteil abgeben. Dabei wurde als erstes gefragt, bei welcher Testfahrt (erste oder zweite) die Hinweise als hilfreicher empfunden wurden. Es gab zusätzlich die Option anzugeben, dass man keinen Unterschied feststellen konnte. Danach sollten drei Aussagen auf einer vierstufigen Skala von „Trifft zu“ bis „Trifft nicht zu“ beurteilt werden. Diese waren:

- Der Simulator hat ein realistisches Fahrerlebnis vermittelt
- Die Strecke war zu anspruchsvoll.
- Ich bin so gefahren wie ich es im Alltag auch getan hätte. (realistische Fahrweise)

Abschließend hatten die Testpersonen noch einmal die Möglichkeit abschließende Kommentare, Anregungen oder Verbesserungsvorschläge niederzuschreiben.

Zusätzlich zur subjektiven Befragung der Probanden wurden relevante Systemgrößen während der Testfahrten aufgezeichnet, um im Nachgang auch eine objektive Auswertung der unterschiedlichen Ausprägungen des Systems durchführen zu können.

## Testpersonen

Für die Probandenstudie konnten insgesamt 50 Testpersonen gewonnen werden. Davon waren 44 Testpersonen männlich und nur 6 Testpersonen weiblich. Dies entspricht leider nicht der Verteilung der Allgemeinheit, jedoch ist es im Umfeld einer technischen Universität nicht immer einfach, weibliche Testpersonen für Studien zu akquirieren. Die Probanden waren im Mittel 27 Jahre alt (Standardabweichung 6,89 Jahre), hatten eine durchschnittliche Fahrpraxis von 8,1 Jahren (Standardabweichung 7,2 Jahre) mit einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von knapp 7000 Kilometern (Standardabweichung 6254 Kilometer).

Abbildung 6.4 zeigt die Selbsteinschätzung des Fahrstil der Probanden. 22 Prozent schätzten ihren Fahrstil als *komfortabel* ein. 62 Prozent beurteilten ihren Fahrstil als *normal*, während 14 Prozent ihren Fahrstil als *sportlich* deklarieren würden. Ein Proband war nicht im Besitz einer Fahrerlaubnis und hat deshalb keine Angabe gemacht (2 Prozent). Die Ergebnisse dieses Probanden wurden deshalb in der späteren Auswertung auch nicht weiter berücksichtigt, sodass die Auswertungen im Abschnitt 6.2.2 auf einem Stichprobenumfang von 49 basieren.

## Teststrecken

Als Teststrecken wurden insgesamt sechs verschiedene Strecken plus eine spezielle Strecke für die Eingewöhnungsphase verwendet. Die Strecke für die Eingewöhnungsphase war eine Rundstrecke mit verschiedenen Kurvenradien und Geschwindigkeitsbegrenzungen. Für die eigentlichen Testfahrten mit dem System wurden insgesamt sieben verschiedene Situationen definiert. Diese sieben Situationen sind in Tabelle 6.1 beschrieben.

Aus diesen sieben Situationen wurden drei verschiedene Teststrecken kombiniert (Strecken 1-3). Alle Strecken wurden auch noch einmal als ge-

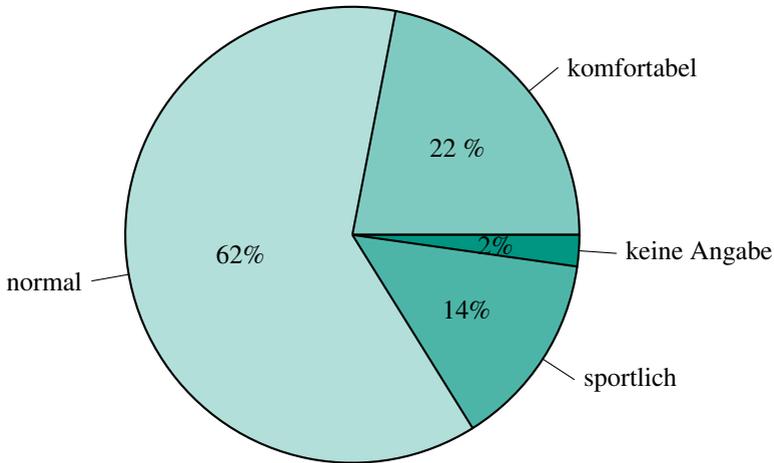


Abbildung 6.4: Selbsteinschätzung des Fahrstil der Probanden

spiegelte Versionen verwendet (Strecken 4-6). Eine Schema der Teststrecke 1 ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Strecken sind alle zwischen 4,8 und 5,6 Kilometer lang.

## 6.2.2 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Ergebnisse erfolgte eine getrennte Betrachtung der subjektiven Empfindungen der Probanden und der objektiven Kriterien. Im Folgenden werden die verwendeten Kennwerte erläutert und im Anschluss die Ergebnisse dargestellt.

### Verwendete Kennwerte oder Maßzahlen

Für die Auswertung wurden verschiedene Kennwerte zu Rate gezogen [17]. Zuerst wurden die Antworten der Probanden ausgezählt und somit die absoluten Häufigkeiten der Antworten registriert. Daraus kann man dann einfach mit der Formel

$$h_j = \frac{f_j}{n}$$

Situation	Art	Parameter
1	Kurve	$r = \text{const}$ $r_0 = 80 \text{ m}$ 30° Kurve
2	Begrenzung	$v_{\text{Grenz}} = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$
3	Kurve Bergauf	$r_1 > r_2$ $r_1 = 100 \text{ m}$ $r_2 = 50 \text{ m}$ 40° Kurve
4	Begrenzung	$v_{\text{Grenz}} = 70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$
5' (Strecke 1,4)	Kurve	$r_1 < r_2$ $r_1 = 75 \text{ m}$ $r_2 = 300 \text{ m}$ 40° Kurve
5'' (Strecke 2,3,5,6)	Kurve	$r_1 < r_2$ $r_1 = 50 \text{ m}$ $r_2 = 300 \text{ m}$ 40° Kurve
6	Kurve Bergab	$r = \text{const}$ $r_0 = 100 \text{ m}$ 40° Kurve
7	Begrenzung	$v_{\text{Grenz}} = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Tabelle 6.1: Definierte Situationen für die Teststrecken

die *relative Häufigkeit*  $h_j$  des Ereignisses  $j$  berechnen, wobei  $f_j$  die absolute Häufigkeit der Merkmalsausprägung  $x_j$  und  $n$  Menge der Elemente in der zugrundeliegenden Menge bezeichnen.

Die nächste verwendete Maßzahl ist das *arithmetische Mittel*. Zur Berechnung werden alle Merkmalsausprägungen  $x_j$  aufsummiert. Anschließend wird durch die Gesamtanzahl  $n$  geteilt.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$



zuerst überprüft, welche Variante für die vorliegenden Ergebnisse in Frage kommt. Dabei stellte sich heraus, dass hierfür der sogenannte *Zweistichproben t-Test* benötigt wird. Davon gibt es wiederum mehrere Varianten. Für die Arbeit sind zwei relevant, nämlich der *gepaarte Stichprobentest* und der sogenannte *Welch-Test*. Diese wurden hier verwendet.

Beim zweiseitigen Einstichproben t-Test wird die Hypothese  $H_0 : \mu = \mu_0$  anhand der Stichprobe gegen die Gegenhypothese  $H_1 : \mu \neq \mu_0$  getestet. Zuerst wird ein Signifikanzniveau  $\alpha$  festgelegt. In unserem Fall mit einem Stichprobenumfang von  $n = 50$  wurde  $\alpha = 5\% = 0,05$  gewählt. Ein Ablehnungsbereich mit Signifikanzniveau  $\alpha$  ist die Menge

$$C = (-\infty, T_{\alpha/2|n-1}] \cup [t_{1-\alpha/2|n-1}, \infty)$$

Die Hypothese  $H_0$  wird abgelehnt wenn

$$|T| = \frac{|\bar{X} - \mu_0|}{S/\sqrt{n}} > t_{1-\alpha/2|n-1}$$

Dabei können die Werte für  $t_{1-\alpha/2|n-1}$  aus entsprechenden Tabellen abgelesen werden.

Beim *gepaarten Stichprobentest* wird vorher noch aus den beiden Stichproben die Differenz gebildet und dann an dieser Differenz der einstichproben t-Test durchgeführt, wobei  $\mu_0 = 0$  gesetzt wird. Damit wird überprüft, ob sich die beiden Stichproben signifikant unterscheiden.

Der *Welch-Test* wird auch t-Test für unabhängige Stichproben mit unterschiedlichen Varianzen genannt. Dafür wird zuerst aus jedem Datensatz einzeln ein Mittelwert und die entsprechende Standardabweichung ermittelt. Aus der Differenz dieser beiden Mittelwerte wird dann der neue zu prüfende Mittelwert ( $\bar{X}$ ) ermittelt. Dann wird der Standardfehler  $S$  wie folgt berechnet

$$S = \sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}$$

Der neue Prüfwert  $T$  berechnet sich dann aus:

$$T = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S}$$

Hier wird  $\mu_0$  auf Null gesetzt, wenn der Unterschied zweier Stichproben nachgewiesen werden soll. Die Ablehnung oder Annahme der Hypothesen ist äquivalent zum zweiseitigen Einstichproben t-Test. Für die Identifikation des korrekten Schwellenwertes muss nun die angepasste Anzahl von Freiheitsgraden  $\nu$  wie folgt berechnet werden:

$$\nu = \frac{\left(\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}\right)^2}{\frac{1}{n-1} \left(\frac{s_x^2}{n}\right)^2 + \frac{1}{m-1} \left(\frac{s_y^2}{m}\right)^2}$$

Mit diesem  $\nu$  können dann wieder die entsprechenden Schwellenwerte für die Annahme oder die Ablehnung der Hypothese aus Tabellen abgelesen werden. Eine detailliertere Beschreibung der Auswertungsmethodiken findet sich in [30].

### Subjektive Ergebnisse

Zuerst wird die Nachbefragung der Eingewöhnungsphase analysiert. In den Abbildungen stellen die grünen Balken die relativen Häufigkeiten der einzelnen Stufen der Skala an. Der blaue Punkt markiert den Mittelwert mit der Standardabweichung rechts und links davon. Das rote Dreieck kennzeichnet den Median. Abbildung 6.6 zeigt, dass die Probanden die Hinweise durchgehend als deutlich spürbar wahrgenommen haben und Abbildung 6.7 zeigt, dass die Testpersonen die Hinweise durchgehend als eindeutig empfunden haben.

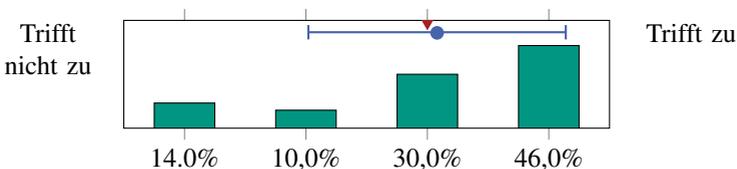


Abbildung 6.6: Auswertung zur Aussage: „Die haptischen Hinweise waren deutlich zu spüren“

Nun folgt die Analyse der eigentlichen Testfahrten der Probanden. Für die Erfassung der Akzeptanz des getesteten Systems durch die Probanden wurde die Akzeptanzskala von Van der Laan [103] verwendet. Dazu haben die Testpersonen, wie bereits im Abschnitt 6.2.1 erwähnt, ihre Bewertung an-

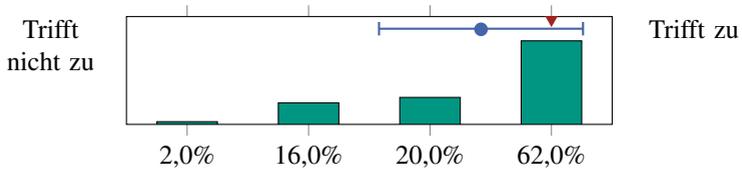


Abbildung 6.7: Auswertung zur Aussage: „Die haptischen Hinweise waren eindeutig“

hand von neun Wortpaaren und einer fünfstufigen Skala zwischen diesen durchgeführt. Diese werden im Anschluss, wie in [103] beschrieben verrechnet und damit jeweils ein Wert für die Nützlichkeit des Systems und die Zufriedenheit der Probanden mit dem System berechnet. Die Auswertung für die vorliegende Studie ist in Abbildung 6.8 zu sehen. Man kann erkennen, dass die Nützlichkeit des Systems in beiden Fällen etwa gleich bewertet wurde. Im Mittel wurde das adaptive System minimal besser bewertet, jedoch ist dies kein signifikanter Unterschied. Bei der Zufriedenheit ist das nicht adaptive System von den Probanden jedoch signifikant (nach t-Test) besser bewertet worden als das adaptive System.

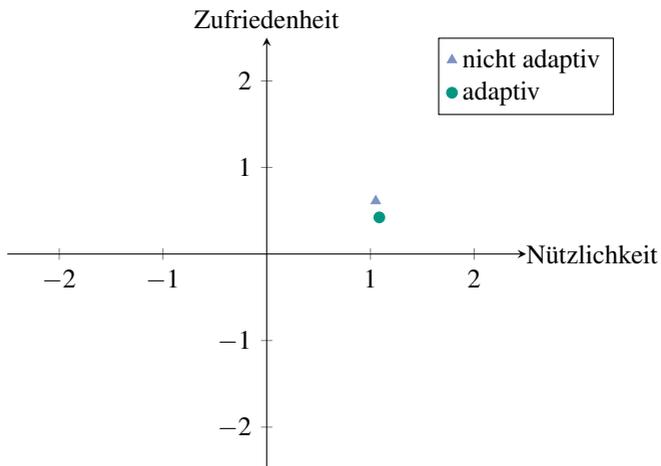


Abbildung 6.8: Akzeptanz der Probanden für die beiden Ausprägungen des Systems nach Van der Laan [103])

In Anschluss an die Testfahrten sollten die Probanden ihre Einschätzung abgeben, ob die Geschwindigkeit bei den Ereignissen oder Situationen, die aus dem Befolgen der Hinweise des Systems resultierten, zu niedrig oder zu hoch ausgefallen ist. Das Ergebnis für die beiden Systeme ist in Abbildung 6.9 dargestellt, wobei beide Systeme im Mittel eine für die Probanden zu geringe Geschwindigkeit zur Folge hatten. Diese Negativtendenz war allerdings beim nicht adaptiven System verschwindend gering (arithmetisches Mittel  $-0,08$ ) und so kann man im Fall des nicht adaptiven Systems von einer für die Benutzer passenden Geschwindigkeit sprechen. Der Median spricht in beiden Fällen (Median = 0) für eine gute Übereinstimmung der Erwartung der Benutzer und der Realisierung des Systems im Bezug auf die realisierte Geschwindigkeit bei den Situationen, auch wenn sich laut t-Test ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Systemen einstellt.

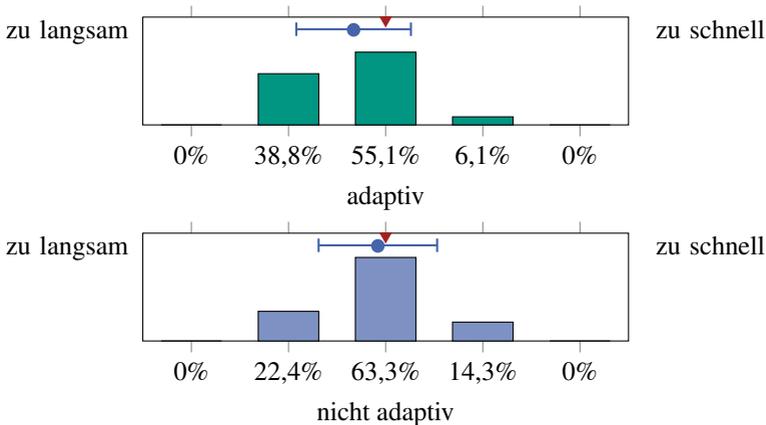


Abbildung 6.9: Subjektives Empfinden der Geschwindigkeiten bei den Situationen (adaptives System in grün oben und nicht adaptives System in blau unten)

Im Hinblick auf den Übermittlungszeitpunkt des Hinweises ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Geschwindigkeit. Der Median (in beiden Fällen gleich 0) spricht für einen Übermittlungszeitpunkt, der mit den Erwartungen der Probanden übereinstimmt. Beim adaptiven System ergibt sich eine leichte Tendenz für eine zu frühe Übermittlung des Hinweises (arithmetisches Mittel  $-0,22$ ) während die Tendenz beim nicht adaptiven System eher zu „zu spät“ geht (arithmetisches Mittel  $0,24$ ). Auch die Standardabweichung

ist in beiden Fällen nicht sehr hoch, was für einen gut passenden Zeitpunkt über die komplette Probandengruppe hinweg spricht. Der Unterschied in der Wahrnehmung wurde anhand des t-Tests jedoch als signifikanter Unterschied klassifiziert.

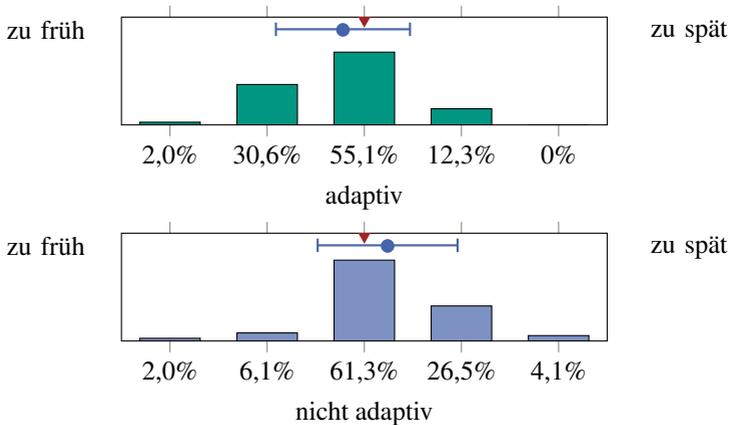


Abbildung 6.10: Subjektives Empfinden des Zeitpunktes der Hinweise (adaptives System in grün oben und nicht adaptives System in blau unten)

Im abschließenden Fragebogen sollten die Testpersonen bewerten, in welcher Testfahrt das System als hilfreicher empfunden wurde. Dies geschah ohne Kenntnis, welche Ausprägung des Systems in welcher Testfahrt vorlag. Abbildung 6.11 stellt die Ergebnisse dieser Frage dar. 40 Prozent der Probanden konnten keinen Unterschied zwischen den beiden Systemen feststellen. 31 Prozent empfanden das nicht adaptive System als hilfreicher, während 29 Prozent das adaptive System als hilfreicher erachteten. Insgesamt kann also kein System als hilfreicher betrachtet werden. Man könnte auch sagen, die Testpersonen konnten subjektiv keinen Unterschied zwischen den Systemen bezogen auf den Nutzen bzw. die Unterstützung durch das System feststellen. Auch der t-Test lieferte das Ergebnis, das kein signifikanter Unterschied zwischen den Systemen beim direkten Vergleich zu erkennen ist.

Um ein Bild von den Probanden zu erhalten, für wie realistisch sie die Studie im Simulator erachteten und in wie weit sich die Ergebnisse auf die Realität übertragen lassen, wurden den Probanden drei weitere Aussagen

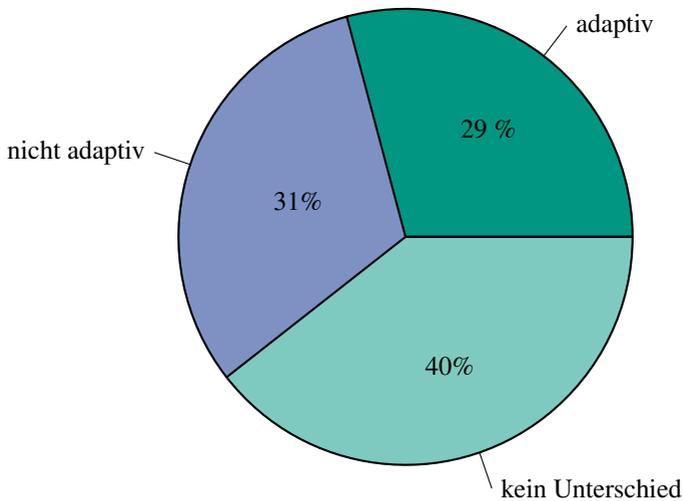


Abbildung 6.11: Subjektive Einschätzung der Probanden, welches System als hilfreicher empfunden wurde

vorgelegt, die sie auf einer vierstufigen Skala von „Trifft zu“ bis „Trifft nicht zu“ beurteilen sollten.

Die erste Aussage war: „Der Simulator hat ein realistisches Fahrerlebnis vermittelt.“ Fast die Hälfte der Probanden (48,9 Prozent) hat bei dieser Frage die zweite Option angekreuzt, die eine Tendenz zu „Trifft nicht zu“ darstellt. Im Mittel (arithmetisches Mittel 2,21, neutral wäre 2,5) bleibt diese Tendenz so stehen. Auch der Median (=2) spricht für diese Tendenz. Als Gründe für diese Tendenz gaben die Probanden in den Freitextantworten beispielsweise die unrealistische Lenkung am Simulator, die Darstellung am Bildschirm und fehlende Fahrgeräusche an.

Die zweite zu bewertende Aussage war: „Die Strecke war zu anspruchsvoll.“ Hier antworteten über drei Viertel der Testpersonen mit „Trifft nicht zu“. Auch der Mittelwert von 1,36 und der Median von 1 unterstreichen dieses Ergebnis, das dafür spricht, dass alle Probanden die Teststrecke als einfach empfanden. Die Eingewöhnungsphase trug sicherlich dazu bei, da sich die Probanden im Voraus schon mit dem Simulator vertraut machen konnten.

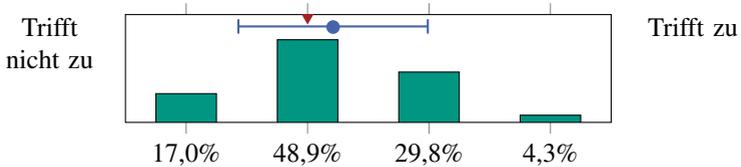


Abbildung 6.12: Auswertung zur Aussage: „Der Simulator hat ein realistisches Fahrerlebnis vermittelt.“

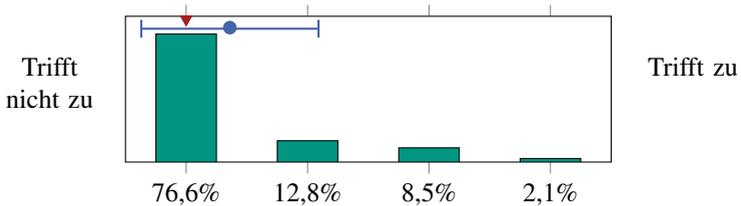


Abbildung 6.13: Auswertung zur Aussage: „Die Strecke war zu anspruchsvoll“

Die dritte Aussage, die die Probanden zu bewerten hatten, war: „Ich bin so gefahren wie ich es im Alltag auch getan hätte. (realistische Fahrweise)“. 19,6 Prozent beantworteten die Frage mit „Trifft zu“ und 41,3 Prozent der Probanden mit einer Tendenz zu „Trifft zu“. Über 60 Prozent haben also eine realitätsnahe oder zumindest eine stark damit verwandte Fahrweise im Fahrsimulator realisieren können, was auf eine gute Übertragbarkeit der Studie auf die Realität schließen lässt. Auch der Mittelwert von 2,85 und der Median von 3 unterstützen diese Aussage.

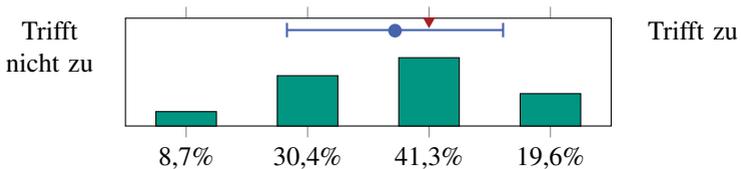


Abbildung 6.14: Auswertung zur Aussage: „Ich bin so gefahren wie ich es im Alltag auch getan hätte. (realistische Fahrweise)“

## Objektive Ergebnisse

Für die objektiven Ergebnisse wurden während der Testfahrten wichtige Messgrößen aufgezeichnet und im Nachhinein ausgewertet. Die wichtigsten Messgrößen waren dabei der Abstand bis zur Situation, der Abstand bis zur Gaswegnahme, Fahrzeuggeschwindigkeit, Bremspedalwinkel und Fahrpedalwinkel, der Hinweis, den Fuß vom Gas zu nehmen und weitere Größen, an denen man verschiedene Ereignisse ableiten konnte.

Als wichtigster Kennwert wurde hierbei die Geschwindigkeitsdifferenz definiert, die sich am Beginn einer Situation zwischen der optimalen, vom System berechneten, und der tatsächlich vom Fahrer erreichten Fahrzeuggeschwindigkeit eingestellt hat. Diese Differenz wurde in Prozent von der Sollgeschwindigkeit der Situation berechnet, um alle Situationen und die entsprechenden Differenzen untereinander vergleichbar zu machen. Das Ergebnis der Testfahrten ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Man kann erkennen, dass die Geschwindigkeitsdifferenz durch die Verwendung des adaptiven Systems im Mittel über alle Situationen um mehr als die Hälfte (von 24,2% auf 12,0%) verringert werden konnte. Betrachtet man nur die Kurvensituationen konnte ebenfalls eine Verringerung der Differenz von 30,5 Prozent auf 15,2 Prozent erreicht werden. Bei Geschwindigkeitsbegrenzungen konnte die Differenz durch das adaptive System von 15,9 Prozent auf 8,3 Prozent reduziert werden. Bei allen Verbesserungen handelt es sich laut t-Test um signifikante, bzw. sogar hoch signifikante Verbesserungen.

Neben dem Durchschnittswert der Abweichung wurde auch deren Entwicklung über die Situationen hinweg betrachtet, um zu analysieren, ob sich die Adaption über die Zeit anpasst. Abbildung 6.16 zeigt die Verläufe der Geschwindigkeitsdifferenz über die sieben Situationen der Teststrecken. Dabei sind jeweils die Teststrecken eins und vier, zwei und fünf und drei und sechs zusammengefasst, da es sich dabei ja um die gleichen Strecken handelt, die nur gespiegelt sind. Auf der linken Seite ist jeweils der Verlauf für das nicht adaptive System dargestellt und rechts der Verlauf für das adaptive System. In grün sind die Mittelwerte der Geschwindigkeitsdifferenzen in Prozent für die jeweilige Situation über der Situation aufgetragen. Die rot gestrichelte Linie stellt eine lineare Ausgleichsgerade der Mittelwerte dar. Damit soll der Trend der Verläufe besser visualisiert werden. Es lässt sich deutlich erkennen, dass es beim nicht adaptiven System keinen Trend gibt und die Abweichungen über die Situationen hinweg ungefähr konstant bleiben. Beim adaptiven System hingegen ist eindeutig ein Trend zu kleineren

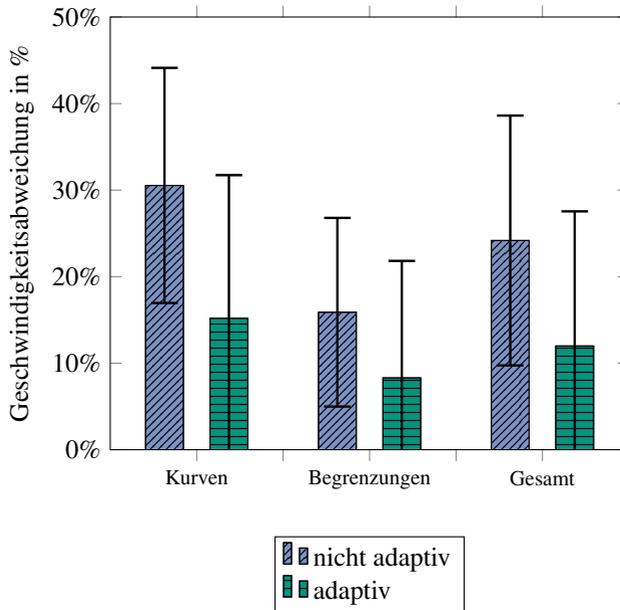


Abbildung 6.15: Auswertung der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen berechneter Sollgeschwindigkeit und tatsächlicher Geschwindigkeit bei den Situationen

Abweichungen hin zu erkennen. Während beide Systeme bei alle Strecken auf einem ähnlichen Abweichungsniveau beginnen, passt sich das adaptive System wie gewünscht schon nach wenigen Situationen an die Reaktionszeit des Fahrers an und ist dadurch in der Lage, die realisierten Abweichungen schon nach wenigen absolvierten Situationen stark zu verringern. Es ist allerdings zu erwarten, das entweder eine Sättigung eintritt, nämlich dann, wenn das System das Verhalten des Fahrers, welcher dieses dann aber konstant beibehalten muss, perfekt angelernt hat. Die andere Möglichkeit ist jedoch auch, dass plötzlich wieder ein sprunghafter Anstieg der Abweichung auftreten kann, wenn der Fahrer aus irgendeinem Grund entweder einmalig anders reagiert (Ablenkung, etc.) oder dauerhaft sein Verhalten ändert.

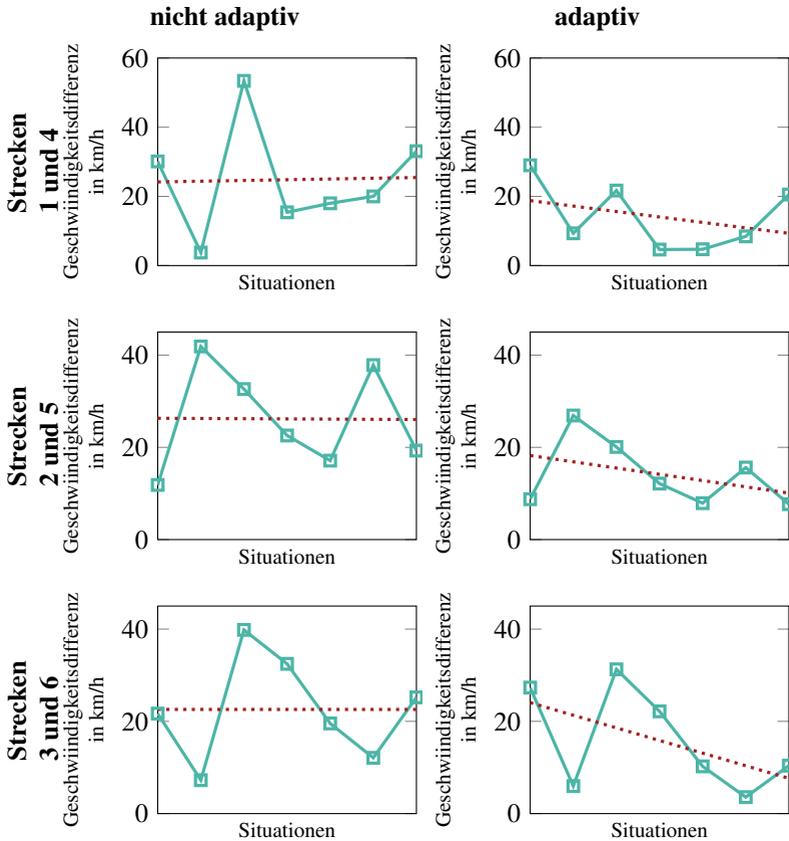


Abbildung 6.16: Verläufe der Geschwindigkeitsabweichungen über die Situationen für die Teststrecken für das nicht adaptive und das adaptive System

### 6.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich bei den Ergebnissen ein zweigeteiltes Bild. Während es bei den subjektiven Kennwerten, insbesondere beim direkten Vergleich der Systeme, keinen signifikanten Unterschied zu beobachten gab, sprechen die objektiven Kennwerte eine deutlich andere Sprache. Hier konnten durch die Adaption bei der Geschwindigkeitsabweichung hoch signifikan-

te Verbesserungen erzielt werden. Man kann die Forschungshypothese dieser Arbeit mit Einschränkung bestätigen, die da lautete: „Durch Kenntnis der durchschnittlichen Reaktionszeit des Fahrer auf vorausgegangene Fahrhinweise lassen sich zukünftige Hinweise an diese Reaktionszeit anpassen, indem der Anzeigzeitpunkt passend verschoben wird. Durch diese Anpassung der Fahrhinweise können sowohl objektive als auch subjektive Kriterien bzgl. der Korrektheit der Hinweise verbessert werden.“ Die Verbesserung der objektiven Kriterien konnte durch die Studie bestätigt werden. In der Auswertung konnte allerdings kein signifikanter Unterschied zwischen dem Basissystem und dem adaptiven System im Hinblick auf die subjektiven Kriterien beobachtet werden. Dies kann vielfältige Gründe haben. Die ergänzende Forschungsfrage „Verbessert sich durch die Anpassung der Hinweise im Verlauf einer Fahrt an die gerade vorliegende tatsächliche Reaktionszeit des Fahrers deren objektiv messbare Wirkung?“ kann jedoch eindeutig mit „JA“ beantwortet werden. In Abbildung 6.16 ist eindeutig zu sehen, dass sich die Geschwindigkeitsabweichung von der Zielgeschwindigkeit mit der Anzahl der absolvierten Situationen tendenziell verringert, was für eine deutliche Anpassung der Hinweise spricht.

Bei der Auswertung über die Skala von Van der Laan wurde das adaptive System bei der Zufriedenheit zwar minimal schlechter bewertet als das nicht adaptive System, während beide Systeme beim Nutzen gleich bewertet wurden. Dies kann jedoch stark mit der alltäglichen Fahrweise der Probanden zusammenhängen. 14 Prozent der Probanden schätzten ihren Fahrstil als *sportlich* und 62 Prozent schätzten ihren Fahrstil als *normal* ein. In den meisten Fällen wird die Zielgeschwindigkeit bei Geschwindigkeitsbegrenzungen nicht am Schild und bei Kurven nicht direkt beim Beginn der Kurve erreicht, sondern erst einige Meter hinter dem Schild oder am engsten Punkt der Kurve. Das System ist allerdings so konfiguriert, dass beim perfekten Reagieren auf den Hinweis die berechnete Zielgeschwindigkeit genau bei der Situation realisiert wird. Mehrfach machten Probanden die Aussage, dass sie die Geschwindigkeit bei den Situation als zu niedrig erachteten, bzw. die Hinweise zu früh kamen. Dies betraf besonders oft das adaptive System. Es wurde außerdem angemerkt, dass sehr wohl realisiert wurde, dass die Geschwindigkeiten beim adaptiven System besser zur Zielgeschwindigkeit gepasst hätten, eine 5-10  $\frac{km}{h}$  höhere Geschwindigkeit bei den Situationen allerdings präferiert würde und deshalb dem nicht adaptiven System der Vorzug gegeben wurde. Dies kann wiederum mehrere Gründe haben. Einerseits wurden die Hinweise in dieser Studie nur an die Reak-

tionszeit und nicht an den Fahrstil, die für den Fahrer passende Querbeschleunigung oder andere charakteristischen Eigenschaften des Fahrer angepasst. Dies könnte die Hinweise weiter verbessern. Darauf wird auch im Ausblick noch genauer eingegangen. Andererseits handelt es sich bei dem Simulator um einen statischen Simulator, der dem Fahrer kein Feedback über Beschleunigungen gibt. Somit wäre eine Anpassung diesbezüglich im vorgegeben Setup auch nicht zielführend gewesen. Die durch das System berechneten Geschwindigkeiten für die Kurven entsprechen Querbeschleunigungen von 2 bis  $2,2 \frac{m}{s^2}$ , was durchaus gängigen Querbeschleunigungen im Realfahrbetrieb entspricht. Da die Probanden nur die optische Rückmeldung hatten, konnten sie die Geschwindigkeit und die dazugehörige Querbeschleunigung schlecht einschätzen, was das Gefühl einer zu geringen Geschwindigkeit in Kurven erklären könnte. Insgesamt kann man diese Bewertung des adaptiven Systems durch die Probanden doch als positiv sehen, da es durch die Adaption zu keiner Verschlechterung bei der Wahrnehmbarkeit, der Zuordenbarkeit oder der Wahrnehmung des Anzeigezeitpunktes kam. Die Gefahr bei adaptiven Systemen besteht immer, dass durch die Adaption ein unberechenbares Verhalten des Systems induziert wird, was hier allerdings nicht der Fall war. Das Ergebnis der Adaption ist somit eine signifikante Verbesserung bei den objektiven Kriterien ohne die subjektive Wahrnehmung negativ zu beeinflussen, was als sehr positiv bewertet werden kann.

Auch die Lenkung im Simulator stieß auf Kritik bei den Probanden. Viele bemängelten die Präzision der Lenkung und den fehlenden Realismus. Einige Probanden merkten an, durch die Lenkung deutlich von den Hinweisen abgelenkt worden zu sein. Diese Ablenkung muss aber nicht unbedingt nachteilig für die Studie gewertet werden. Da am Simulator einige Ablenkungsfaktoren, wie sie im realen Verkehr auftreten (andere Verkehrsteilnehmer, schwierige Lichtverhältnisse, etc.), nicht vorkommen, hat diese Ablenkung durch die unpräzise Lenkung diese Faktoren vielleicht teilweise oder sogar vollständig kompensiert. Dies könnte eine bessere Übertragbarkeit der Studie auf Realfahrten zur Folge haben. Da dies in dem Versuchsaufbau jedoch nicht messbar war, bleibt dies Spekulation.

Man kann jedoch auch argumentieren, dass die objektiven Verbesserungen realisiert wurden, ohne dass der Fahrer subjektiv einen Einfluss auf die Hinweise wahrnehmen konnte. Dies ist auch positiv zu werten, da man dadurch eine energieeffizientere Fahrweise realisieren kann, ohne dass der Fahrer Einschränkungen im Vergleich zum nicht adaptierten System erfährt.

Wenn man noch einen Schritt weiter denkt und die Hinweise zuvor noch an den Fahrstil angepasst worden wären, wären evtl. auch noch Verbesserungen bei der subjektiven Empfindung zusätzlich zur Verbesserung in den objektiven Kriterien möglich.



## 7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden adaptive Hinweise zur Unterstützung des Fahrers bei einer energieeffizienten Fahrweise implementiert und in einer Studie am Simulator getestet. Das Ziel war hierbei zu überprüfen, ob durch die Anpassung des Übermittlungszeitpunkts der Hinweise an die Reaktionszeit des Fahrers auf vorangegangene Hinweise eine Verbesserung hinsichtlich objektiver Kriterien erfolgen kann und ob die adaptiven Hinweise auch subjektiv von den Probanden besser bewertet werden.

Im ersten Kapitel wurden Fahrerassistenzsysteme definiert und in unterschiedliche Kategorien eingeteilt. Da der Fokus dieser Arbeit auf Fahrerassistenzsystemen liegt, die den Fahrer bei der energieeffizienten Ausführung seiner Fahraufgabe unterstützen sollen, werden diese näher betrachtet. Diese können vielfältig gestaltet sein. Daher wird im Anschluss ein Beispiel für ein solches System, der *Efficient eDrive Assistant*, welcher im Rahmen von Forschungsprojekten am Institut für Fahrzeugsystemtechnik mitentwickelt wurde, näher betrachtet und erläutert.

Dieses Fahrerassistenzsystem hat zwei Modi. Der angeleitete Modus steht dabei im Fokus dieser Arbeit. In diesem bekommt der Fahrer haptische und optische Rückmeldung, wann er vor bestimmten Fahrsituationen, wie beispielsweise Wechsel im Geschwindigkeitslimit oder Kurven, seinen Fuß vom Gas nehmen sollte, um die Situation energieeffizient mit einer passenden Geschwindigkeit zu erreichen. Bevor die Umsetzung dieser Hinweise detailliert erläutert wurde, wurden die Grundlagen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion herausgearbeitet, um die Informationsverarbeitung beim Menschen besser zu verstehen und geeignete Übertragungswege für die Hinweise zu identifizieren.

Da der Fahrstil eines Fahrers auch einen großen Einfluss auf die Erwartungshaltung des Fahrers gegenüber Fahrerassistenzsystemen hat, ist es sinnvoll, solche Systeme an den entsprechenden Fahrstil des aktuellen Fahrers anzupassen. Um dies zu ermöglichen, ist eine Kenntnis über den aktuellen Fahrstil nötig. In dieser Arbeit wurde eine Methode zur Fahrstilerfassung durch ein System, das sich des Konzepts der Fuzzy Logik bedient, vorge-

stellt. Dieses System zur Fahrstilerkennung wurde in mehreren Schritten in der Simulation und auch mit Hilfe von Realfahrdaten validiert. Desweiteren wurde eine innovative Methode zur Optimierung der Systemparameter vorgestellt. Die Methode kombiniert die Konzepte der statistischen Versuchsplanung und evolutionärer Algorithmen und kann in Zukunft als neuartiges Werkzeug auch zur Optimierung der Parameter von weiteren komplexen Systemen eingesetzt werden.

Nach der Erfassung des Fahrstils können die Fahrhinweise an diesen angepasst werden. Dabei werden die Hinweise hauptsächlich an die akzeptierte Querbesehleunigung des Fahrers, die stark vom Fahrstil abhängig ist, angepasst. Diese Anpassung wurde in Kapitel 5 eingehend beschrieben, stellt allerdings nur die erste Stufe eines in diesem Kapitel beschriebenen Anpassungskonzepts dar. Die zweite Stufe ist die Verschiebung des Übermittlungszeitpunktes der Fahrhinweise basierend auf der durchschnittlichen Reaktionszeit des Fahrers auf vorangegangene Hinweise. Um dies zu ermöglichen wurde zuerst ein Verständnis für typische Reaktionszeiten beim Menschen und das Entstehen dieser geschaffen, bevor im Anschluss das Konzept und die Umsetzung der Anpassung im Detail beschrieben wurden.

Im abschließenden Kapitel wurde zuerst der im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte Fahr Simulator vorgestellt und die Weiterentwicklungen in Hard- und Software beschrieben. In diesem Fahr Simulator wurde abschließend eine Probandenstudie mit 50 Testpersonen durchgeführt, mit der die Wirkung der Anpassung an die Reaktionszeit überprüft werden sollte. Die aufgestellte Hypothese, dass durch die Anpassung sowohl die subjektive Akzeptanz der Probanden als auch objektive Kriterien, wie die Geschwindigkeitsabweichung der tatsächlichen Geschwindigkeit von der berechneten Zielgeschwindigkeit bei Situationen, verbessert werden können, konnte durch die Studie nur eingeschränkt bestätigt werden. Im Bereich der objektiven Kriterien wurden zwar hoch signifikante Verbesserungen erzielt, jedoch konnten die Probanden subjektiv keine Verbesserung wahrnehmen. Diese Einschränkung lassen sich jedoch mit verschiedenen Eigenschaften und Gegebenheiten der Simulatorstudie begründen. Die Forschungsfrage, ob sich die objektiven Kriterien während der Testfahrten über die Zeit verbessern, konnte eindeutig mit ja beantwortet werden. In der Praxis im Realbetrieb ist daher eine deutliche Verbesserung durch die Adaption der Hinweise zu erwarten, insbesondere dann, wenn nicht nur der Schritt der Anpassung an die Reaktionszeit, sondern auch die Anpassung an den Fahrstil erfolgen kann.

Eine Adaption ist also durchaus sinnvoll und kann die Qualität der Hinweise stark verbessern, wenn sie richtig durchgeführt wird.



## 8 Ausblick

Ausblickend auf zukünftige Forschung bietet diese Arbeit einige Anknüpfungspunkte. Diese Handlungsfelder könnten die positiven Ergebnisse dieser Arbeit weiter verbessern und sollten daher nicht außer acht gelassen werden. Es handelt sich dabei um folgende:

**Fahrstilerkennung im Realversuch** Die Fahrstilerkennung wurde im Verlauf dieser Arbeit zwar mehrfach validiert. Diese Validierungsschritte wurden jedoch nur entweder in der Simulation oder mit Hilfe von Messdaten aus verschiedenen Realfahrten durchgeführt. In der Simulation konnte als Referenz die Parametrierung des Fahrermodells genutzt werden. Für die Validierung mit den Messdaten aus den Realfahrdaten war die Generierung einer solchen Referenz die größte Schwierigkeit. Um eine verlässliche Validierung der Fahrstilerkennung im Realversuch durchzuführen, wäre es von Nöten eine groß angelegte Probandenstudie durchzuführen, bei der der Referenzfahrstil durch eine subjektive Befragung von Probanden und Testleitern ermittelt werden kann. Nur so würde sich die Fahrstilerkennung für einen Einsatz im Realfahrzeug absichern lassen.

**Erste Stufe der Hinweisadaption** Wenn die Fahrstilerkennung vollständig validiert ist und damit auch im Fahrzeug einsetzbar ist, wäre eine Umsetzung der ersten Stufe der Hinweisadaption, also die Anpassung an den erkannten Fahrstil des Fahrers der nächste Schritt. Die Hauptanpassung wäre eine Anpassung der tolerierten Querbeschleunigung in der Kurve. Oliver Bohnenberger hat in seiner Masterarbeit [11] bereits Vorschläge für entsprechenden Kennfelder gemacht. Eine Implementierung dieser Kennfelder ist leicht möglich. Nach der Implementierung wäre ein Test dieser Kennfelder nötig.

**Test der Hinweisadaption im Realversuch** Nach der vollständigen Implementierung beider Stufen der Adaption sollte ein Test der Gesamtadaption erfolgen. Um Einflüsse durch einen nicht immer ganz realistischen

Simulatoraufbau zu vermeiden, würde sich eine Probandenstudie im Realfahrzeug anbieten. Um dennoch möglichst reproduzierbare Bedingungen zu realisieren wäre ein Test auf einer abgesperrten Teststrecke für diese Zwecke eine gute Option. Aber auch Tests im realen Straßenverkehr wären eine gute Möglichkeit, da diese Variante näher an der Realität läge. Der Fokus sollte bei diesen Tests auf einer guten Erfassung der subjektiven Empfindungen der Probanden liegen, um zu überprüfen, ob diese durch die Implementierung der ersten Stufe der Adaptierung im Vergleich zur Studie in dieser Arbeit verbessert werden könnten.

**Weiterentwicklung Fahrsimulator** Die Weiterentwicklung des in dieser Arbeit verwendeten Fahrsimulators ist ein weiteres Handlungsfeld, dem weiter Beachtung geschenkt werden sollte. Während der Studie kam mehrfach Kritik von den Probanden am Simulator. Ein häufiger Kritikpunkt der Probanden war die vor allem um die Mittellage unpräzise Lenkung. Dies liegt an einem Totbereich des Rückstellmoments um die Mittellage herum. Würden man diesen verringern und somit schon bei einem geringeren Lenkwinkel ein Rückstellmoment realisieren, könnte dieser Kritikpunkt ausgemerzt werden. Außerdem wurde der Pfeifton bemängelt, der entsteht, wenn ein Rückstellmoment am Lenkrad gestellt wird. Diese könnte sich in Zukunft durch eine veränderte Elektronik für die Ansteuerung der Elektromotoren verbessern lassen.

Auch die optische Darstellung wurde bemängelt. Dies liegt zum einen an der Visualisierung von CarMaker und zum anderen an der Umsetzung der Fahrhinweise, die für einige Probanden etwas zu „überladen und dadurch etwas unübersichtlich“ waren. Deshalb sollte man die Anordnung und Symbolik überdenken und die Anzahl der angezeigten Symbole eventuell reduzieren.

Auch die haptischen Hinweisen wurde von den Probanden etwas kritisiert. Einige Probanden empfanden den Unterschied zwischen dem normalen Gegendruck des Pedals und der Kraftüberhöhung beim Ausrollhinweis als zu gering und bemängelten, dass der Hinweis dadurch nur sehr schwer zu erkennen war. Durch eine andere Kennlinie und eine höhere Kraftdifferenz beim Hinweis könnte man auch diesem Kritikpunkt entgegenwirken.

Zuletzt könnte man den Simulator über eine Einbindung der Schaltung und vor allem des Kombiinstrumentes noch realistischer gestalten und dadurch möglicherweise auch Anzeigen im Head-up-display, wie beispiels-

weise den Tachometer, einsparen, was die Übersichtlichkeit noch erhöhen würde.



## 9 Abbildungsverzeichnis

2.1	Die zwei Modi des „Efficient eDrive Assistant“ . . . . .	12
2.2	Aufbau des „Efficient eDrive Assistant“ . . . . .	13
2.3	Foto des Hardware-in-the-loop Prüfstands . . . . .	17
2.4	Struktur des Hardware-in-the-loop-Prüfstands im Blockdiagramm	18
3.1	Interaktionskanäle zwischen Mensch und Maschine, aus [84] . .	26
3.2	Darstellung verschiedener Displaykonzepte im Fahrzeuginnenraum, aus [9] . . . . .	27
3.3	Anzeige der Hinweise im Kombiinstrument des Aggregateträgers	28
3.4	Verlauf des gesetzlichen Geschwindigkeitslimits (rot) und der tolerierten Kurvengeschwindigkeit (blau). Der Bereich der ersten relevanten Kurve ist hellblau markiert . . . . .	30
3.5	Darstellung der Hinweise in CarMaker Instruments . . . . .	35
3.6	Screenshot aus der Simulation mit CarMaker und den Hinweisen als Overlay . . . . .	36
4.1	Ablauf des Klassifizierungsprozesses mit Hilfe der Fuzzy Logik	41
4.2	Einflüsse auf den Fahrstil . . . . .	43
4.3	Flussdiagramm des Verfahrens zur Ermittlung des Fahrstils, aus [12] . . . . .	46
4.4	Zeitlicher Verlauf der mittleren Längsbeschleunigung beim Ampelstart (links) und der mittleren Querbeschleunigung (rechts) in ausgewählten Verkehrssituationen ((1) Fahrten im Kreisverkehr beschreibt und (2)-(4) Autobahnabfahrten) mit den Fahrstilen „komfortabel“ (grün), „mittel“ (rot) und „sportlich“ (blau) aus [21] . . . . .	49
4.5	Bewertungsgrößen zur Fahrstilerkennung nach Fahrsituationen bzw. Straßenklassen, aus [92] . . . . .	53
4.6	Grenzmuster aus der Korrelation von Längsbeschleunigung (links) und Verzögerung (rechts) zur Fahrzeuggeschwindigkeit beim Antreiben und Verzögern, aus [13] . . . . .	61

4.7	Zusammenhang zwischen der maximalen Verzögerung und der Geschwindigkeitsdifferenz für den „normalen“ Fahrstil, aus [28]	62
4.8	Akzeptierte Querbeschleunigungen unterschiedlicher Fahrstile bei verschiedenen Kurvenradien, aus [43]	63
4.9	Zusammenhang zwischen Querbeschleunigung und Kurvenradius für eine „normale“ Fahrweise, aus [28]	64
4.10	Zeitliche Häufigkeit der Zeitlücken bei Folgefahrten auf Autobahnen, aus [32]	66
4.11	Systemstruktur Fahrstilerkennung, übersetzt aus [22]	67
4.12	Struktur Teilsystem Überlandstraßen, übersetzt aus [22]	68
4.13	Zugehörigkeitsfunktion für den Parameter Längsbeschleunigung	70
4.14	Ablauf der Generierung von Aufzeichnungen mit wechselndem Fahrstil	74
4.15	Simulationsumgebung CarMaker (links) und Streckenverlauf der simulierten Versuchsfahrten (rechts), aus [40]	75
4.16	Ergebnisse für Mix 1 aus [40]	77
4.17	Ergebnisse für Mix 2 aus [40]	78
4.18	Ergebnisse für Mix 3 aus [40]	79
4.19	Gesamtergebnis Validierungsschritt 1 nach [40]	80
4.20	Streckenprofil des Testfalls Kurven in CarMaker, aus [41]	82
4.21	Vereinfachte Darstellung des Streckenprofils des Testfalls Tempolimit in CarMaker, aus [41]	84
4.22	Streckenprofil des Testfalls Stadt in CarMaker, aus [41]	85
4.23	Screenshot des Testfalls Autobahn in CarMaker, aus [41]	87
4.24	Verlauf KIT-Runde in Google Maps, aus [83] (links) und Verlauf KIT-Runde inklusive Geschwindigkeitslimits aus CarMaker (rechts)	88
4.25	Gesamtergebnis Validierungsschritt 2 aus [41]	91
4.26	Linke Seite: KIT-Nord-Runde in Google Maps, Rechte Seite: KIT-Nord-Runde in CarMaker, aus [78]	93
4.27	Linke Seite: KIT-Ost-Runde in Google Maps, Rechte Seite: KIT-Ost-Runde in CarMaker, aus [78]	93
4.28	Beispiel einer Pareto Front. Auf der x- und y- Achse sind die Zielgrößen der zweidimensionalen Zielfunktion aufgetragen. Jeder Punkt repräsentiert eine komplette Parametereinstellung des zu optimierenden Systems und ist Teil der Pareto Front, aus [78]	96

---

4.29	Ein Beispiel für ein Lateinisches Quadrat mit den ganzen Zahlen eins bis fünf als Symbole . . . . .	103
4.30	Beispiel für ein zweidimensionales Latin Hypercube Testfeld mit zwei Faktoren mit jeweils vier Faktorstufen, aus [78] . . . .	104
4.31	Schematischer Ablauf des NSGA-II, aus [102] . . . . .	106
4.32	Ergebnisse der Systemparameteroptimierung . . . . .	110
4.33	Fuzzy Parameter für die Variable „Längsbeschleunigungsverhalten Überlandstraßen“. Der grüne Kreis und die roten Pfeile sind eine grafische Darstellung der Parameter, die zu optimieren sind. . . . .	111
4.34	Ergebnisse der Fuzzy Parameteroptimierung . . . . .	112
4.35	Ergebnisse nach zwei Optimierungsschritten . . . . .	113
4.36	Iterativer Optimierungsprozess . . . . .	114
4.37	Capability Envelopes für Normal- und Komfortfahrer, aus [61] .	117
5.1	Menschliche Reaktionszeiten aus [79] . . . . .	123
5.2	Mittlere Reaktionszeiten bis zur Bremsreaktion aus [74] . . . .	125
5.3	Kennfeld Kurvengeschwindigkeiten: in blau das bisher verwendete Kennfeld, in rot die Kurve zur akzeptierten Querbeschleunigung von Schimmelpfennig . . . . .	127
5.4	Anpassung Fahrhinweis - Variante 1, aus [11] . . . . .	131
5.5	Anpassung Fahrhinweis - Variante 2, aus [11] . . . . .	132
5.6	Anpassung Fahrhinweis - Variante 3, aus [11] . . . . .	133
6.1	Foto des Grundaufbaus des Simulators . . . . .	139
6.2	Accelerator Force Feedback Pedal (AFFP) der Continental AG aus [18] . . . . .	140
6.3	Z-Turn Board mit den verschiedenen Komponenten, aus [64] . .	141
6.4	Selbsteinschätzung des Fahrstil der Probanden . . . . .	146
6.5	Teststrecke 1 als Schema aus der Vogelperspektive . . . . .	148
6.6	Auswertung zur Aussage: „Die haptischen Hinweise waren deutlich zu spüren“ . . . . .	150
6.7	Auswertung zur Aussage: „Die haptischen Hinweise waren eindeutig“ . . . . .	151
6.8	Akzeptanz der Probanden für die beiden Ausprägungen des Systems nach Van der Laan [103]) . . . . .	151

6.9	Subjektives Empfinden der Geschwindigkeiten bei den Situationen (adaptives System in grün oben und nicht adaptives System in blau unten) . . . . .	152
6.10	Subjektives Empfinden des Zeitpunktes der Hinweise (adaptives System in grün oben und nicht adaptives System in blau unten) . . . . .	153
6.11	Subjektive Einschätzung der Probanden, welches System als hilfreicher empfunden wurde . . . . .	154
6.12	Auswertung zur Aussage: „Der Simulator hat ein realistisches Fahrerlebnis vermittelt.“ . . . . .	155
6.13	Auswertung zur Aussage: „Die Strecke war zu anspruchsvoll“ . . . . .	155
6.14	Auswertung zur Aussage: „Ich bin so gefahren wie ich es im Alltag auch getan hätte. (realistische Fahrweise)“ . . . . .	155
6.15	Auswertung der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen berechneter Sollgeschwindigkeit und tatsächlicher Geschwindigkeit bei den Situationen . . . . .	157
6.16	Verläufe der Geschwindigkeitsabweichungen über die Situationen für die Teststrecken für das nicht adaptive und das adaptive System . . . . .	158

## 10 Tabellenverzeichnis

3.1	Eigenschaften der Sinneskanäle, aus [110] . . . . .	24
4.1	Berücksichtigte Parameter je Straßenklasse . . . . .	60
4.2	Versuchsplan für das zweidimensionale Testfeld aus Abbildung 4.30 . . . . .	104
6.1	Definierte Situationen für die Teststrecken . . . . .	147
A.1	Verwendete Fahrerparameter in der CarMaker Simulation im ersten Validierungsschritt . . . . .	191
A.2	In der Simulation verwendete Systemparameter für die Teilsys- teme <i>Stadt</i> und <i>Überlandstraßen</i> im ersten Validierungsschritt .	192
A.3	Verwendete Fahrerparameter in der CarMaker Simulation im zweiten Validierungsschritt . . . . .	193
A.4	Verwendete Fahrerparameter in der CarMaker Simulation für die Parameteroptimierung . . . . .	194



# 11 Literaturverzeichnis

- [1] ALJAAFREH, Ahmad ; ALSHABATAT, Nabeel ; NAJIM AL-DIN, Munaf S.: Driving style recognition using fuzzy logic. In: *Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2012 IEEE International Conference on*. [Piscataway, N.J.] : IEEE, 2012. – ISBN 978–1–4673–0993–6, S. 460–463
- [2] BANDEMER, Hans ; GOTTWALD, Siegfried: *Einführung in Fuzzy-Methoden: Theorie und Anwendungen unscharfer Mengen ; [mit 3 Tabellen]*. 3., unveränd. Aufl. Berlin : Akad.-Verl., 1992. – ISBN 9783055014581
- [3] BÄR, Tobias ; AIDEL JAN ; STRAND MARCUS ; ZÖLLNER J.MARIUS: Szenenbasierte Fahrstilerkennung durch probabilistische Auswertung von Fahrzeugdaten. In: *5. Tagung Fahrerassistenz - Schwerpunkt Vernetzung, München, 2012*, S. 20–ff
- [4] BÄR, Tobias ; NIENHÜSER, Dennis ; KOHLHAAS, Ralf ; ZÖLLNER, J. M.: Probabilistic driving style determination by means of a situation based analysis of the vehicle data. In: *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington DC, USA, 2011*, S. 1698–1703
- [5] BAUMGARTH, Carsten: *Der Coca-Cola-Effekt von Kulturmarken*. [http://www.mo-kultur.de/wp-content/uploads/2013/08/blindtest\\_ergebnisse.pdf](http://www.mo-kultur.de/wp-content/uploads/2013/08/blindtest_ergebnisse.pdf). Version: 2013, Abruf: 15.02.2017
- [6] BIELACZEK, Christian: Die Auswirkung der aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 101 (1999), Nr. 9, S. 714–724. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03224277>. – DOI 10.1007/BF03224277. – ISSN 0001–2785
- [7] BIRBAUMER, Niels ; SCHMIDT, Robert F.: *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 5., neu bearb. Aufl. Heidelberg : Springer, 2006 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3540294910

- [8] BIRRELL, Stewart A. ; YOUNG, Mark S. ; WELDON, Alex M.: Vibrotactile pedals: provision of haptic feedback to support economical driving. In: *Ergonomics* 56 (2013), Nr. 2, S. 282–292. <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2012.760750>. – DOI 10.1080/00140139.2012.760750. – ISSN 0014–0139
- [9] BMW ; BMW (Hrsg.): *Katalog 5er Limousine*. <http://www.bmw.com/com/de/newvehicles/5series/sedan/2013/showroom/index.html>, Abruf: 14.12.2016
- [10] BOCKLISCH, Steffen: *Prozessanalyse mit unscharfen Verfahren*. 1. Aufl. Berlin : Verlag Technik, 1987. – ISBN 9783341002117
- [11] BOHNENBERGER, Oliver: *Implementation fahrstiladaptiver Fahrhinweise*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Masterarbeit, 2016
- [12] BORRMANN, D.: *Verfahren zur Fahrer-Typ-Erkennung*. <https://www.google.com/patents/EP1256479A1?cl=un>. Version: 2002, Abruf: 20.08.2016
- [13] BOSSDORF-ZIMMER, Janine ; KOLLMER, Hermann ; HENZE, Roman ; KÜÇÜKAY, Ferit: Fingerprint des Fahrers zur Adaption von Assistenzsystemen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr. 3, 226–231. <http://dx.doi.org/10.1365/s35148-011-0074-4>. – DOI 10.1365/s35148–011–0074–4. – ISSN 0001–2785
- [14] BRAESS, Hans-Hermann ; SEIFFERT, Ulrich: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7., aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 3658016914
- [15] BRAMER, M. A.: *Principles of data mining*. 2nd ed. London : Springer, 2013 (Undergraduate topics in computer science). – ISBN 1447148843
- [16] BRAUN, Thomas ; RÖHLER RIEMER, Annette ; WEBER, Florian: *Kurzlehrbuch Physiologie: Mit 15 Tabellen*. 1. Aufl. München and Jena : Elsevier, Urban & Fischer, 2006 (Vorklinik). – ISBN 9783437417771
- [17] BRELL, Claus ; BRELL, Juliana ; KIRSCH, Siegfried: *Statistik von Null auf Hundert*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg,

2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53632-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53632-2>. – ISBN 978-3-662-53631-5
- [18] CONTINENTAL AUTOMOTIVE: *Accelerator Force Feedback Pedal (AFFP®)*. [http://www.continental-automotive.de/www/automotive\\_de\\_de/themes/passenger\\_cars/chassis\\_safety/passive\\_safety\\_sensorics/fahrerwunsch\\_de/affp\\_de.html](http://www.continental-automotive.de/www/automotive_de_de/themes/passenger_cars/chassis_safety/passive_safety_sensorics/fahrerwunsch_de/affp_de.html). Version: 2017
- [19] DEB, Kalyanmoy: Multi-objective Optimisation Using Evolutionary Algorithms: An Introduction. Version: 2011. [http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-652-8\\_{\\_}1](http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-652-8_{_}1). In: WANG, Lihui (Hrsg.) ; NG, Amos H. C. (Hrsg.) ; DEB, Kalyanmoy (Hrsg.): *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*. London : Springer London, 2011. – DOI 10.1007/978-0-85729-652-8\_1. – ISBN 978-0-85729-652-8, 3–34
- [20] DEMBINSKY, Martin: *Durchführung und Auswertung einer Probandenstudie zu adaptiven Fahrerhinweisen*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Bachelorarbeit, 2017
- [21] DEML, DR. -ING. B. ; FREYER, DIPL. -ING. J. ; FÄRBER, PROF. DR. B.: Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils. In: *VDI Berichte* Bd. 2015, S. 47–59
- [22] DOERR, Dominik ; GRABENGIESSER, David ; GAUTERIN, Frank: Online driving style recognition using fuzzy logic. In: *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014*. Piscataway, NJ : IEEE, 2014. – ISBN 978-1-4799-6078-1, S. 1021–1026
- [23] DOERR, Dominik ; PANDL, Konstantin D. ; GAUTERIN, Frank: Optimization of system parameters for an online driving style recognition. In: *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2016. – ISBN 978-1-5090-1889-5, S. 302–307
- [24] DONGES, Edmund: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *AUTOMOB-IND 27* (1982), Nr. 2

- [25] DONNER, E. ; WINKLE, T. ; WALZ, R. ; SCHWARZ J.: RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS). In: *Technischer Kongress 2007, Verband der Automobilindustrie (VDA), Sindelfingen 2007* (2007), S. 231–241
- [26] DRAGON, Ludger: Fahrzeugdynamik: Wohin fahren wir? Version: 2008. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74151-0\\_{\\_}6](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74151-0_{_}6). In: SCHINDLER, Volker (Hrsg.): *Forschung für das Auto von Morgen: Aus Tradition entsteht Zukunft*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. – DOI 10.1007/978-3-540-74151-0\_6. – ISBN 978-3-540-74151-0, 239–260
- [27] DUDEN ONLINE: *Assistenz*. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Assistenz>. Version: 2017, Abruf: 01.02.2017
- [28] EBERSBACH, Dirk: *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 01.01.2006
- [29] EREN, H. ; MAKINIST, S. ; AKIN, E. ; YILMAZ, A.: Estimating driving behavior by a smartphone. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012*. Piscataway, NJ and Piscataway, NJ : IEEE, 2012. – ISBN 978-1-4673-2118-1, S. 234–239
- [30] FAHRMEIR, Ludwig ; PIGEOT, Iris ; TUTZ, Gerhard: *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. München : Springer Verlag, 2003
- [31] FÄRBER, Berthold: Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen. Version: 2005. [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27137-6\\_{\\_}7](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27137-6_{_}7). In: MAURER, Markus (Hrsg.) ; STILLER, Christoph (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005. – DOI 10.1007/3-540-27137-6\_7. – ISBN 978-3-540-27137-6, 141–160
- [32] FILZEK, Björn: *Abstandsverhalten auf Autobahnen*. Darmstadt, Technische Universität, Diss., 01.01.2007. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/9111/>
- [33] FITCH, Gregory ; KIEFER, Raymond ; HANKEY, Jon ; KLEINER, Brian: Toward developing an approach for alerting drivers to the

- direction of a crash threat. In: *Human factors* 49 (2007), Nr. 4, S. 710–720. – ISSN 0018–7208
- [34] FORS, Carina ; KIRCHER, Katja ; AHLSTRÖM, Christer: Interface design of eco-driving support systems – Truck drivers’ preferences and behavioural compliance. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 58 (2015), S. 706–720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.035>. – DOI 10.1016/j.trc.2015.03.035. – ISSN 0968090X
- [35] FREYER, Jorn ; DEML, Barbara ; MAURER, Markus ; FARBER, Berthold: ACC with enhanced situation awareness to reduce behavior adaptations in lane change situations. In: *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Piscataway : I E E E, Jan. 2007. – ISBN 1–4244–1067–3, S. 999–1004
- [36] FRIEDRICH, T. ; ZIEGLER, P.: *Verfahren zum Anpassen eines Fahrer-Assistenzsystems an das Fahrverhalten eines Fahrers*. <https://www.google.com/patents/DE102009000296A1?cl=de>. Version: 2010
- [37] GERDES, Ingrid ; KLAWONN, Frank ; KRUSE, Rudolf: *Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen – Strategien und Optimierungsverfahren – Beispielanwendungen*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2004 (Computational Intelligence). – ISBN 3322868397
- [38] GHOSH, Ashish ; DEHURI, Satchidananda: Evolutionary algorithms for multi-criterion optimization: a survey. In: *International Journal of Computing & Information Sciences* 2 (2004), Nr. 1, S. 38–57
- [39] GILLI, Manfred ; MARINGER, Dietmar ; SCHUMANN, Enrico: *Numerical methods and optimization in finance*. Waltham : Academic Press, 2011. – ISBN 0123756626
- [40] GRABENGIESSER, David: *Konzeption und Umsetzung einer Fahrstilerkennung für ein Elektrofahrzeug*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Masterarbeit, 2014
- [41] GRAUSAM, Philipp: *Test und Validierung einer Fahrstilerkennung für ein Elektrofahrzeug*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Bachelorarbeit, 2015

- [42] GREEN, Marc: "How Long Does It Take to Stop? " Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. In: *Transportation Human Factors* 2 (2000), Nr. 3, S. 195–216. [http://dx.doi.org/10.1207/STHF0203\\_{\\_}1](http://dx.doi.org/10.1207/STHF0203_{_}1). – DOI 10.1207/STHF0203\_1. – ISSN 1093–9741
- [43] HAMBERGER, Werner: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik*. Bd. 371: *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 1999. – ISBN 9783183371129
- [44] HARTWICH, Erwin: *Längsdynamik und Folgebewegung des Straßenfahrzeugs und ihr Einfluß auf das Verhalten der Fahrzeugschlange* -. Darmstadt, TU Darmstadt, Dissertation, 1971
- [45] HERIS, K.: *NSGA-II*. [delta.cs.cinvestav.mx/%7Eccello/EM00/NSGA-II-Matlab.zip](http://delta.cs.cinvestav.mx/%7Eccello/EM00/NSGA-II-Matlab.zip). Version: 2010, Abruf: 15.08.2015 um 11:53
- [46] HIBBERD, D. L. ; JAMSON, A. H. ; JAMSON, S. L.: The design of an in-vehicle assistance system to support eco-driving. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 58 (2015), S. 732–748. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.013>. – DOI 10.1016/j.trc.2015.04.013. – ISSN 0968090X
- [47] HILDEBRANDT, Christoph ; SEDLMAYR, Martin ; PION, Olivier ; BUYUKYILDIZ, Gorkem ; HENZE, Roman ; KUCUKAY, Ferrit: Driver perception of brake notifications under real driving conditions. In: *Ergonomics* 59 (2016), Nr. 1, S. 39–47. <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2015.1055823>. – DOI 10.1080/00140139.2015.1055823. – ISSN 0014–0139
- [48] HO, Cristy ; SPENCE, Charles: Crossmodal Information Processing in Driving. Version: 2009. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420055337.ch10>. In: CASTRO, Cándida (Hrsg.): *Human factors of visual and cognitive performance in driving*. Boca Raton : CRC Press, 2009. – DOI 10.1201/9781420055337.ch10. – ISBN 978–1–4200–5530–6, S. 187–200
- [49] JOHNSON, Derick A. ; TRIVEDI, Mohan M.: Driving style recognition using a smartphone as a sensor platform. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference*

- on. [Piscataway, N.J.] : IEEE, 2011. – ISBN 978–1–4577–2197–7, S. 1609–1615
- [50] JOOST, Tobias: *Literaturrecherche zum State of the Art von längsdynamischen Fahrerassistenzsystemen und deren Anzeige Konzepten hinsichtlich Adaptivität*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Seminararbeit, 2017
- [51] JUNGnickel, Dieter: *Optimierungsmethoden: Eine Einführung*. Berlin [u.a.] : Springer, 1999 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783540660576
- [52] KLEBELSBERG, Dieter: *Verkehrspsychologie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1982. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-47507-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-47507-8>. – ISBN 978–3–642–47509–2
- [53] KLEIN, Raymond M. ; POSNER, Michael I.: Attention to visual and kinesthetic components of skills. In: *Brain Research* 71 (1974), Nr. 2-3, S. 401–411. [http://dx.doi.org/10.1016/0006-8993\(74\)90984-6](http://dx.doi.org/10.1016/0006-8993(74)90984-6). – DOI 10.1016/0006–8993(74)90984–6. – ISSN 00068993
- [54] KNOLL, Peter: Fahrerassistenzsysteme. Version: 2010. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9717-6\\_{\\_}9](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9717-6_{_}9). In: REIF, Konrad (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010. – DOI 10.1007/978–3–8348–9717–6\_9. – ISBN 978–3–8348–9717–6, 104–121
- [55] KOLLMER, H. ; JANSSEN, A. ; KUCUKAY, F.: Simulation kundennaher Betriebslasten für Fahrzeugkomponenten. In: *VDI BERICHTE - Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung; Mess- und Versuchstechnik* (2007), S. 197–216
- [56] KRUSE, Rudolf ; GEBHARDT, Jörg ; KLAWONN, Frank: *Fuzzy-Systeme*. Stuttgart : Teubner, 1993 (Leitfäden und Monographien der Informatik). – ISBN 9783519021308
- [57] KUHN, K.P.D.I.: *Verfahren zur graduellen Fahrweisenklassifikation und dieses anwendendes Kraftfahrzeug*. <http://google.com/patents/DE4401416C2?c1=ja>. Version: 1998

- [58] LANG, Florian ; SCHMIDT, Robert F. ; THEWS, Gerhard: *Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie ; mit 78 Tabellen ; [neue Approbationsordnung]. 29., vollst. neu bearb. und aktualisierte Aufl.* Berlin, Heidelberg : Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2005 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3540264167
- [59] LEE, John D. ; HOFFMAN, Joshua D.: Collision Warning Design to Mitigate Driver Distraction. In: *Proceedings of the SIGCHI, Conference on Human Factors in Computing Systems, Wien, Österreich* Bd. 2004, 2004, S. 65–72
- [60] LEE, Leonard ; FREDERICK, Shane ; ARIELY, Dan: Try it, you'll like it: the influence of expectation, consumption, and revelation on preferences for beer. In: *Psychological science* 17 (2006), Nr. 12, S. 1054–1058. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01829.x>. – DOI 10.1111/j.1467-9280.2006.01829.x. – ISSN 0956-7976
- [61] LEHERT, Adrian: *Implementierung einer Methode zur Charakterisierung der Fahrdynamik von Elektrofahrzeugen im Flottenversuch*, KIKarlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Diplomarbeit, 01.01.2013
- [62] LI, Kun ; LU, Man ; LU, Fenglong ; LV, Qin ; SHANG, Li ; MAK-SIMOVIC, Dragan: Personalized Driving Behavior Monitoring and Analysis for Emerging Hybrid Vehicles. Version: 2012. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31205-2\\_{\\_}1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31205-2_{_}1). In: KAY, Judy (Hrsg.): *Pervasive computing* Bd. 7319. Springer (Berlin und New York), 2012. – DOI 10.1007/978-3-642-31205-2\_1. – ISBN 978-3-642-31204-5, S. 1–19
- [63] LI, Zhen: *Implementierung von Fahrerhinweisen für eine Gesamtfahrzeugsimulation*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Masterarbeit, 2015
- [64] LIMITED., MYIRTech ; MYIR TECH LIMITED (Hrsg.): *Z-Turn Board CD-ROM*
- [65] LOEBL, Robin: *Schnittstellenentwicklung für einen Fahrsimulator*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Masterarbeit, 2016

- 
- [66] LUCZAK, Holger: *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1993 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3662216345
- [67] MACDONALD, James S. P. ; LAVIE, Nilli: Visual perceptual load induces inattentive deafness. In: *Attention, perception & psychophysics* 73 (2011), Nr. 6, S. 1780–1789. <http://dx.doi.org/10.3758/s13414-011-0144-4>. – DOI 10.3758/s13414-011-0144-4. – ISSN 1943–3921
- [68] MANNS, Klaus: *Querbeschleunigung und Querruck in der Übergangsbogenbemessung*. Darmstadt, TU Darmstadt Fachbereich Wasser und Verkehr, Dissertation, 1985
- [69] MASTINU, G. ; GOBBI, M. ; MIANO, C.: *Optimal design of complex mechanical systems: With applications to vehicle engineering*. Berlin and New York : Springer, 2006. – ISBN 9781280956492
- [70] MAURERR ; MAURER, Markus (Hrsg.) ; STILLER, Christoph (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005. – ISBN 978-3-540-27137-6
- [71] MENG, Fanxing ; SPENCE, Charles: Tactile warning signals for in-vehicle systems. In: *Accident; analysis and prevention* 75 (2015), S. 333–346. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2014.12.013>. – DOI 10.1016/j.aap.2014.12.013. – ISSN 0001–4575
- [72] MICHALEWICZ, Zbigniew: Heuristic methods for evolutionary computation techniques. In: *Journal of Heuristics* 1 (1996), Nr. 2, S. 177–206. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00127077>. – DOI 10.1007/BF00127077. – ISSN 1381–1231
- [73] MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4., neubearb. Aufl. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 9783540420118
- [74] MOHEBBI, Rayka ; GRAY, Rob ; TAN, Hong Z.: Driver reaction time to tactile and auditory rear-end collision warnings while talking on a cell phone. In: *Human factors* 51 (2009), Nr. 1, S. 102–110. – ISSN 0018–7208
- [75] NAAMNIH, Wisam: *Weiterentwicklung eines Fahrersimulators*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Bachelorarbeit, 2016

- [76] OTTENS, Manfred ; JAAOUAD, Samira: *Einführung in die Regelungstechnik mit Fuzzy-Logik: Skript zur Lehrveranstaltung*. Technische Fachhochschule Berlin, 2009
- [77] PAEFGEN, Johannes ; KEHR, Flavius ; ZHAI, Yudan ; MICHAHELLES, Florian: Driving behavior analysis with smartphones. In: RUKZIO, Enrico (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*. New York, NY : ACM, 2012 (ACM Digital Library). – ISBN 9781450318150, S. 1
- [78] PANDL, Konstantin D.: *Parameteroptimierung einer Fahrstilerkennung*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Bachelorarbeit, 2015
- [79] PFEIFER, Ralf: *Reaktionszeiten*. <http://www.arsmartialis.com/index.html?name=http://www.arsmartialis.com/technik/reaktion/reaktion.html>. Version: 2010, Abruf: 11.01.2017
- [80] PORSCHE AG: *Porsche InnoDrive inkl. Abstandsregeltempostat*. <http://www.porsche.com/germany/models/panamera/panamera/assistance-systems/porsche-innodrive/>. Version: 2017, Abruf: 03.02.2017
- [81] PREWETT, M. S. ; ELLIOTT, L. R. ; WALVOORD, A. G. ; COOVERT, M. D.: A Meta-Analysis of Vibrotactile and Visual Information Displays for Improving Task Performance. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 42 (2012), Nr. 1, 123–132. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMCC.2010.2103057>. – DOI 10.1109/TSMCC.2010.2103057. – ISSN 1094–6977
- [82] RADKE, Dr.-Ing. T.: *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2013
- [83] RAUNER, Tim: *Entwicklung einer Methodik zur Erfassung von Streckeninformationen*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Diplomarbeit, 2013
- [84] REIF, Konrad: *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Springer Verlag (Wiesbaden), 2010

- [85] RHODE, Stephan ; HONG, Sanghyun ; HEDRICK, J. K. ; GAUTERIN, Frank: Vehicle tractive force prediction with robust and windup-stable Kalman filters. In: *Control Engineering Practice* 46 (2016), S. 37–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.10.002>. – DOI 10.1016/j.conengprac.2015.10.002. – ISSN 09670661
- [86] ROBINSON, Gordon H. ; ERICKSON, Donald J. ; THURSTON, Gregory L. ; CLARK, Richard L.: Visual Search by Automobile Drivers. In: *Human factors* 14 (1972), Nr. 4, 315–323. <http://dx.doi.org/10.1177/001872087201400404>. – DOI 10.1177/001872087201400404. – ISSN 0018–7208
- [87] ROSARIO, Helios de ; LOUREDO, Marcos ; DÍAZ, Inaki ; SOLER, Andrés ; GIL, Jorge J. ; SOLAZ, Jose S. ; JORNET, Jordi: Efficacy and feeling of a vibrotactile Frontal Collision Warning implemented in a haptic pedal. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 13 (2010), Nr. 2, S. 80–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2009.11.003>. – DOI 10.1016/j.trf.2009.11.003. – ISSN 13698478
- [88] SCHÄUFFELE, Jörg ; ZURAWKA, Thomas: *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen*. 4., überarbeitete und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2010 (Praxis). – ISBN 3834893684
- [89] SCHIMMELPFENNIG, K. H. ; HEBING, N.: Geschwindigkeiten bei kreisförmiger Kurvenfahrt Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze. In: *Der Verkehrsunfall* 20 (1982), S. 97–99
- [90] SCHIMMELPFENNIG, Karl-Heinz ; NACKENHORST, Udo: Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 1985 (1985), Nr. 4, S. 94ff
- [91] SCHNEIDER, Jörg H.: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 01.01.2009
- [92] SCHULZ, A. ; FRÖMING, R.: Analyse des Fahrerhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategie von Assistenzsystemen. In: *ATZ* 2008 (2008), Nr. 12

- [93] SCHWEFEL, Hans-Paul: *Evolution and optimum seeking*. New York : Wiley, 1995 (Sixth-generation computer technology series). – ISBN 9780471571483
- [94] SCOTT, J. J. ; GRAY, Robert: A Comparison of Tactile, Visual, and Auditory Warnings for Rear-End Collision Prevention in Simulated Driving. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 50 (2008), Nr. 2, S. 264–275. <http://dx.doi.org/10.1518/001872008X250674>. – DOI 10.1518/001872008X250674. – ISSN 00187208
- [95] SHINAR, D. ; SCHIEBER, F.: Visual requirements for safety and mobility of older drivers. In: *Human factors* 33 (1991), Nr. 5, S. 507–519. – ISSN 0018–7208
- [96] SIEBERTZ, Karl ; VAN BEBBER, David ; HOCHKIRCHEN, Thomas: *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05493-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05493-8>. – ISBN 978–3–642–05492–1
- [97] STANLEY, L. M.: Haptic and Auditory Cues for Lane Departure Warnings. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (2006), Nr. 22, S. 2405–2408. <http://dx.doi.org/10.1177/154193120605002212>. – DOI 10.1177/154193120605002212. – ISSN 1071–1813
- [98] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verkehrsunfälle 2018, Artikelnummer: 2080700187004*. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publicationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700187004.pdf;jsessionid=031CED38B48D785E14FC81BC4141F48C.internet8732?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publicationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700187004.pdf;jsessionid=031CED38B48D785E14FC81BC4141F48C.internet8732?__blob=publicationFile). Version: 2018
- [99] TIJERINA, L. ; JOHNSTON, S. ; PARMER E. ; PHAN A. H. ; WINTERBOTTOM M.D. ; US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (Hrsg.): *Preliminary Studies in Haptic Displays for Rear-End Collision Avoidance System and Adaptive Cruise Control System Applications*. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37743>. Version: 2000, Abruf: 12.01.2017

- 
- [100] UMWELTBUNDESAMT: Nationales Treibhausgasinventar 2018. (2018). – ISSN 1862–4359
- [101] UNGERMANN, J.: *Vorrichtung zum Energiemanagement in einem Elektrofahrzeug*. <https://www.google.com/patents/EP2571740A1?c1=de>. Version: 2013, Abruf: 17.09.2016
- [102] VAILLANT, Moritz: *Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik*. Bd. Band 45: *Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2016. – ISBN 3731504529
- [103] VAN DER LAAN, Jinke D. ; HEINO, Adriaan ; WAARD, Dick de: A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 5 (1997), Nr. 1, S. 1–10. [http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(96\)00025-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(96)00025-3). – DOI 10.1016/S0968-090X(96)00025-3. – ISSN 0968090X
- [104] VIGREUX, Aurélien: *Validierung einer Fahrstilerkennung mit Realfahrdaten*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät Maschinenbau, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Masterarbeit, 2014
- [105] WANG, Lihui (Hrsg.) ; NG, Amos H. C. (Hrsg.) ; DEB, Kalyanmoy (Hrsg.): *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing*. London : Springer London, 2011. – ISBN 978-0-85729-652-8
- [106] WEGSCHWEIDER, M. ; PROKOP, Günther: Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrerassistenzsystemen/Model-based comfort evaluation of driver assistance systems. In: *VDI-Berichte* (2005), Nr. 1900
- [107] WICKENS, Christopher D. ; HOLLANDS, Justin G. ; BANBURY, Simon ; PARASURAMAN, R.: *Engineering psychology and human performance*. Fourth edition. Boston : Pearson, 2013. – ISBN 9780205896196
- [108] WILDE, Andreas: *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*

- gen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München, Dissertation, 01.01.2009
- [109] WILDE, Andreas ; SCHNEIDER, Jörg ; HERZOG, Hans-Georg: Fahrstil- und fahrsituations-abhängige Ladestrategie bei Hybridfahrzeugen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 110 (2008), Nr. 5, S. 412–421. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03221978>. – DOI 10.1007/BF03221978. – ISSN 0001–2785
- [110] WINNER, Hermann: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012
- [111] XILINX, Inc.: *Zynq-7000 All Programmable SoC Technical Reference Manual (UG585)*. [https://www.xilinx.com/support/documentation/user\\_guides/ug585-Zynq-7000-TRM.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug585-Zynq-7000-TRM.pdf). Version: 2018
- [112] ZADEH, L. A.: Fuzzy sets. In: *Information and Control* 8 (1965), Nr. 3, S. 338–353. [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X). – DOI 10.1016/S0019-9958(65)90241-X. – ISSN 00199958
- [113] ZADEH, L. A. (Hrsg.): *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A Zadeh*. 1996 (Advances in Fuzzy Systems-Applications and Theory). <https://books.google.de/books?id=K0zsCgAAQBAJ>. – ISBN 9789814499811
- [114] ZIMMERMANN, H.-J: *Fuzzy set theory—and its applications*. 4th ed. Dordrecht and Boston : Kluwer Academic Publishers, 2001. – ISBN 9780792374350
- [115] ZITZLER, E. ; THIELE, L. ; LAUMANN, M. ; FONSECA, C. M.: Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 7 (2003), Nr. 2, S. 117–132. <http://dx.doi.org/10.1109/TEVC.2003.810758>. – DOI 10.1109/TEVC.2003.810758. – ISSN 1089–778X
- [116] ZÖLLER, Henrik ; HUGEMANN, Wolfgang: *Zur Problematik der Bremsreaktionszeit im Straßenverkehr*. [http://www.unfallrekonstruktion.de/pdf/bdp\\_1998\\_german.pdf](http://www.unfallrekonstruktion.de/pdf/bdp_1998_german.pdf). Version: 1998, Abruf: 12.01.2017

# A Anhang

## A.1 Parameter erster Validierungsschritt

Parameter	Wert	Einheit
<b>komfortabel</b>		
Längsbeschleunigung	2	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-3	$\frac{m}{s^2}$
Querschleunigung	3	$\frac{m}{s^2}$
Bevorzugte Reisegeschwindigkeit	70	$\frac{km}{h}$
Geschwindigkeitsabweichung bei Geschwindigkeitslimits	-15	$\frac{km}{h}$
<b>normal</b>		
Längsbeschleunigung	3	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-4.5	$\frac{m}{s^2}$
Querschleunigung	4.2	$\frac{m}{s^2}$
Bevorzugte Reisegeschwindigkeit	100	$\frac{km}{h}$
Geschwindigkeitsabweichung bei Geschwindigkeitslimits	0	$\frac{km}{h}$
<b>sportlich</b>		
Längsbeschleunigung	5	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-7	$\frac{m}{s^2}$
Querschleunigung	6.5	$\frac{m}{s^2}$
Bevorzugte Reisegeschwindigkeit	115	$\frac{km}{h}$
Geschwindigkeitsabweichung bei Geschwindigkeitslimits	+15	$\frac{km}{h}$

Tabelle A.1: Verwendete Fahrerparameter in der CarMaker Simulation im ersten Validierungsschritt

Parameter	Wert	Einheit
<b>Stadt</b>		
Grenzwert Beschleunigungsevent	0.3	$\frac{m}{s^2}$
Grenzwert Verzögerungsevent	-0.4	$\frac{m}{s^2}$
Grenzwert Querschleunigungsevent	0.4	$\frac{m}{s^2}$
Minstdauer Beschleunigungsevent	1	$s$
Minstdauer Verzögerungsevent	0.5	$s$
Minstdauer Querschleunigungsevent	0.5	$s$
Gewichtungsfaktor für den Maximalwert	0.2	-
Gewichtungsfaktor für den gewichteten Mittelwert	0.8	-
<b>Überlandstraßen</b>		
Grenzwert Beschleunigungsevent	0.4	$\frac{m}{s^2}$
Grenzwert Verzögerungsevent	-0.4	$\frac{m}{s^2}$
Minstdauer Beschleunigungsevent	0.5	$s$
Minstdauer Verzögerungsevent	0.5	$s$
Gewichtungsfaktor für den Maximalwert	0.2	-
Gewichtungsfaktor für dne gewichteten Mittelwert	0.8	-

Tabelle A.2: In der Simulation verwendete Systemparameter für die Teilsysteme *Stadt* und *Überlandstraßen* im ersten Validierungsschritt

## A.2 Parameter zweiter Validierungsschritt

Parameter	Wert	Einheit
<b>komfortabel</b>		
Längsbeschleunigung	2	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-2	$\frac{m}{s^2}$
Querbeschleunigung	3	$\frac{m}{s^2}$
Bevorzugte Reisegeschwindigkeit beim Testfall Kurve	55	$\frac{km}{h}$
Geschwindigkeitsüberschreitung	-15	$\frac{km}{h}$
Minimale Zeitlücke	1,5	s
Maximale Zeitlücke	6	s
<b>normal</b>		
Längsbeschleunigung	3	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-4	$\frac{m}{s^2}$
Querbeschleunigung	4	$\frac{m}{s^2}$
Bevorzugte Reisegeschwindigkeit beim Testfall Kurve	70	$\frac{km}{h}$
Geschwindigkeitsüberschreitung	0	$\frac{km}{h}$
Minimale Zeitlücke	1,2	s
Maximale Zeitlücke	1,5	s
<b>sportlich</b>		
Längsbeschleunigung	4	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-6	$\frac{m}{s^2}$
Querbeschleunigung	5	$\frac{m}{s^2}$
Bevorzugte Reisegeschwindigkeit beim Testfall Kurve	85	$\frac{km}{h}$
Geschwindigkeitsüberschreitung	+15	$\frac{km}{h}$
Minimale Zeitlücke	0,5	s
Maximale Zeitlücke	1,2	s

Tabelle A.3: Verwendete Fahrerparameter in der CarMaker Simulation im zweiten Validierungsschritt

## A.3 Parameter bei der Optimierung

Parameter	Wert	Einheit
<b>komfortabel</b>		
Längsbeschleunigung	2	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-2	$\frac{m}{s^2}$
Querb beschleunigung	3	$\frac{m}{s^2}$
Geschwindigkeitsüberschreitung	-15	$\frac{km}{h}$
Minimale Zeitlücke	1,5	s
Maximale Zeitlücke	6	s
Energieeffizientes Fahren	1	
Überholrate	0	
<b>normal</b>		
Längsbeschleunigung	3	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-4	$\frac{m}{s^2}$
Querb beschleunigung	4	$\frac{m}{s^2}$
Geschwindigkeitsüberschreitung	0	$\frac{km}{h}$
Minimale Zeitlücke	1,2	s
Maximale Zeitlücke	1,5	s
Energieeffizientes Fahren	0,6	
Überholrate	0,4	
<b>sportlich</b>		
Längsbeschleunigung	4	$\frac{m}{s^2}$
Verzögerung	-6	$\frac{m}{s^2}$
Querb beschleunigung	5	$\frac{m}{s^2}$
Geschwindigkeitsüberschreitung	+15	$\frac{km}{h}$
Minimale Zeitlücke	0,5	s
Maximale Zeitlücke	1,2	s
Energieeffizientes Fahren	0,1	
Überholrate	0,9	

Tabelle A.4: Verwendete Fahrerparameter in der CarMaker Simulation für die Parameteroptimierung

## A.4 Code zum Auslesen der benötigten Größen aus der CarMaker Road

---

```

1  static void
2  MyModel_DeclQuants (void *MP)
3  {
4      struct tMyModel *mp = (struct tMyModel *)MP;
5      static struct tMyModel MyModel_Dummy;
6      int i;
7      char radchar[64], bendchar[64], gradchar[64], vlimchar
          [64], bend_filteredchar[64];
8
9      /* if MP == NULL, use static variables
10     * else use dynamically allocated and actually active
11     * variables
12     */
13     mp = (MP!=NULL ? (struct tMyModel*)MP : &MyModel_Dummy);
14     for(i=0; i < c_horizon_length; i++) {
15         sprintf (gradchar, "MyHorizon.grad%i", i+1);
16         sprintf (bendchar, "MyHorizon.bend%i", i+1);
17         sprintf (bend_filteredchar, "MyHorizon.bend_filtered%i",
18                 i+1);
19         sprintf (radchar, "MyHorizon.rad%i", i+1);
20         sprintf (vlimchar, "MyHorizon.vlim%i", i+1);
21
22         DDefDouble4 (NULL, gradchar, "%", &mp->grad[i],
23                     DVA_None);
24         DDefDouble4 (NULL, bendchar, "1/m", &mp->bend[i],
25                     DVA_None);
26         DDefDouble4 (NULL, bend_filteredchar, "1/m", &mp->
27                     bend_filtered[i], DVA_None);
28         DDefDouble4 (NULL, radchar, "m", &mp->rad[i], DVA_None
29                     );
30         DDefDouble4 (NULL, vlimchar, "m/s", &mp->vlim[i],
31                     DVA_None);
32     }
33     DDefDouble4 (NULL, "MyHorizon.length", "m", &mp->length,
34                 DVA_None);
35 }
36
37 static int
38 MyModel_Calc (void *MP, double dt)
39 {
40     struct tMyModel *mp = (struct tMyModel *)MP;
41     int i, k, l, speed_limit_list_index, j, n, m,
42         ret_intersect;

```

```
34  struct point a, b, c, d, schnittp, vorne, hinten, mitte;
35  double r1, r2, rm, winkel_hinten, winkel_vorne;
36
37  if (Vehicle.sRoad >= mp->s_road_save) {
38    mp->In.Side = 0;
39    mp->length = c_horizon_length;
40    SpeedLimitDetect_Calc();
41    for(i=0; i < c_horizon_length; i++) {
42      mp->In.Dist = i + Vehicle.sRoad;
43      if (RoadEval (Env.Road, 1, In_Dist, &mp->In,
44                Out_Eval3D, &mp->Out) < ROAD_Ok) {
45        /* Fehler ist aufgetreten */
46        mp->grad[i] = mp->Out.Grad * 100;
47        mp->point1[0] = mp->Out.Mid[0];
48        mp->point1[1] = mp->Out.Mid[1];
49        mp->point1[2] = mp->Out.Mid[2];
50        mp->direction1[0] = mp->Out.Dir2D[0];
51        mp->direction1[1] = mp->Out.Dir2D[1];
52
53        if (i > 5) {
54          k = i-5;
55        }
56        else {
57          k = 0;
58        }
59
60        mp->In.Dist = k + Vehicle.sRoad;
61        if (RoadEval (Env.Road, 1, In_Dist, &mp->In,
62                  Out_Eval3D, &mp->Out) < ROAD_Ok) {
63          /* Fehler ist aufgetreten */
64        }
65
66        mp->point2[0] = mp->Out.Mid[0];
67        mp->point2[1] = mp->Out.Mid[1];
68        mp->point2[2] = mp->Out.Mid[2];
69        mp->direction2[0] = mp->Out.Dir2D[0];
70        mp->direction2[1] = mp->Out.Dir2D[1];
71
72        if (i+1 > RoadLength(Env.Road)) {
73          l = i;
74        }
75        else {
76          l = i+5;
77        }
78        mp->In.Dist = l + Vehicle.sRoad;
```

```

78     if (RoadEval (Env.Road, 1, In_Dist, &mp->In,
79                 Out_Eval3D, &mp->Out) < ROAD_Ok) {
80         /* Fehler ist aufgetreten */
81     }
82     mp->point3 [0] = mp->Out.Mid [0];
83     mp->point3 [1] = mp->Out.Mid [1];
84     mp->point3 [2] = mp->Out.Mid [2];
85     mp->direction3 [0] = mp->Out.Dir2D [0];
86     mp->direction3 [1] = mp->Out.Dir2D [1];
87
88     a.x = mp->point2 [0];
89     a.y = mp->point2 [1];
90
91     b.x = mp->direction2 [1] * (-1);
92     b.y = mp->direction2 [0];
93
94     c.x = mp->point3 [0];
95     c.y = mp->point3 [1];
96
97     d.x = mp->direction3 [1] * (-1);
98     d.y = mp->direction3 [0];
99
100    ret_intersect = intersect2(&a, &b, &c, &d, &schnittp
    );
101
102    if (ret_intersect == 0) {
103        mp->bend[i] = 0;
104        mp->rad[i] = 999999999;
105    }
106    else {
107        //abstand a-schnittp
108        r1 = sqrt(pow((schnittp.x - a.x),2) + pow((
            schnittp.y - a.y),2));
109
110        //abstand c-schnittp
111        r2 = sqrt(pow((schnittp.x - c.x),2) + pow((
            schnittp.y - c.y),2));
112
113        rm = (r1 + r2) * 0.5;
114
115        mitte.y = mp->direction1 [1];
116
117        hinten.x = mp->direction2 [0];
118        hinten.y = mp->direction2 [1];
119
120        winkel_hinten = acos(hinten.x);

```

```
121
122     vorne.x = mp->direction3[0];
123     vorne.y = mp->direction3[1];
124
125     winkel_vorne = acos(vorne.x);
126
127     if (mitte.y >= 0) {
128         if (winkel_hinten >= winkel_vorne) { // links
129             gekruemmt
130             mp->bend[i] = (-1) * 1/rm;
131             mp->rad[i] = rm;
132         }
133         else { // rechts gekruemmt
134             mp->bend[i] = 1/rm;
135             mp->rad[i] = rm;
136         }
137     }
138     else {
139         if (winkel_hinten < winkel_vorne) { // links
140             gekruemmt
141             mp->bend[i] = (-1) * 1/rm;
142             mp->rad[i] = rm;
143         }
144         else { // rechts gekruemmt
145             mp->bend[i] = 1/rm;
146             mp->rad[i] = rm;
147         }
148     }
149     // vlim vector aufbauen
150
151     for (speed_limit_list_index = 0;
152          speed_limit_list_index < 10;
153          speed_limit_list_index++)
154     {
155         if ((i+Vehicle.sRoad) >= SpeedLimit_list.pos[
156             speed_limit_list_index] && (i+Vehicle.sRoad)
157             <= SpeedLimit_list.end[speed_limit_list_index
158             ])
159         {
160             mp->vlim[i] = (double)SpeedLimit_list.vel[
161                 speed_limit_list_index];
162             break;
163         }
164     }
165 }
```

```
160     }
161
162     // double x = 0, y = 0;
163     // double dx, dy;
164
165     //bend-vektor filtern
166
167     for(j=0; j < c_horizon_length; j++) {
168         if (j == 0) {
169             mp->bend_filtered_t[j] = mp->bend[j];
170         }
171         if (j == 1) {
172             mp->bend_filtered_t[j] = 0.9 * mp->bend_filtered_t
173                 [j-1] + 0.1 * mp->bend[j];
174         }
175         else {
176             mp->bend_filtered_t[j] = 0.1 * mp->bend[j] + 0.45
177                 * mp->bend_filtered_t[j-1] + 0.45 * mp->
178                 bend_filtered_t[j-2];
179         }
180         // y = T_T0 * x;
181         // dx = T_T0 * (v * mp->bend[j] - y - _2D * x);
182         // y = y + dy;
183         // x = x + dx;
184         // mp->bend_filtered[j] = mp->bendx;
185     }
186
187     for(n=0; n < c_horizon_length; n++) {
188         if (n < (c_horizon_length - 10)) {
189             m = n+10;
190             mp->bend_filtered[n] = mp->bend_filtered_t[m];
191         }
192         else {
193             mp->bend_filtered[n] = mp->bend_filtered_t[n];
194         }
195     }
196     mp->s_road_save = Vehicle.sRoad + 1;
197 }
198
199 return 0;
```

---



# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

---

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 1** Urs Wiesel  
**Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug**  
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber  
**Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers**  
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener  
**Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement**  
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog  
**Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslast erfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten**  
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft  
**Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich**  
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker  
**Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation**  
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-86644-599-4

- Band 8** Vladimir Iliev  
**Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs**  
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz  
**Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk**  
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine**  
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler  
**Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis**  
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies  
**Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen**  
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber  
**Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz**  
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik. 27./28. September 2012 in Karlsruhe**  
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung  
**Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen 20. Februar 2013, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-86644-970-1
- Band 16** Hans-Joachim Unrau  
**Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen**  
ISBN 978-3-86644-983-1

- Band 17** nicht erschienen
- Band 18** Stefanie Grollius  
**Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells**  
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke  
**Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien**  
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr  
**Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch**  
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova  
**Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme**  
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt  
**Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen**  
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann  
**Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System**  
ISBN 978-3-7315-0187-9
- Band 24** Roman Weidemann  
**Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger**  
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei  
**Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen**  
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz  
**Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren**  
ISBN 978-3-7315-0264-7

- Band 27** Christian Schwab  
**Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte**  
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler  
**Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung**  
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös  
**Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen**  
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 25. Februar 2015, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert  
**Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge**  
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer  
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen. Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom**  
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold  
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung**  
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger  
**Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen**  
ISBN 978-3-7315-0358-3

- Band 35** Thorsten Dreher  
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundärregelten Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen**  
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling  
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern**  
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz  
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung von Nutzfahrzeugen**  
ISBN 978-3-7315-0384-2
- Band 38** Ralf Oberfell  
**Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren**  
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm  
**Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger**  
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter  
**Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen**  
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann  
**Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb**  
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler  
**Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge**  
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl  
**Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen**  
ISBN 978-3-7315-0422-1

- Band 44** Jennifer Heck  
**Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen**  
ISBN 978-3-7315-0443-6
- Band 45** Moritz Vaillant  
**Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad**  
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel  
**Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen**  
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem  
**Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung**  
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji  
**Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik**  
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**  
**22./23. September 2016 in Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 15. Februar 2017, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier  
**Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege**  
ISBN 978-3-7315-0620-1
- Band 52** Mathias Cabrera Cano  
**Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen**  
ISBN 978-3-7315-0621-8

- Band 53** Arwed Schmidt  
**Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr**  
ISBN 978-3-7315-0633-1
- Band 54** Katharina Knaisch  
**Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen. Vergleich von Topologien und Entwicklung einer Auslegungsmethodik**  
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter  
**Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment**  
ISBN 978-3-7315-0645-4
- Band 56** Steffen Rose  
**Modellbildung und Simulation von mobilen Arbeitsmaschinen. Untersuchungen zu systematischen Modellvereinfachungen in der Simulation von Antriebssystemen am Beispiel Bagger**  
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrich Peckelsen  
**Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts**  
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag  
**Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten**  
ISBN 978-3-7315-0752-9
- Band 59** Dirk Hülsebusch  
**Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit**  
ISBN 978-3-7315-0755-0
- Band 60** Christian Pohlandt  
**Intelligentes Gesamtmaschinenmanagement für elektrische Antriebssysteme**  
ISBN 978-3-7315-0774-1
- Band 61** Oliver Maier  
**Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder**  
ISBN 978-3-7315-0778-9

- Band 62**     Stephan Rhode  
**Robust and Regularized Algorithms for Vehicle Tractive Force Prediction and Mass Estimation**  
ISBN 978-3-7315-0807-6
- Band 63**     Péter Megyesi  
**Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten**  
ISBN 978-3-7315-0808-3
- Band 64**     Benedikt Reick  
**Methode zur Analyse und Bewertung von stufenlosen Traktorgetrieben mit mehreren Schnittstellen**  
ISBN 978-3-7315-0815-1
- Band 65**     Matthias Graf  
**Entwicklung und Validierung einer neuen Methode zur Charakterisierung des Scherverhaltens von Carbonfasergewebe mit Binderauftrag unter Normkraft und viskoser Reibung bei hohen Prozesstemperaturen**  
ISBN 978-3-7315-0838-0
- Band 66**     Christoph Kühn  
**Simulation von Fahrspielen und Energieflüssen in Nahverkehrssystemen**  
ISBN 978-3-7315-0740-6
- Band 67**     7. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 20. Februar 2019, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-0873-1
- Band 68**     Oliver Krauss  
**Experimentelle Untersuchungen zum Innengeräusch von Fahrzeugluftreifen**  
ISBN 978-3-7315-0867-0
- Band 69**     Tristan Reich  
**Beurteilung der Prüfprozesseignung bei Fahrzeugversuchen mit mobilen Arbeitsmaschinen**  
ISBN 978-3-7315-0848-9
- Band 70**     Matthias Bürckert  
**Realitätsnahe Bewertung des Einflusses der Oberflächenspannung flüssiger Zwischenmedien auf den maximalen Reibschluss zwischen Reifen und Fahrbahn**  
ISBN 978-3-7315-0891-5

- Band 71** Matthias Greiner  
**Verfahren zur Prädiktion des Rollwiderstands bei variablen Betriebsparametern auf Basis standardisierter Rollwiderstandsmessungen**  
ISBN 978-3-7315-0898-4
- Band 72** David Hummelberger  
**Hybride Werkstoffsysteme: Systematische Betrachtung und Bewertung der physikalischen Wirkmechanismen**  
ISBN 978-3-7315-0901-1
- Band 73** Michael Kerber  
**Analyse dynamischer Reifeneigenschaften und deren Auswirkung auf den Schwingungskomfort**  
ISBN 978-3-7315-0944-8
- Band 74** Kilian Berthold  
**Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze**  
ISBN 978-3-7315-0953-0
- Band 75** Bernd Wassertheurer  
**Reifenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation auf Schnee, Eis und nasser Fahrbahn**  
ISBN 978-3-7315-0957-8
- Band 76** Kai-Lukas Bauer  
**Echtzeit-Strategieplanung für vorausschauendes automatisiertes Fahren**  
ISBN 978-3-7315-0949-3
- Band 77** Thomas Schirle  
**Systementwurf eines elektromechanischen Fahrwerks für Megacitymobilität**  
ISBN 978-3-7315-0995-0
- Band 78** Dominik Dörr  
**Simulation of the thermoforming process of UD fiber-reinforced thermoplastic tape laminates**  
ISBN 978-3-7315-0998-1
- Band 79** Dominik Robert Naake  
**Simulation of damage mechanisms in weave reinforced materials based on multiscale modeling**  
ISBN 978-3-7315-1005-5

- Band 80** Martin Hohberg  
**Experimental investigation and process simulation of the compression molding process of Sheet Molding Compound (SMC) with local reinforcements**  
ISBN 978-3-7315-1007-9
- Band 81** Benedikt Fengler  
**Manufacturing-constrained multi-objective optimization of local patch reinforcements for discontinuous fiber reinforced composite parts**  
ISBN 978-3-7315-1006-2
- Band 82** Johannes Masino  
**Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors**  
ISBN 978-3-7315-1004-8
- Band 83** **11. Kolloquium Mobilhydraulik**  
**10. September 2020, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-1036-9
- Band 84** Felix Weber  
**Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile**  
ISBN 978-3-7315-1037-6
- Band 85** 8. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 23. Februar 2021, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-1071-0
- Band 86** Sebastian Fünfgeld  
**Vorausschauende Regelung von Fahrzeugsystemen durch stochastische Vorhersage der Fahrzeugdynamik**  
ISBN 978-3-7315-1060-4
- Band 87** Isabelle Charlotte Ays  
**Development of a CO<sub>2e</sub> quantification method and of solutions for reducing the greenhouse gas emissions of construction machines = Entwicklung einer CO<sub>2e</sub> Quantifizierungsmethode und von Lösungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Baumaschinen**  
ISBN 978-3-7315-1033-8

- Band 88** Alexander Bernath  
**Numerical prediction of curing and process-induced distortion of composite structures**  
ISBN 978-3-7315-1063-5
- Band 89** Nils Bulthaupt  
**Objektivierung des Schwingungskomforts schwerer Nutzfahrzeuge**  
ISBN 978-3-7315-1075-8
- Band 90** Lars Brinkschulte  
**Assistenzsysteme zur Reduktion des Schädigungsverhaltens von Komponenten einer mobilen Arbeitsmaschine**  
ISBN 978-3-7315-1089-5
- Band 91** Dominik Dörr  
**Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz**  
ISBN 978-3-7315-1090-1

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Fahrhinweise entwickelt, die den Fahrer dabei unterstützen sollen, seine Fahraufgabe möglichst energieeffizient zu meistern. Bei den Fahrhinweisen handelt es sich um ein Fahrerassistenzsystem. Daher werden im ersten Schritt bestehende Fahrerassistenzsysteme beschrieben und klassifiziert, bevor das in dieser Arbeit entwickelte Fahrerassistenzsystem näher erläutert wird. Im nächsten Schritt wird der Fahrstil eines Fahrers näher betrachtet und mit Hilfe eines auf Fuzzy-Logik basierenden Systems erkannt. Die Parameter dieses Systems können mit einer Methode, welche statistische Versuchsplanung mit evolutionären Algorithmen kombiniert, optimiert werden. Durch eine Einbeziehung des Fahrstils können die Hinweise adaptiv gestaltet werden. Eine weitere Möglichkeit die Hinweise an den Fahrer anzupassen ist, den Anzeigzeitpunkt unter Berücksichtigung der Reaktionszeit auf vorangegangene Hinweise zu verschieben. Diese Anpassung an die Reaktionszeit wird in einer Probandenstudie an einem statischen Fahrsimulator auf ihre Wirksamkeit überprüft.

