

Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik

Dirk Hülsebusch

Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung

Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit

Dirk Hülsebusch

**Fahrerassistenzsysteme zur
energieeffizienten Längsregelung**

Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 59**

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 Teilinstituten Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen.

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

Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung

Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit

von
Dirk Hülsebusch

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2017
Referenten: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter M. Knoll

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



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



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058
ISBN 978-3-7315-0755-0
DOI 10.5445/KSP/1000079367

Vorwort des Herausgebers

Die Fahrzeugtechnik ist gegenwärtig großen Veränderungen unterworfen. Klimawandel, die Verknappung einiger für Fahrzeugbau und -betrieb benötigter Rohstoffe, Digitalisierung, 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, Emissionsvermeidung, erhöhter Fahr-, Arbeits- und Datensicherheit, Benutzerfreundlichkeit, gemeinsamer Nutzbarkeit und angemessenen Kosten 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 mechatronisches System, die Mensch-Fahrzeug-Interaktion, das Fahrzeug in Verkehr und Infrastruktur sowie das Fahrzeug in Gesellschaft und Umwelt.

Der energiesparende Betrieb von Kraftfahrzeugen ist zur Schonung der Umwelt von erheblicher Bedeutung und wird daher von entsprechenden gesetzlichen Anforderungen geregelt. Ein prädiktiver teil- und vollautomatisierter Betrieb vernetzter Fahrzeuge kann zu deren Erfüllung einen deutlichen Beitrag liefern, da auf Basis detaillierter Informationen zum weit vorausliegenden Straßenverlauf und -zustand sowie zum Verkehrsgeschehen optimierte

Steuerungsabläufe bestimmt werden können, die hinsichtlich der Energieeinsparung auch erfahrenen Fahrern deutlich überlegen sind. Solche Energiesparassistenten sind in verschiedenen Serienfahrzeugen realisiert.

Weitgehend unberücksichtigt blieb bei diesen Assistenzsystemen bzw. automatisierten Fahrzeugsteuerungen bislang die über die eigene Fahrzeugstabilität und die Kollisionsvermeidung mit vorausfahrenden Fahrzeugen hinausgehende Fahrsicherheit. Die Fahrer nachfolgender Fahrzeuge könnten auf das geänderte Fahrverhalten eines energiesparend gesteuerten Fahrzeugs irritiert reagieren. Tatsächlich wurde beispielsweise zu dichtes Auffahren bei langangelegten Ausrollmanövern energiesparender Fahrzeuge beobachtet.

Herr Hülsebusch nimmt sich in seiner Arbeit dieses Themas an. Er untersucht Fahr- und Verkehrssituationen, in denen Energiesparassistenten negative Auswirkungen auf die Fahrsicherheit im nachfolgenden Verkehr haben können und erarbeitet energetisch günstige Vermeidungsstrategien für die Betriebsführung des Fahrzeugs.

Karlsruhe, 18.12.2017

Frank Gauterin

Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit

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

genehmigte
Dissertation
von

M.Sc. Dirk Hülsebusch

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2017
Referent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter M. Knoll

Kurzfassung

Die Steigerung der Fahrsicherheit und Energieeffizienz gehören zu den wichtigsten Treibern der Fahrerassistenz. Dabei impliziert eine energieeffiziente Fahrweise häufig auch eine sichere Fahrweise. Dagegen existieren jedoch auch Fahrstrategien, die zu einer Verschlechterung der Fahrsicherheit führen können. Insbesondere der Einfluss von energieeffizienten Fahrstrategien auf das Abstandsverhalten von nachfolgenden Fahrern wurde bisher noch nicht ausreichend untersucht. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit der Fragestellung, ob sich die Sicherheit verschlechtert, wenn das vorausfahrende Fahrzeug eine energieeffiziente Fahrweise anwendet. Des Weiteren werden Maßnahmen vorgeschlagen und erprobt, die in Zukunft eine Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Sicherheit und Energieeffizienz ermöglichen.

Im ersten Schritt wird zunächst der Einfluss eines Eco-ACC auf das Abstandsverhalten von nachfolgenden Fahrern im Realverkehr untersucht. Zur Analyse des Fahrverhaltens wird dazu ein Versuchsfahrzeug mit rückwärtsgerichteter Radarsensorik eingesetzt. Im Vergleich zum herkömmlichen ACC wird beim Eco-ACC die Folgefahrt zusätzlich durch eine gewisse Toleranz beim Abstand und durch ein vermindertes Folgeverhalten energieoptimiert. Die Ergebnisse zeigen, dass ein gewisser negativer Trend im zeitlichen Abstand der nachfolgenden Fahrer zu erkennen ist, wenn die Probanden mit Eco-ACC fahren. Um die Ergebnisse zu untermauern, wird darüber hinaus eine zweite Studie durchgeführt, bei der im Vergleich zum Eco-ACC Fahrstrategien mit einer größeren Vorausschau zum Einsatz kommen. Hier wird deutlich, dass eine vorausschauende Verzögerung vor einer

Geschwindigkeitsbegrenzung zu einem sicherheitskritischen Abstandsverhalten des nachfolgenden Fahrers führen kann. Beispielsweise steigt bei einer Verzögerung im Segelbetrieb von 90 km/h auf 50 km/h im Mittel der zeitliche Anteil von Zeitlücken unterhalb von 0,9 s auf 25 % im Vergleich zu einer Verzögerung mit der Betriebsbremse mit 0 %.

Zur Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen einer sicheren und energieeffizienten Fahrstrategie werden im nächsten Schritt verschiedene Ansätze vorgeschlagen. Besonders hervorzuheben ist hierbei das neuartige Konzept der Adaption, bei dem in Abhängigkeit des Fahrverhaltens von nachfolgenden Fahrern die Ego-Fahrstrategie angepasst wird. Für eine erste Bewertung dieses Konzepts wird darüber hinaus eine simulationstechnische Parameterstudie am Beispiel der Verzögerung vor Geschwindigkeitsbegrenzungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen, dass in vielen Situationen die Adaption der Fahrstrategie vorteilhaft ist. Ein hoher Nutzen im Hinblick auf die Fahrsicherheit ist insbesondere bei großen Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu erwarten. Des Weiteren ist bei großen Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eine hohe Sensorreichweite wünschenswert, um rechtzeitig die Fahrweise anpassen zu können. Die Unterschätzung des Verzögerungsverhaltens des nachfolgenden Fahrers hat dagegen einen geringeren Einfluss auf den Nutzen der Adaption. Darüber hinaus kann durch die Adaption die Energieeffizienz in den überwiegenden Situationen im Vergleich zur Verzögerung mit der Betriebsbremse erhöht werden.

Zur Validierung der Ergebnisse aus der Simulation wird im letzten Schritt eine weitere Studie im Realverkehr durchgeführt. Dazu wird in einem Versuchsfahrzeug mit Standard ACC eine energieeffiziente Verzögerungsstrategie in Verbindung mit dem Verfahren der Adaption umgesetzt. Um vorausschauend auf Änderungen der erlaubten Höchstgeschwindigkeit reagieren zu können, wird des Weiteren ein elektronischer Horizont eingesetzt, der Daten wie Höchstgeschwindigkeit und Steigung der Straße über den ADASIS v2 Standard bereitstellt. Bei Anwendung der Verzögerungsstrate-

gie mit Adaption kann im Mittel der zeitliche Anteil von Zeitlücken kleiner als 0,9 s auf 14 % im Vergleich zur Verzögerung im reinen Segelbetrieb mit 67 % deutlich reduziert werden. Dafür muss auf der anderen Seite im Mittel eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauches um ungefähr 90 % im Vergleich zur Verzögerung im Segelbetrieb in Kauf genommen werden. Allerdings kann im Gegensatz dazu bei nahezu vergleichbarer Fahrsicherheit der Kraftstoffverbrauch im Vergleich zur Verzögerung mit der Betriebsbremse im Mittel um 25 % reduziert werden.

Abstract

Driver Assistance Systems for Energy Efficient Longitudinal Control - Driving Safety Analysis and Optimisation

The most important drivers of driver assistance systems are improving driving safety and energy efficiency. In many cases, energy-efficient driving also implies a safe driving technique. In some cases, however, energy-efficient driving can lead to a decline in driving safety. The impact of energy-efficient driving strategies on the distance behaviour of following drivers has not yet been sufficiently analysed. This thesis therefore investigates whether an energy-efficient driving style by the forward vehicle leads to a decline in driving safety. Measures that may mitigate the trade-off between driving safety and energy efficiency are furthermore proposed and validated.

In the first step, the impact of an Eco-ACC System on the distance behaviour of following drivers is analysed through a study in real traffic. In order to analyse this driving behaviour, a test vehicle with rear radar sensors has been used. Compared to a conventional ACC, the follow control of the Eco-ACC is energy optimised based on a tolerance range instead of a fixed time headway and a reduced following behaviour. The results reveal that following drivers reduce the time headway if the test persons drive with an Eco-ACC. In order to confirm the results, a second study has been performed, in which driving strategies with a higher foresight are applied. Here, it becomes clear that a forward-looking deceleration in front of a speed limit sign can lead to a safety-critical distance behaviour by the following driver. For example, applying deceleration from 90 km/h to 50 km/h in coasting mode with a decoupled engine leads, on average, to an increase in the time headway

proportions below 0.9 s to 25 %, in comparison to deceleration using the mechanical brake, with 0 %.

In the next step, different concepts are proposed to mitigate the trade-off between safe and energy-efficient driving strategies. A new concept, called adaption, is especially mentioned. In this concept, the ego driving strategy is adapted to depend on the driving behaviour of the following driver. For a first evaluation, the concept of adaption has been analysed using a simulation-based parameter study that focusses on the use case of deceleration in front of speed limit signs. The results of the parameter study have shown that, in many situations, it is advantageous to adapt the driving strategy. A high benefit regarding driving safety can be expected, especially for large speed limit changes. With large speed limit changes, a high sensor range is furthermore preferable, in order to enable adapting the driving strategy far enough in advance. In contrast, an underestimation of the following drivers' deceleration behaviour has less impact on the benefit of the adaptation. In addition, in most cases, energy efficiency can be increased by using the adaptation concept, in comparison to deceleration using the mechanical brake.

As a final step, a third study in real traffic has been conducted to validate the simulation results. For this purpose, an energy-efficient deceleration strategy that uses the concept of adaption has been implemented into a conventional ACC system. In order to be able to react with foresight, an electronic horizon that provides speed limit and road grade information based on the ADASIS v2 protocol has been used. On average, using the adaptation deceleration strategy leads to a reduction in the proportion of time headways below 0.9 s to 14 %, in comparison to deceleration based on pure coasting and a decoupled engine, with 67 %. On the other hand, an average increase in fuel consumption of 90 % versus deceleration in coasting mode has to be accepted. Compared to deceleration using the mechanical brake, however, fuel consumption can be reduced, on average, by 25 %, with an almost comparable driving safety.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH im Produktbereich Fahrerassistenzsysteme am Standort Leonberg in Kooperation mit dem Institut für Fahrzeugsystemtechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Großen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung und des Hauptreferats aussprechen. Herr Gauterin hat durch Anregungen und fachliche Diskussionen in einem hohen Maße zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Nicht zuletzt möchte ich Herrn Gauterin für die Offenheit gegenüber externen Doktoranden und deren Einbindung in das Institutsgeschehen danken. Außerdem geht mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter M. Knoll für das entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferats. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich ganz herzlich Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova.

Großen Dank möchte ich auch Frau Dr.-Ing. Maike Salfeld für die firmenseitige Betreuung aussprechen. Nicht nur die regelmäßigen Rücksprachen und fachlichen Diskussionen, sondern auch das Interesse und die konstruktiven Ideen von Frau Salfeld haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Weiterhin danken möchte Herrn Dipl.-Ing. Stefan Knoll, der mir die Durchführung dieser Arbeit bei Bosch ermöglichte. Danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Lars Berding und Herrn M.Sc. Charbel Assaf, die mir in ihrer Funktion als Gruppenleiter bei organisatorischen Fragen stets zur Seite standen. Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei allen anderen Kollegen bei der

Robert Bosch GmbH für die Anregungen, Diskussionen und gemeinsamen Kaffeepausen bedanken.

An dieser Stelle geht mein Dank an die Diplomanden und Praktikanten, die während meiner Zeit als Doktorand von mir betreut wurden und mit hohem Engagement, Neugier sowie Spaß zu dieser Arbeit beigetragen haben. Danken möchte ich insbesondere Yinchao Xia, Igor Ponomarev, Andreas Grob, Gökhan Senyüz und Andreas Weimer.

Meinen Eltern danke ich für die stetige Unterstützung während meiner Zeit als Student und meinem Einstieg in das Berufsleben.

Sehr großer Dank aber geht an meine Frau Melissa, die während der gesamten Zeit stets um mein Wohl besorgt war und mich in schwierigen sowie anstrengenden Phasen an die anderen wichtigen und schönen Dinge im Leben erinnerte.

Stuttgart, im September 2017

Dirk Hülsebusch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	4
1.2	Zielsetzung	6
1.3	Aufbau der Arbeit	7
2	Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung	9
2.1	Energieeffiziente Fahrweisen	10
2.1.1	Verzögerung	11
2.1.2	Konstantfahrt	15
2.1.3	Beschleunigung	19
2.2	Umfelderfassung	22
2.2.1	Video	23
2.2.2	Radar	26
2.2.3	Lidar	32
2.2.4	Car-to-X	34
2.2.5	Elektronischer Horizont	38
2.3	Eco-Fahrerassistenzsysteme	43
2.3.1	Hinweise während der Fahrt	45
2.3.2	Automatisierung der Längsführung	52
2.4	Auswirkungen auf die Fahrsicherheit	62
2.5	Schlussfolgerungen und Fokussierung der Arbeit	69

3	Beeinflussung der Fahrsicherheit	
	durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer	73
3.1	Bewertungsgrößen	73
3.1.1	Energieeffizienz	74
3.1.2	Fahrsicherheit	75
3.2	Einflussfaktoren	77
3.2.1	Fahrertyp	78
3.2.2	Streckeneigenschaften	79
3.2.3	Verkehrsdichte	83
3.2.4	Fahrstrategien	84
3.2.5	Zusammenfassung	86
3.3	Festlegung des Untersuchungsgegenstandes	87
4	Untersuchung der Fahrsicherheit bei	
	Anwendung energieeffizienter Fahrstrategien	89
4.1	Energieeffiziente Folgefahrt mit Eco-ACC	89
4.1.1	Studiendesign	90
4.1.2	Aufbau des Versuchsfahrzeugs	91
4.1.3	Auswertung	93
4.1.4	Ergebnisse und Diskussion	99
4.2	Energieeffiziente Beschleunigung und Verzögerung bei Geschwindigkeitsbegrenzungen	107
4.2.1	Studiendesign	108
4.2.2	Aufbau des Versuchsfahrzeugs	117
4.2.3	Auswertung	118
4.2.4	Ergebnisse und Diskussion	123
4.3	Zusammenfassung	142
5	Entwurf von Strategien zur	
	Erhöhung der Fahrsicherheit	145
5.1	Lösungsansätze und deren Auswahl	146

5.1.1	Information	146
5.1.2	Kooperation	148
5.1.3	Adaption	149
5.1.4	Auswahl des Lösungsansatzes	152
5.2	Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens	154
5.2.1	Stimulus-Response	156
5.2.2	Safety-Distance	161
5.2.3	Action-Point	162
5.2.4	Fuzzy-Logic	163
5.2.5	Cellular Automata	165
5.2.6	Zusammenfassung und Auswahl	166
5.3	Algorithmen zur Adaption von energieeffizienten Fahrstrategien	167
5.3.1	Regelbasiert	168
5.3.2	Optimierungsbasiert	174
5.4	Parameterstudie zur regelbasierten Adaption	179
5.4.1	Simulationsmodell	180
5.4.2	Parameter	189
5.4.3	Bewertungsgrößen	191
5.4.4	Ergebnisse	192
5.5	Zusammenfassung	198

6 Validierung der regelbasierten

	Adaption im Fahrversuch	201
6.1	Aufbau des Versuchsfahrzeugs	201
6.1.1	Vernetzung der Komponenten	202
6.1.2	Erweiterungen des ACC	204
6.2	Studiendesign	208
6.2.1	Teststrecke und Fahrstrategien	208
6.2.2	Ablauf	210
6.3	Auswertung	210

6.4	Ergebnisse und Diskussion	211
6.4.1	Einzelergebnisse	211
6.4.2	Gesamtergebnis	214
6.5	Zusammenfassung	220
7	Zusammenfassung	223
8	Ausblick	229
A	Statistische Tests	231
A.1	Median-Test für 2 unabhängige Stichproben	231
A.2	Median-Test für k unabhängige Stichproben	232
A.3	Kruskal-Wallis-Test für k unabhängige Stichproben	233
B	Radarsensoren	235
B.1	Bosch LRR3	235
B.2	Bosch MRR rear	236
C	Versuchsfahrzeuge	237
D	Abkürzungsverzeichnis	239
E	Symbolverzeichnis	243
F	Literaturverzeichnis	249
G	Betreute Arbeiten	303
H	Vorabveröffentlichungen	305

1 Einleitung

Der durch Treibhausgase verursachte Klimawandel erfordert baldige sowie nachhaltige Maßnahmen [130, 131]. Erste weltweit verbindliche Ziele zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen wurden mit dem Kyoto-Protokoll von 1997 verabschiedet [1]. Das Kyoto-Protokoll schreibt vor, den Treibhausgasausstoß der Industrienationen im Zeitraum von 2008 bis 2012 um durchschnittlich 5 % im Vergleich zum Jahr 1990 zu reduzieren. Für den daran anschließenden Zeitraum von 2013 bis 2020 verpflichteten sich auf der UN-Klimakonferenz 2012 in Doha einige Staaten, die Treibhausgase weiter zu verringern [2]. Die bis heute verweigerte Ratifizierung durch die USA [110], der Ausstieg von Kanada [257] und die Ausnahmen für Schwellenländer wie China führten jedoch dazu, dass wichtige Nationen weder zu einer Reduktion verpflichtet wurden noch einen Beitrag leisteten.

Das Paris-Abkommen der UN-Klimakonferenz 2015 gibt nun neuen Anlass zur Hoffnung auf weltweit verbindliche Klimaschutzziele für die Zeit nach 2020. Zu der wichtigsten Vereinbarung, die die Regierungsvertreter von 195 Staaten einstimmig unterzeichneten, gehört die Begrenzung des Anstiegs der jährlichen Durchschnittstemperatur auf unter 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau [289].

Um das Zwei-Grad-Ziel zu erreichen, muss auch der Verkehr als einer der Hauptverursacher seinen entsprechenden Beitrag leisten. In der Europäischen Union (EU28) lag 2013 der Anteil des Straßenverkehrs¹ beim CO_2 -Ausstoß bei 18,5 % bezogen auf die gesamten Treibhausgasemissio-

¹ Straßenverkehr hat den Sector Code 1.A.3

nen² [13]. Zur Reduktion der durch den Straßenverkehr verursachten CO_2 -Emissionen wurden 2009 und 2014 entsprechende Verordnungen von der EU erlassen. Für 2015 liegt das Flottenziel für Neuwagen bei $130\text{ g }CO_2/km$ [4]. Ab dem Jahr 2020 muss die Neuwagenflotte im Mittel dann die Grenze von $95\text{ g }CO_2/km$ erreichen [5]. Werden die Ziele nicht erreicht, sind pro gCO_2/km und verkauften Neuwagen Strafzahlungen der Automobilhersteller an die EU fällig [4, 5].

Die Automobilindustrie verfolgt verschiedene Strategien, um die CO_2 -Emissionen sowie den Energiebedarf zu senken. Ein wesentliches Potenzial stellt dabei die Reduktion der Fahrwiderstände dar. Im Stadtverkehr und bei häufigen Beschleunigungsvorgängen hat die Fahrzeugmasse den größten Einfluss auf den Energiebedarf [95]. Schlüsselfaktoren bei der Reduktion der Fahrzeugmasse sind neue Bauweisen sowie Werkstoffe wie Aluminium und kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) [96]. Der BMW i3 ist das erste Großserienfahrzeug, bei dem die Fahrgastzelle aus CFK hergestellt wird [220]. Bei höheren Geschwindigkeiten hat dagegen der Luftwiderstand den ausschlaggebenden Einfluss auf den Energiebedarf [95]. Hauptansatzpunkt bietet die Optimierung des Luftwiderstandbeiwertes (c_w), da die Stirnfläche (A) nur durch eine andere Sitzposition wie zum Beispiel beim Ein-Liter-Auto von VW wesentlich vermindert werden kann. Reduzierungen von 1 % bis 3 % sind durch optimierte Felgen und aerodynamische Elemente möglich [313]. 5 % bis 10 % können mit einem verbesserten Unterboden oder Kühlerluftjalousien, die abhängig vom Kühlbedarf die Luftmenge regulieren, erreicht werden [313, 308]. Als weiterer Potenzialbereich gilt der Rollwiderstand, der durch eine Optimierung der Reifen gesenkt werden kann [22, 292].

Neben der Verringerung der Fahrwiderstände ist eine Reduzierung des Fahrzeugenergiebedarfes und des CO_2 -Ausstoßes durch eine Erhöhung der Energieeffizienz des Antriebsstranges und der Nebenaggregate möglich. Beim

² ohne Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) und indirekte CO_2 -Emissionen

Verbrennungsmotor lässt sich die Energieeffizienz beispielsweise durch Maßnahmen wie Aufladung und Downsizing erhöhen [94]. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Hybridisierung des Verbrennungsmotors. Hierbei wird zum Beispiel bei einem parallelen Hybrid der Verbrennungsmotor durch eine elektrische Maschine unterstützt. Dabei ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, um die Energieeffizienz zu erhöhen. In Verbindung mit dem elektrischen Energiespeicher kann während Verzögerungsvorgängen ein Teil der kinetischen Energie gespeichert und beim nächsten Beschleunigungsvorgang wieder eingesetzt werden [241]. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor durch Lastpunktanhebung in einem Bereich mit höherem Wirkungsgrad zu betreiben [241]. Weitere Effizienzsteigerungen können durch die Anwendung eines vollelektrischen Antriebs, der seine Energie aus einer Batterie bzw. aus einem Brennstoffzellensystem erhält, erreicht werden [59, 125]. Auf Basis der Kenntnis des vorausliegenden Lastprofils ist es zudem möglich, die Betriebsweise der einzelnen Energiewandler und Energiespeicher zu optimieren [41].

Als weiterer Ansatzpunkt zur Reduzierung des Energiebedarfs und der Emissionen gilt die Optimierung der Fahrweise, die auch häufig unter dem Begriff Spritspar-Tipps bekannt ist [98, 258, 291]. In erster Linie geht es bei diesen Spritspar-Tipps darum, den Verbrennungsmotor in einem optimalen Bereich zu betreiben und durch eine vorausschauende Fahrweise die kinetische und potenzielle, das heißt, Lageenergie des Fahrzeugs optimal auszunutzen. Beispielsweise wird bei der Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug oder vor einer Lichtsignalanlage frühzeitig mit der Verzögerung durch Ausrollen im Schubbetrieb oder im Leerlauf begonnen. Die Anwendung einer vorausschauenden Fahrweise verhindert, dass die kinetische Energie ungenutzt durch die mechanische Bremse abgebaut werden muss [171]. Jedoch hängt die Umsetzung solcher Strategien stark vom individuellen Wissen, Wollen und Können des Fahrers ab [167, 263, 77]. Deshalb werden seit einiger Zeit Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer bei einer energieeffizienten Fahrweise unterstützen. Grundsätzlich lassen

sich diese Fahrerassistenzsysteme in zwei Gruppen einteilen. Im einfachen Fall werden dem Fahrer Empfehlungen über eine energieoptimale Fahrweise mithilfe einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI³) gegeben. Als HMI dient beispielsweise eine Anzeige im Kombi-Instrument oder in der Mittelkonsole [156]. Im anderen Fall wird die Fahrzeuglängsregelung vom Fahrerassistenzsystem übernommen. Der Fahrer muss dann nur noch die Längsbewegung überwachen und die Querregelung des Fahrzeugs übernehmen [222, 296]. Durch die automatisierte Längsregelung ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten einer energieoptimalen Fahrweise. Beispielsweise kann das Geschwindigkeitsprofil hinsichtlich der vorausliegenden zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und der Topografie global optimiert werden [303, 236].

1.1 Motivation

Neben der Reduzierung des Energiebedarfs und der Emissionen ist die Erhöhung der Fahrsicherheit ein weiteres wichtiges Thema, das die Automobilindustrie beschäftigt. Abgesehen von Maßnahmen zur Erhöhung der passiven Sicherheit werden auch immer mehr Systeme der aktiven Sicherheit im Fahrzeug installiert [6]. In den überwiegenden Fällen lässt sich feststellen, dass ein energieeffizientes Fahrverhalten auch zu einem sichereren Fahrverhalten führt [326]. Wie oben bereits erläutert, ist vorausschauendes Fahren eines der wichtigsten Prinzipien, um den Kraftstoffverbrauch zu senken. Beim vorausschauenden Fahren reagiert der Fahrer frühzeitig auf vorausliegende Ereignisse sowie Verkehrsteilnehmer und versucht deren Verhalten zu antizipieren. Dadurch wird in der Regel ein größerer Sicherheitsabstand zum vorderen Fahrzeug gehalten, wodurch sich die Fahrsicherheit erhöht. Diese Art der Fahrweise wird in sogenannten Eco-Fahrertrainings⁴

³ HMI - Human Machine Interface bzw. Human Machine Interaction

⁴ Eco ist eine Abkürzung für ökonomisch und wird in dieser Arbeit als Synonym für energieeffizient verwendet

geschult. Die Auswertungen mehrerer Flottenbetreiber zeigen, dass die Teilnahme an einem Eco-Fahrertraining nicht nur zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, sondern auch zu einer Reduzierung von Unfällen führt [115, 183, 227].

Neben der positiven gegenseitigen Beeinflussung besteht in manchen Situationen auch ein Konflikt zwischen einer energieeffizienten und sicheren Fahrweise. Beispielsweise kann das Beibehalten der Geschwindigkeit bzw. Aufrechterhalten der kinetischen Energie dazu führen, dass der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug verringert wird und es bei einer unvorhersehbaren Bremsung zu einem Auffahrunfall kommt [224]. Ähnlich sieht es bei einer Kurvendurchfahrt aus, wenn die Geschwindigkeit zur Erhaltung der kinetischen Energie zu wenig reduziert wird und die Stabilität des Fahrzeugs gefährdet ist. Auch die Vermeidung von Anhaltevorgängen vor Kreuzungen und Fußgängerüberwegen birgt ein hohes Gefahren- und Unfallrisiko [114]. Ein sehr hohes Risiko und nicht legales Verhalten besteht beim Kolonnenfahren mit geringem Abstand, um den Luftwiderstand zu reduzieren [326]. Unvorhersehbare Bremsungen des vorderen Fahrzeugs führen hier häufig zu schweren Auffahrunfällen. Das bedeutet, Abstand und Geschwindigkeit müssen immer so gewählt werden, dass genügend Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug besteht und die eigene Stabilität des Ego-Fahrzeugs⁵ zu jeder Zeit gewährleistet ist. Jedoch auch bei angemessener Wahl von Geschwindigkeit und Abstand zum Vordermann besteht des Weiteren ein Risiko durch die Beeinträchtigung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern aufgrund einer veränderten und unerwarteten Längsdynamik des Ego-Fahrzeugs. In der Literatur wird hier häufig das frühzeitige und langsame Verzögern im Schub- oder Segelbetrieb genannt [66, 114, 224, 194, 218]. Nachfolgende Verkehrsteilnehmer können sich dadurch irritiert oder bevormundet fühlen. Als mögliche Reaktionen werden zum Beispiel sehr dichtes Auffahren oder gefährliche Überholmanöver ge-

⁵ Mit dem Begriff Ego ist immer das eigene Fahrzeug gemeint

nannt, die bei plötzlichen Bremsungen des Ego-Fahrzeugs oder bei Gegenverkehr schnell zu Unfällen führen [66, 114, 224]. Die Ergebnisse einer Befragung zeigen, dass sich zudem auch der Fahrer des Ego-Fahrzeugs durch ein dichtes Auffahren von nachfolgenden Fahrzeugen unter Druck gesetzt fühlen kann [121]. Mögliche Reaktionen des Fahrers des Ego-Fahrzeugs können hier der Abbruch oder die Verschiebung bzw. Verkürzung der Verzögerung sein [218]. Des Weiteren sind auch sicherheitskritische Fahrmanöver, wie beispielsweise Ausweichen an den Fahrbahnrand oder auf die Gegenfahrbahn, mögliche Reaktionen des Ego-Fahrers.

1.2 Zielsetzung

Die vorangegangenen Beispiele zeigen, dass energieeffizientes Fahren häufig ein sicheres Fahrverhalten impliziert. Auf der anderen Seite existieren jedoch auch Fahrweisen, die zu einem Konflikt zwischen Sicherheit und Energieeffizienz führen können. Hier stellt sich die Frage, inwieweit Fahrerassistenzsysteme einen Beitrag leisten können. Ziel der folgenden Arbeit ist deshalb erstens zu analysieren, ob sich die positiven und negativen Auswirkungen hinsichtlich der Fahrsicherheit auch auf Eco-Fahrerassistenzsysteme übertragen lassen und ob gegebenenfalls weitere hinzukommen. Zweitens sollen insbesondere die kritischen Fahr- und Verkehrssituationen identifiziert werden, bei denen der Zielkonflikt deutlich wird. Drittens sollen qualitativ und quantitativ die Beeinträchtigungen bei der Energieeffizienz und Fahrsicherheit ermittelt werden. Im vierten und letzten Schritt sollen Konzepte zur Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Energieeffizienz und Fahrsicherheit entwickelt sowie ihre Wirksamkeit nachgewiesen werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird im Kapitel 2 der Stand der Technik und Wissenschaft bezüglich Eco-Fahrerassistenzsysteme und deren Auswirkungen auf die Fahrsicherheit erfasst. Dazu werden zunächst energieeffiziente Fahrweisen und ihr mögliches Einsparpotenzial vorgestellt. Danach werden relevante Sensortechnologien erläutert, die zur Umfelderkennung bei Eco-Fahrerassistenzsystemen eingesetzt werden. Des Weiteren werden die verschiedenen Umsetzungsarten von Fahrerassistenzsystemen zur energieeffizienten Längsregelung und ihr Einsparpotenzial vorgestellt. Abschließend werden bereits vorhandene Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Beeinflussung der Sicherheit von Eco-Fahrerassistenzsystemen erläutert und alle wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst sowie die weitere Ausrichtung der Arbeit auf die Beeinflussung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer motiviert.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Beeinflussung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer bei Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien. Dazu werden im ersten Schritt physikalische Größen für die Beschreibung von Sicherheit und Energieeffizienz definiert, um später eine objektive Bewertung durchführen zu können. Im nächsten Schritt werden Faktoren abgeleitet, die bei Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien einen Einfluss haben und vermutlich zu einer Verstärkung oder Abschwächung des Zielkonfliktes zwischen Fahrsicherheit und Energieeffizienz führen.

Auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 3 werden in Kapitel 4 die Auswirkungen einer energieeffizienten Fahrweise auf die Sicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer mit zwei Studien im Realverkehr untersucht. In der ersten Studie werden die Auswirkungen eines Eco-ACC⁶ Systems mit energieoptimierter Folgeregelung auf das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern analysiert. Die zweite Studie beschäftigt sich

⁶ ACC - Adaptive Cruise Control

mit der Beeinträchtigung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer bei Anwendung energieeffizienter Fahrstrategien, die auf einem erweiterten Vorausschauhorizont basieren.

In Kapitel 5 werden auf Grundlage der gesammelten Erkenntnisse verschiedene Konzepte vorgeschlagen, um den Konflikt zwischen einer energieeffizienten Fahrweise und einem sicheren Fahrverhalten von nachfolgenden Fahrern zu entschärfen. Zu den Konzepten gehören die Information, Kooperation und die Adaption. Danach wird das ausgewählte Konzept der Adaption weiterentwickelt und in einer Simulationsumgebung getestet. Wichtige Lösungsschritte sind die Modellierung des Folgeverhaltens sowie Algorithmen zur Adaption von energieeffizienten Fahrstrategien.

Mithilfe einer weiteren Messfahrtenstudie im Realverkehr werden in Kapitel 6 die Ergebnisse aus der Simulation validiert. Dazu wird das Standard-ACC um eine energieeffiziente Verzögerungsstrategie erweitert und zusätzlich der Algorithmus zur Adaption der Verzögerungsstrategie implementiert.

Abschließend werden in Kapitel 7 die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und in Kapitel 8 ein Ausblick über offene Fragestellungen und den weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen zur energieeffizienten Längsregelung gegeben.

2 Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik und Wissenschaft im Bereich von Fahrerassistenzsystemen zur energieeffizienten Fahrzeuglängsregelung dargestellt. Dazu werden zunächst energieeffiziente Fahrweisen aufgezeigt, die während der Beschleunigung, Verzögerung und Konstantfahrt zu einer Verringerung des Energiebedarfs bzw. Kraftstoffverbrauchs führen (s. Abschnitt 2.1). Der darauffolgende Abschnitt 2.2 beschäftigt sich mit Systemen zur Erfassung des Fahrzeugumfeldes, die für die Realisierung von Assistenzsystemen zur energieeffizienten Längsregelung erforderlich sind. Dazu gehören einerseits verschiedene Sensortechnologien sowie Systeme zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation¹ für den nahen und mittleren Bereich. Die Erfassung von größeren Entfernungsbereichen erfolgt über einen sogenannten elektronischen Horizont. Im nächsten Abschnitt werden Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung thematisiert (s. Abschnitt 2.3). Dazu gehören Systeme, die den Fahrer bei Routenwahl vor der Fahrt im Hinblick auf einen geringeren Kraftstoffverbrauch unterstützen. Während der Fahrt wird der Fahrer bei der Umsetzung einer energieeffizienten Fahrweise mithilfe von Systemen unterstützt, die ihn informieren oder die Längsführung überwiegend übernehmen. Abschnitt 2.4 beschäftigt sich mit vorhandenen Erkenntnissen über Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung und deren Auswirkung auf die Fahrsicherheit. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst und die offenen Fragestellungen hinsichtlich der Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen zur

¹ Car-to-Car ist die englische Übersetzung und wird auch häufig mit C2C abgekürzt

energieeffizienten Längsregelung formuliert sowie die Fokussierung der Arbeit abgeleitet (s. Abschnitt 2.5).

2.1 Energieeffiziente Fahrweisen

Neben den Fahrwiderständen und dem Wirkungsgrad des Antriebstranges hat auch die Fahrweise einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf. Die Fahrweise wird im Wesentlichen durch den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit und der Beschleunigung charakterisiert. Durch die Anpassung der Fahrweise an die vorausliegenden Streckeneigenschaften und das Verkehrsgeschehen kann eine erhebliche Einsparung beim Kraftstoffverbrauch erzielt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Fahrweise nicht unabhängig von der Antriebsstrangtechnologie betrachtet werden kann. Beispielsweise tritt bei Fahrzeugen mit rein elektrischem Antrieb der geringste streckenspezifische Verbrauch bei niedrigeren Geschwindigkeiten im innerstädtischen Verkehr auf. Im Vergleich dazu liegt bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen der geringste streckenspezifische Verbrauch bei mittleren Geschwindigkeiten bzw. tritt im außerstädtischen Bereich auf [125]. Bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen sind Berechnungen und Abschätzungen zu Folge Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch von bis zu 45 % möglich [105, 226].

Eine energieeffiziente Fahrweise kennzeichnet sich im Wesentlichen durch die im Folgenden zusammengefassten Kriterien [77, 89, 258, 14, 291]:

- Vorausschauend fahren und unnötige Beschleunigungen sowie Verzögerungen vermeiden
- Kinetische und potenzielle Energie durch frühzeitiges Verzögern im Schub-, Rekuperations- oder Segelbetrieb nutzen
- Möglichst mit moderaten Geschwindigkeiten fahren

Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor lassen sich zusätzlich folgende Empfehlungen zusammenfassen [77, 89, 258, 14, 291]:

- Zügig beschleunigen und früh hochschalten
- Mit geringer Motordrehzahl und in einem möglichst hohem Gang fahren
- Abschalten des Motors im Stillstand

Im Folgenden wird nun auf die verschiedenen Möglichkeiten einer energieeffizienten Fahrweise genauer eingegangen. Dabei werden für eine erforderliche Verzögerung, Konstantfahrt und Beschleunigung verschiedene Fahrstrategien aufgezeigt, die zu einer Reduzierung des Energiebedarfs führen.

2.1.1 Verzögerung

In den Bereich der Verzögerung gehören alle Situationen, bei denen die Fahrzeuggeschwindigkeit (v_{Start}) aufgrund sich ändernder Streckeneigenschaften oder veränderter Verkehrslage verringert werden muss (v_{Ziel}). Beispiele hierfür sind die Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, enge Kurven, langsamere vorausfahrende Fahrzeuge oder Lichtsignalanlagen, bei denen die Grünphase nicht erreicht werden kann. Für die Realisierung einer möglichst energieeffizienten Verzögerung gilt es, soweit wie möglich, die kinetische und potenzielle Energie des Fahrzeugs für die Überwindung der Fahrwiderstände zu nutzen. Eine Möglichkeit ist die Entkopplung des Antriebstranges von den Rädern. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor kann dieser zusätzlich abgeschaltet werden und zu einer weiteren Reduktion des Energiebedarfs beitragen [222]. Dieser Zustand des Antriebstranges wird auch als Freilauf oder Segelbetrieb bezeichnet (s. Abbildung 2.1). Bei Abschaltung des Verbrennungsmotors ist darauf zu achten, dass alle sicherheitsrelevanten Funktionen wie Lenkunterstützung und Bremskraftverstärkung erhalten bleiben.

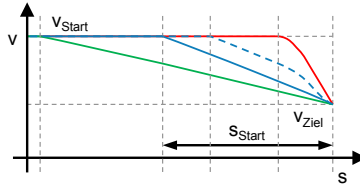


Bild 2.1: Qualitativer Geschwindigkeitsverlauf für verschiedene Verzögerungsarten: Segelbetrieb (grün), Schubbetrieb (blau), Rekuperation (blau gestrichelt) und Bremsen (rot)

Um dies zu ermöglichen, werden derartige Funktionen elektrifiziert und über einen entsprechenden Speicher oder zusätzlichen Generator mit elektrischer Energie versorgt [201].

Ist beispielsweise aufgrund eines zu geringen Abstandes (s_{Start}) zum Tempolimit die Verzögerung im Segelbetrieb nicht mehr ausreichend bzw. die Verzögerung zu gering, eignet sich je nach Art des Antriebsstranges eine Verzögerung mittels Rekuperation oder im Schubbetrieb. Bei Anwendung der Rekuperationsbremsung wird die elektrische Maschine als Generator betrieben und die kinetische bzw. potenzielle Energie teilweise in elektrische Energie umgewandelt. Des Weiteren wird die elektrische Energie in einem geeigneten Energiespeicher, wie z.B. einer Batterie oder Supercap², zwischengespeichert und steht somit unter anderem für spätere Beschleunigungsvorgänge teilweise wieder zur Verfügung. Aufgrund der anfallenden Energiewandlungsverluste in Generator und Batterie kann nur ein Teil der Bremsenergie gespeichert werden. Diese Art der Verzögerung ist folglich weniger effizient als die Nutzung des Segelbetriebes und führt zu einem höheren Energiebedarf [160].

Bei einem Fahrzeug mit verbrennungsmotorischem Antrieb ist der Schubbetrieb eine weitere Möglichkeit zur Verzögerung. Im Vergleich zum Segelbetrieb wird hierbei der Antriebsstrang nicht von den Rändern entkoppelt,

² Supercap steht für Superkondensator und kann im Vergleich zu herkömmlichen Kondensatoren eine große Energiemenge in kurzer Zeit speichern und wieder abgeben

sondern das Fahrzeug wird zusätzlich mit dem Schleppmoment des Verbrennungsmotors verzögert. Um Kraftstoff einzusparen, wird gleichzeitig die Kraftstoffzufuhr abgeschaltet. Im Vergleich zur Verzögerung mit Rekuperation wird die Energie zur Überwindung des Schleppmomentes in thermische Energie gewandelt und kann somit nicht mehr genutzt werden. Auch diese Art der Verzögerung führt demnach zu einem höheren Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Segel- oder Rekuperationsbetrieb [76].

Sind die erreichbaren Verzögerungen mittels Rekuperation und Schubbetrieb nicht mehr ausreichend, muss zusätzlich die Radbremse aktiviert werden. In diesem Fall wird im Vergleich zur Verzögerung mittels Rekuperation oder Schubbetrieb das Einsparpotenzial weiter gesenkt. Für eine energieeffiziente Fahrweise ist deshalb eine große Vorausschau bezüglich der Streckeneigenschaften und Verkehrslage essenziell, um möglichst früh und rechtzeitig mit der Verzögerung beginnen zu können [160].

Simulationsrechnungen zeigen [77], dass bei einer Verzögerung von 100 km/h auf 50 km/h bei Anwendung des Leerlaufsegelns im Vergleich zu einer Verzögerung mit moderater Bremsbeschleunigung eine Verbrauchseinsparung von ca. 65 % erzielt werden kann. Dagegen verlängert sich die Fahrzeit um ca. 30 % (s. Tabelle 2.1).

Verzögerung von	Leerlaufsegeln			Schubbetrieb		
	Kraftstoff- einsparung	Zeit- verlust	Start- abstand	Kraftstoff- einsparung	Zeit- verlust	Start- abstand
100 km/h auf 50 km/h	65 %	30 %	1350 m	44 %	15 %	800 m
80 km/h auf 50 km/h	35 %	12 %	700 m	25 %	6 %	400 m

Tabelle 2.1: Kraftstoffeinsparung und Zeitverlust sowie Startabstand bei Beginn der Verzögerung für verschiedene Verzögerungsstrategien auf einer Strecke von 1500 m bezogen auf eine Fahrt mit moderater Bremsverzögerung [77]

Im Schubbetrieb liegt die Einsparung bei 44 % und der Zeitverlust bei ca. 15 %. Damit am Schild eine Geschwindigkeit von 50 km/h erreicht wird, muss im Segelbetrieb ungefähr 1350 m vorher mit der Verzögerung begonnen werden. Im Schubbetrieb verkürzt sich der Startabstand auf ca. 800 m. Die Startabstände bestätigen, dass die Informationen über die vorausliegenden zulässigen Höchstgeschwindigkeiten früh genug verfügbar sein müssen, um rechtzeitig mit der Verzögerung beginnen zu können. In Verbindung mit dem Zeitverlust wird außerdem ersichtlich, dass derartige Strategien erheblich von einer Fahrweise mit konstanter Geschwindigkeit und anschließender Verzögerung mit der Radbremse abweichen. Für kleinere Differenzen zwischen Start- und Zielgeschwindigkeit verringern sich entsprechend der Verbrauchsvorteil und auch der Zeitverlust sowie der notwendige Startabstand der Verzögerung. Weiteres Einsparpotenzial ergibt sich beim Segeln mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor im Vergleich zum Leerlaufsegeln. Ähnlich verhält es sich bei der Nachbildung des Schubbetriebes mittels Rekuperation. Auch hier kann, wie bereits erwähnt, das Einsparpotenzial durch Rekuperation der Bremsenergie weiter erhöht werden.

Dennoch ist bezüglich der Ergebnisse anzumerken, dass der Verbrauchsvorteil und Zeitverlust auf einer Strecke von 1500 m berechnet wurde und somit fast nur die Verzögerung berücksichtigt (vgl. Startabstand 1350 m). Bei der Betrachtung von mehreren Verzögerungssituationen auf längeren Streckenabschnitten würde sich der Verbrauchsvorteil und der Zeitverlust relativieren. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass das Bezugsszenario mit einer moderaten Bremsung sehr pessimistisch hinsichtlich eines durchschnittlichen Fahrers ist. Ein durchschnittlicher Fahrer wird vermutlich früher mit der Verzögerung beginnen. Zum Beispiel wird er zunächst im Schubbetrieb beginnen und kurz vor Erreichen der Geschwindigkeitsbegrenzung mit einer Bremsung abschließen. Das Einsparpotenzial von energieeffizienten Fahrweisen im realen Fahrbetrieb wird in Abschnitt 2.3 näher erläutert.

Einen Sonderfall stellen Verzögerungsvorgänge vor Lichtsichtsignalanlagen (LSA) dar, wenn durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit die Grünphase

noch erreicht werden kann. Oder wenn die LSA von roter zu grüner Phase wechselt und die Geschwindigkeit verringert werden muss, um möglichst die kinetische Energie zu erhalten. Ist der Stillstand nicht mehr zu vermeiden, wird im Leerlauf oder Schubbetrieb bis in den Stillstand verzögert [77, 255].

2.1.2 Konstantfahrt

Zur Konstantfahrt gehören die Abschnitte einer Strecke, bei denen die Fahrzeuggeschwindigkeit keiner Änderung bedarf und quasi konstant gehalten werden kann. Wird in diesen Abschnitten dennoch eine Abweichung der Geschwindigkeit zwischen v_{min} und v_{max} zugelassen, sind Effizienzsteigerungen bzw. Einsparungen beim Energiebedarf möglich. Zum einen kann der Energiebedarf durch Ausnutzung der topografischen Verhältnisse gesenkt werden [234, 138, 92, 118, 206]. Auf der anderen Seite besteht insbesondere bei Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb die Möglichkeit, durch eine intermittierende Fahrweise, die auch Sägezahnfahrweise genannt wird, den Verbrennungsmotor in Bereichen mit höherem Wirkungsgrad zu betreiben und dadurch den Kraftstoffverbrauch zu verringern [105, 77, 194, 100, 172, 158, 174].

Bei Ausnutzung der topografischen Verhältnisse wird das Fahrzeug als Energiespeicher betrachtet. Dabei wird entweder ein Teil der potenziellen Energie des Fahrzeugs in kinetische Energie umgewandelt oder ein Teil der kinetischen Energie des Fahrzeugs genutzt, um die Hangabtriebskraft zu überwinden und den restlichen Teil in potenzielle Energie zu wandeln. In Abhängigkeit des Steigungsverlaufes kann dadurch im Vergleich zu einer Fahrweise mit konstanter Geschwindigkeit der Leistungsbedarf verringert werden und der Verbrennungsmotor beispielsweise für längere Zeit in einem Bereich mit höherem Wirkungsgrad betrieben oder abgeschaltet werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Anzahl der Schaltvorgänge zu verringern und folglich den Energiebedarf weiter zu senken.

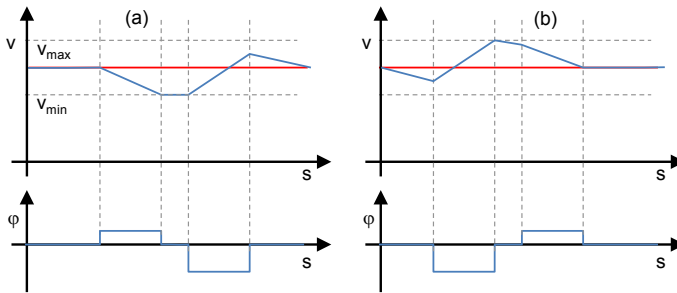


Bild 2.2: Ausnutzung der topografischen Verhältnisse (blau) im Vergleich zur Konstantfahrt (rot) bei verschiedenen Steigungsprofilen (a) und (b).

Die Idee einer variablen Geschwindigkeit wird nachfolgend anhand eines einfachen Beispiels exemplarisch erläutert, bei dem die Nutzung des Segelbetriebes zu einer Reduzierung des Energiebedarfs angewendet wird. Liegt beispielsweise eine Erhebung voraus (s. Teil (a) in Abbildung 2.2), wird zunächst die Geschwindigkeit konstant gehalten.

Die kinetische Energie des Fahrzeugs wird im darauffolgenden Abschnitt eingesetzt, um z.B. während des gesamten Anstieges im Segelbetrieb verzögern zu können. Das Ende des Anstieges kann somit mit der unteren Geschwindigkeit des Toleranzbandes erreicht werden. Die Geschwindigkeit wird nun so lange konstant gehalten, bis das Fahrzeug den Abschnitt mit negativer Steigung erreicht. Im Bereich des Abstiegs wird die potenzielle Energie des Fahrzeugs wieder in kinetische Energie gewandelt und das Fahrzeug im Segelbetrieb beschleunigt. Nach Erreichen der Ausgangshöhe wird die aufgebaute kinetische Energie zur Überwindung der Fahrwiderstandskräfte eingesetzt, bis das Fahrzeug wieder die Wunschgeschwindigkeit erreicht. Durch die Zulassung eines Toleranzbandes um die Wunschgeschwindigkeit kann im zuvor erläuterten Beispiel das Fahrzeug weite Teile der Strecke im Segelbetrieb zurücklegen und dadurch im Vergleich zu einer konstanten Fahrweise den Energiebedarf senken.

Vergleichbares Einsparpotenzial besteht bei einem vorausliegenden Tal (s. Teil (b) in Abbildung 2.2). Um im Abschnitt mit negativer Steigung einen möglichst großen Teil der potenziellen Energie in kinetische Energie umwandeln zu können, wird zunächst prädiktiv die Geschwindigkeit verringert. Im darauffolgenden Abstieg wird ein Teil der potenziellen Energie des Fahrzeugs in kinetische Energie umgewandelt und die Geschwindigkeit bis zum oberen Ende des Geschwindigkeitstoleranzbandes erhöht. Die gespeicherte Energie dient in den nachfolgenden Abschnitten dazu, die Fahrwiderstände zu überwinden, so dass zum Ende des Anstieges die Ausgangsgeschwindigkeit wieder erreicht wird.

Das Einsparpotenzial einer derartigen Fahrweise variiert unter anderem in Abhängigkeit des Steigungsverlaufes und der Fahrzeugmasse. Weitere Einflussfaktoren sind das Antriebskonzept und die möglichen Betriebszustände wie Zug-, Schub- und Segelbetrieb. Simulationsrechnungen zeigen, dass das Einsparpotenzial bei einem 40 t Lastkraftwagen (Lkw) mit optimierter Fahrweise im Vergleich zu einem herkömmlichen Tempomaten bei bis zu 13 % liegt. Der Zeitverlust ist dabei mit Werten bis 1,5 % vernachlässigbar klein [119]. Bei einem Personenkraftwagen (Pkw) der Kompaktklasse mit rein verbrennungsmotorischem Antrieb liegt die Reduzierung bei bis zu 8 % im Vergleich zu einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit [138].

Neben der Ausnutzung der topografischen Verhältnisse kann auch in der Ebene durch eine intermittierende Fahrweise der Kraftstoffbedarf reduziert werden. Bei einer intermittierenden Fahrweise wird ähnlich wie bei einem Fahrzeug mit Hybridantrieb eine Lastpunktanhebung durchgeführt. Die Lastpunktanhebung führt dazu, dass der Verbrennungsmotor in einem Bereich mit höherem Wirkungsgrad betrieben wird. Jedoch wird nicht wie beim Hybrid die überschüssige Energie in einem Energiespeicher zwischengespeichert, sondern in kinetische Energie umgewandelt und das Fahrzeug dadurch beschleunigt. Die Lastpunktanhebung wird so lange aufrechterhalten (t_d), bis eine definierte obere Schwelle der Geschwindigkeit erreicht ist.

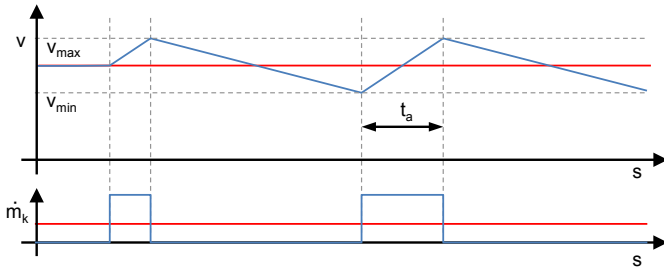


Bild 2.3: Geschwindigkeitsverlauf (v) einer intermittierenden Fahrweise mit Motorabschaltung während des Segelbetriebes (blau) und konstante Fahrweise (rot). Resultierende Kraftstoffmassenströme (\dot{m}_k) (unten)

Bei Erreichen der oberen Schwelle wird der Verbrennungsmotor vom restlichen Antriebsstrang entkoppelt und das Fahrzeug im Leerlauf bzw. Segelbetrieb verzögert. Erreicht das Fahrzeug die untere Schwelle, wird der Verbrennungsmotor wieder mit dem Antriebsstrang gekoppelt und der Ablauf beginnt von Neuem. Wie bei den zuvor erläuterten Verzögerungsstrategien kann der Kraftstoffbedarf weiter gesenkt werden, wenn während des Segelbetriebes der Motor abgeschaltet wird (s. Abbildung 2.3).

In der Arbeit von Dorrer wurde für ein Fahrzeug mit Automatikgetriebe das Einsparpotenzial für verschiedene Geschwindigkeitsintervalle untersucht [77], wobei während den Beschleunigungsphasen der Verbrennungsmotor immer im wirkungsgradoptimierten Bereich betrieben wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h und einer Änderung von ± 10 km/h der Kraftstoffverbrauch um 8,5 % reduziert werden kann. Mit einer Verringerung des Intervalls auf $\pm 2,5$ km/h ist eine weitere Reduzierung des Kraftstoffverbrauches um 1,3 % auf 9,8 % möglich.

Die Simulationsergebnisse einer weiteren Arbeit zeigen ähnliche Einsparpotenziale. Lee kommt in seiner Arbeit zu dem Ergebnis, dass bei kürzeren Beschleunigungsphasen und niedrigeren Geschwindigkeiten der Kraftstoffverbrauch weiter gesenkt werden kann [172]. Bei einem Geschwindigkeits-

intervall zwischen 64 km/h und 80 km/h sowie einer Beschleunigungszeit von 25 s ist im Vergleich zu einer Fahrt mit 72 km/h eine Reduzierung von 14 % möglich. Wird die Beschleunigungszeit auf 10 s verkürzt, kann die Einsparung auf 16 % erhöht werden. Bei gleicher Beschleunigungszeit und einem Intervall zwischen 48 km/h und 64 km/h ist laut [172] eine Verminderung des Kraftstoffverbrauches um 35 % im Vergleich zu einer Fahrt mit 56 km/h möglich. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Dorrer wurde hier während der Verzögerungsphase der Verbrennungsmotor ausgeschaltet. Des Weiteren handelt es sich um ein Fahrzeug mit manuellem Getriebe.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Kombination aus Lastpunktanhebung mit elektrischer Maschine und der zuvor erläuterten Lastpunktanhebung durch Variation der Geschwindigkeit dar [194]. Im Vergleich zu einer reinen Lastpunktanhebung bei 70 km/h ist durch die zusätzliche Variation der Geschwindigkeit um $\pm 2,5$ km/h eine Erhöhung der Kraftstoffeinsparung von 8,6 % auf 8,9 % möglich. Außerdem lassen sich durch die zusätzliche Lastpunktanhebung mittels elektrischer Maschine die Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen verlängern und somit vermutlich der Komfort und folglich die Akzeptanz derartiger Strategien erhöhen [194].

Durch die Möglichkeit einer intermittierenden Fahrweise und der Ausnutzung der topografischen Verhältnisse ergeben sich somit vielfältige Möglichkeiten, den Energiebedarf während der Konstantfahrt zu optimieren.

2.1.3 Beschleunigung

Neben Verzögerung und Konstantfahrt ist auch eine Optimierung des Beschleunigungsvorganges möglich. Im Vergleich zur Verzögerung ist für die Wahl der Beschleunigungsstrategie auch entscheidend, innerhalb welcher Distanz die Beschleunigung erfolgen soll. Für die Verzögerung ist die Distanz durch die Differenz zwischen aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit (v_{Start}) und Zielgeschwindigkeit (v_{Ziel}) sowie durch das Ausrollverhalten des Fahrzeugs vorgegeben. Bei Beschleunigungsvorgängen ist diese Dis-

tanz grundsätzlich frei wählbar und wird nur durch das Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs nach unten begrenzt. Simulationstechnische Untersuchungen für einen Kleinwagen mit verbrennungsmotorischem Antrieb [331] zeigen, dass die beiden Forderungen: „Beschleunige mit möglichst geringem Energieeinsatz

- von 60 km/h auf 100 km/h“ oder
- innerhalb von 900 m von 60 km/h auf 100 km/h“

zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich eines energieoptimalen Beschleunigungsverhaltens führen. Wird nur die Start- und Zielgeschwindigkeit definiert und bleibt die Strecke frei wählbar, verläuft die energieoptimale Beschleunigung nahe der Beschleunigung mit maximalem Motormoment. Im Vergleich zur Beschleunigung entlang der Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs kann somit einerseits der Energiebedarf um 1,6 % und der Zeitbedarf zum Erreichen der Geschwindigkeit von 100 km/h um 8,9 % reduziert werden. Dagegen sind die zurückgelegten Wegstrecken unterschiedlich und führen zu einem abweichenden Ergebnis beim streckenspezifischen Energiebedarf. Die optimierte Beschleunigung erfordert dann eine Erhöhung des streckenspezifischen Energieeinsatzes von 7 % bezogen auf den Beschleunigungsvorgang entlang der Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs [331]. Für die Gestaltung des Beschleunigungsvorganges sind demnach neben den Fahrzeugeigenschaften nicht nur die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und die Zielgeschwindigkeit ausschlaggebend, sondern auch die Distanz des Beschleunigungsabschnittes, innerhalb dessen die Zielgeschwindigkeit erreicht sein muss. Wird für die Optimierung des Beschleunigungsvorganges eine Strecke (s_a) von 900 m definiert, innerhalb derer die Zielgeschwindigkeit erreicht sein muss, verändert sich das Beschleunigungsverhalten [331]. Der optimierte Beschleunigungsvorgang führt nun zu einem wesentlich flacheren Verlauf

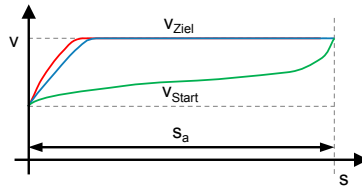


Bild 2.4: Geschwindigkeitsverläufe während des Beschleunigungsvorganges: Beschleunigung mit maximalem Motormoment (rot), Beschleunigung entlang der Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs (blau) und energieoptimierte Beschleunigung (grün), nach [331]

und erreicht erst am Ende die geforderte Zielgeschwindigkeit von 100 km/h (s. Abbildung 2.4).

Bei dieser optimierten Beschleunigung kann der Energiebedarf im Vergleich zur Beschleunigung entlang der Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs um 10 % reduziert werden. Im Gegensatz dazu erhöht sich bei dieser Fahrweise der Zeitbedarf um 19 %, um die anfangs definierte Strecke von 900 m zurückzulegen [331]. Der flachere Verlauf des optimierten Beschleunigungsvorganges kann dadurch begründet werden, dass ein zu frühes Beschleunigen auf die Zielgeschwindigkeit schon früh zu hohen Fahrwiderständen führt und dadurch einen höheren Energiebedarf verursacht. Aus diesem Grund wird zu Beginn erst leicht beschleunigt und erst gegen Ende durch eine Anhebung des Motormomentes das Erreichen der Zielgeschwindigkeit sichergestellt.

Auch in weiteren Studien werden in der Simulation Strategien mit verminderter bzw. verhaltender Beschleunigung untersucht [105]. Im Vergleich zur Beschleunigung entlang der Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs wird beim Energiebedarf ein Einsparpotenzial von bis zu 25 % ermittelt. Dagegen muss auch hier ein erhöhter Zeitverlust toleriert werden. Für eine Beschleunigung von 50 km/h auf 100 km/h wird in Abhängigkeit verschiedener topografischer Verhältnisse ein Energieeinsparpotenzial von

5 % bis 15 % bei einem Zeitverlust von bis zu 10 % im Vergleich zu einem dynamischen Fahrer angegeben [105].

Zur Begrenzung der Länge des Beschleunigungsabschnittes bietet es sich an, alternativ neben dem Energiebedarf auch andere Größen wie die Durchschnittsgeschwindigkeit und Fahrzeit als Optimierungskriterien heranzuziehen. In einer anderen Arbeit wird dieses Problem mit einer sogenannten Fahr-Ergebnis-Zahl gelöst, die nicht nur den streckenspezifischen Kraftstoffverbrauch sondern auch die Durchschnittsgeschwindigkeit bei der Wahl der Beschleunigung berücksichtigt [77]. Insgesamt ist festzuhalten, dass bei Beschleunigungsvorgängen der energieoptimale Geschwindigkeitsverlauf von der Art des Antriebstranges, z.B. verbrennungsmotorisch oder elektrisch, sowie von der Start- und Zielgeschwindigkeit abhängig ist. Ein weiterer Einflussfaktor sind die Fahrwiderstände wie zum Beispiel der Luftwiderstand oder die Fahrzeugmasse. Simulationen von Anfahrvorgängen für ein Nutzfahrzeug zeigen, dass eine schnelle Beschleunigung mit 0,12 g auf eine Zielgeschwindigkeit von 72 km/h zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauches von ungefähr 4 % im Vergleich zu einer langsamen Beschleunigung mit 0,02 g führt [271].

2.2 Umfelderkennung

Grundlage von Fahrerassistenzsystemen bilden Systeme zur Erfassung des Umfeldes. Für Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung ist insbesondere der mittlere bis ferne Bereich von Interesse, um die Fahrweise vorausschauend und frühzeitig den Gegebenheiten anzupassen. Für den nahen und mittleren Bereich (bis 250 m) werden häufig video-, radar- sowie lidarbasierte Sensoren verwendet. Dabei werden die verschiedenen Sensortechnologien abhängig von den zu erfassenden Objektmerkmalen eingesetzt bzw. kombiniert. Beispielsweise eignen sich radarbasierte Sensoren für die genaue Bestimmung des Abstandes und der Relativgeschwindigkeit eines Objektes. Dagegen sind Videosensoren besser für

die Bestimmung der Breite bzw. Höhe eines Objektes geeignet. Für größere Entfernungsbereiche kommen Systeme zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug und Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation (Car-to-Infrastructure) zum Einsatz. Diese Systeme eignen sich für die Übertragung von Informationen über das aktuelle Verkehrsgeschehen an nachfolgende Fahrzeuge, z.B. frühzeitige Information über temporäre Geschwindigkeitsbegrenzungen. Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, wie beispielsweise bei entsprechend ausgestatteten Lichtsignalanlagen, ermöglicht eine Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit an den aktuellen Zustand der Lichtsignalanlage (Ampelphase), um Verzögerungen und Stillstände zu vermeiden. Ein weiterer wichtiger Bestandteil zur Umfelderkennung bildet der elektronische Horizont, der in vielen Fällen aus einer elektronischen Karte und einem Satellitennavigationssystem besteht. Unter Voraussetzung der Kenntnis der Route eines Fahrzeugs können mithilfe des elektronischen Horizontes über mehrere Kilometer die Streckeneigenschaften, wie z.B. die Straßensteigung und die zulässige Höchstgeschwindigkeit, vorhergesagt werden.

2.2.1 Video

Videosensoren basieren auf dem photoelektrischen Effekt. Dabei wird zunächst das von einem Gegenstand reflektierte Licht mit einem Linsensystem gebündelt und von einem sogenannten Bildsensor (Imager), dessen Sensorfläche in einzelne Bildpunkte unterteilt ist, aufgenommen. Im nächsten Schritt wandelt der Bildsensor die aufgenommene Strahlung in elektrische Ladung um. Anschließend wird mithilfe einer elektrischen Verstärkerschaltung das Signal jedes einzelnen Bildpunktes verstärkt und mit einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert und zur Weiterverarbeitung in einem flüchtigen Speicher abgelegt.

Bei Videosensoren für Kfz-Anwendungen kommen überwiegend Active Pixel-Sensoren (APS) zum Einsatz. Active Pixel-Sensoren basieren auf der Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)- Technologie und

werden deshalb häufig auch als CMOS-Sensoren bezeichnet [178]. Im Vergleich zu Charged Coupled Device (CCD)-Sensoren, die häufig in Kleinbildkameras verwendet werden, haben CMOS-Sensoren den Vorteil, dass sie über eine größere Helligkeitsdynamik verfügen. Eine Weiterentwicklung des CMOS ist der High Dynamic Range CMOS (HDRC). Beim HDRC wird mit einer logarithmischen Funktion der Lichtleistung und dem resultierenden Bildsignal das Verhalten des menschlichen Auges nachgebildet und somit eine Helligkeitsdynamik von mehr als 120 dB ermöglicht [268, 305]. Dadurch können auch Szenen mit großen Helligkeitsunterschieden gut dargestellt werden. Dazu gehören beispielsweise entgegenkommende Fahrzeuge mit eingeschaltetem Scheinwerfer oder Hell-Dunkel-Übergänge während Tunnelleinfahrten [305]. Des Weiteren sind CMOS-Sensoren nur während des Auslesevorganges aktiv und verfügen deshalb im Vergleich zur CCD-Technologie nur über einen vergleichsweise geringen Energiebedarf und folglich über eine geringe Wärmeabgabe. Außerdem ist der Auslesevorgang bei CMOS-Sensoren im Vergleich zu CCD-Sensoren wesentlich schneller, da er nicht seriell sondern parallel verläuft. Bei CMOS-Sensoren können Ausleseraten bis in den Bereich von mehreren MHz erreicht werden [268]. Aufgrund des seriellen Auslesevorganges neigen CCD-Sensoren im Vergleich zu CMOS-Sensoren auch zum Blooming-Effekt [305]. Blooming entsteht bei CCD-Sensoren ausgehend von bereits stark belichteten Pixeln, die keine weitere Ladung mehr aufnehmen können. Über die vorgesehenen Verbindungen zwischen den einzelnen Pixeln, die zur Auslesung der Pixelinformationen benötigt werden, wird die überschüssige Ladungsmenge an benachbarte Pixel übertragen und führt so zu einem hellen Streifen im Bild. Abhängig von der gewünschten Funktion werden die von der Kamera aufgenommenen Bilder entweder aufbereitet und direkt wiedergegeben oder weiterverarbeitet. Beispielsweise wird beim Nachtsicht-Assistenten mit einer Infrarotkamera die Situation vor dem Fahrzeug erfasst, entsprechend aufbereitet, ggf. mit Informationen angereichert und auf einer Anzeige im Kombiinstrument wiedergegeben [253]. Bei Funktionen, die auf Fahrbahn- oder

Objektinformationen beruhen, werden die notwendigen Daten mit entsprechenden Algorithmen zur Bildverarbeitung extrahiert. Typische Informationen können beispielsweise Fahrbahnmarkierungen [192], Verkehrsschilder [85] [185], Lichtsignalanlagen [176], Straßentypen [270], Objektpositionen oder auch die Klasse von Objekten sein [143].

In Abhängigkeit von den Informationen, die für die Umsetzung einer bestimmten Fahrerassistenzfunktion benötigt werden, kommen Mono- oder Stereo-Kamerasysteme zum Einsatz. Für die Erkennung von Fahrbahnmarkierungen und Verkehrszeichen sind Mono-Kamerasysteme ausreichend. Unter bestimmten Modellannahmen, z.B. konstanter Objektbreite, ist es auch mit Mono-Kamerasystemen möglich, den Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen zu schätzen [267, 178]. Ist jedoch eine genaue Bestimmung des Abstandes zu einem Objekt erforderlich, werden bevorzugt Stereo-Kamerasysteme eingesetzt, die beispielsweise durch Bestimmung der Disparität eine direkte Entfernungsmessung ermöglichen und nicht auf Modellannahmen zurückgreifen müssen [178]. Jedoch sind der Bestimmung der Disparität und somit der Entfernungsmessung Grenzen gesetzt. Bei zunehmender Entfernung eines Objektes nimmt die Disparität ab und führt bei einer begrenzten Auflösung der Kamera zu Ungenauigkeiten. Der Fehler bei der Entfernungsbestimmung wächst quadratisch mit der Entfernung. Dadurch ergeben sich bei reinen Stereo-Kamerasystemen Reichweiten von bis zu 80 m [69].

Des Weiteren ist die Leistungsfähigkeit von optischen Sensoren stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Dazu gehören beispielsweise die Beleuchtungs- und Wetterverhältnisse. Bei Regen oder Schnee sowie Nebel kann die Sicht sehr eingeschränkt sein und zu einer erheblichen Verschlechterung der Detektionseigenschaften und zu einer Reduktion der Reichweite führen [267].

2.2.2 Radar

Bei einem Radarsensor³ werden elektromagnetische Wellen ausgesendet und nach Reflektion an einem Objekt wieder empfangen. Abhängig vom Modulationsverfahren wird der Abstand zum reflektierenden Objekt direkt oder indirekt über die Laufzeit des Signals gemessen. Des Weiteren wird die Relativgeschwindigkeit des reflektierenden Objektes entweder über eine Differentiation des Abstandes berechnet oder mithilfe des sogenannten Dopplereffektes bestimmt [305, 317].

Der Dopplereffekt beschreibt das Phänomen, dass sich die Frequenz einer ausgesendeten elektromagnetischen Welle ändert, wenn zwischen dem Radarsensor und dem reflektierenden Objekt eine Relativgeschwindigkeit ($\Delta v = v_{\text{Radar}} - v_{\text{Objekt}}$) besteht. Ist die Relativgeschwindigkeit negativ und vergrößert sich der Abstand zum reflektierenden Objekt, so verringert sich die Frequenz. Die Frequenz wird dagegen erhöht, wenn eine positive Relativgeschwindigkeit vorliegt und sich das Objekt annähert und der Abstand verringert. Die Frequenzänderung f_{Doppler} berechnet sich aus der radialen Relativgeschwindigkeit Δv_r und der Trägerfrequenz des ausgesendeten Radarsignals f_0 (s. Gleichung 2.1) [317].

$$f_{\text{Doppler}} = 2 \cdot \Delta v_r \cdot \frac{f_0}{c} \quad (2.1)$$

Bei einer im Automobilbereich typischen Trägerfrequenz von $f_0 = 76,5 \text{ GHz}$ ergibt sich durch den Dopplereffekt eine Verschiebung der Frequenz von $f_{\text{Doppler}} \approx 510 \cdot \Delta v_r \cdot \text{m}^{-1}$. Hat das reflektierende Objekt beispielsweise eine Relativgeschwindigkeit von $\Delta v_r = 10 \text{ m/s}$ ergibt sich somit eine Dopplerfrequenz von $f_{\text{Doppler}} \approx 5,1 \text{ kHz}$. Im Vergleich zur Trägerfrequenz ist die Dopplerfrequenz auch bei hohen Relativgeschwindigkeiten vergleichsweise gering und ist deshalb auf direktem Wege nicht messbar. Um dennoch den Dopplereffekt nutzen zu können, wird das ausgesendete Signal $u_G(t)$

³ RADAR - Radio Detection and Ranging

(s. Gleichung 2.2) und empfangene Signal $u_E(t)$ (s. Gleichung 2.3) einem Mischer zugeführt. Der Mischer multipliziert die Eingangssignale, so dass sich auf Basis des Additionstheorems (s. Gleichung 2.4) von harmonischen Schwingungen am Ausgang ein Summensignal ergibt (s. Gleichung 2.5) [317].

$$u_G(t) = A_G \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi_0) \quad (2.2)$$

$$u_E(t) = A_E \cdot \cos(2\pi(f_0 - 2\Delta v_r \cdot f_0 \cdot c^{-1})t + \varphi_r) \quad (2.3)$$

$$\cos(x) \cdot \cos(y) = 0,5 \cdot (\cos(x - y) + \cos(x + y)) \quad (2.4)$$

$$u_{EG}(t) = 0,5 \cdot A_E A_G \cdot (\cos(4\pi \cdot \Delta v_r \cdot f_0 c^{-1} t + \varphi_0 - \varphi_r) + \cos(2\pi(2f_0 - 2\Delta v_r \cdot f_0 c^{-1})t + \varphi_0 + \varphi_r)) \quad (2.5)$$

Das Ausgangssignal $u_{EG}(t)$ setzt sich aus einer Schwingung mit der Dopplereffrequenz $f_{Doppler}$ und einer Schwingung mit der zweifachen Trägerfrequenz f_0 zusammen (s. Gleichung 2.5). Mithilfe eines Tiefpassfilters kann nun die hochfrequente Schwingung gedämpft und die Dopplereffrequenz gemessen werden.

Wie zu Beginn schon angedeutet, können für die Messung von Abstand und Relativgeschwindigkeit verschiedene Modulationsverfahren eingesetzt werden. In der Automobiltechnik werden überwiegend Verfahren mit Amplitudenmodulation und Verfahren mit Frequenzmodulation verwendet [317].

Bei der Pulsmodulation werden für eine kurze Zeitdauer einige Wellen ausgesendet und nach der Reflektion an einem Objekt wieder empfangen. Über die Laufzeit des Signals und der Lichtgeschwindigkeit kann somit der Abstand zum Objekt direkt gemessen werden. Bei der einfachen Pulsmodulation ist eine Auswertung der Dopplereffrequenz nicht möglich. Die Relativ-

geschwindigkeit wird hier über die Differentiation des Abstandes bestimmt. Im Vergleich zur einfachen Pulsdemodulation wird bei der kohärenten Pulsdemodulation das zuvor erläuterte Mischen des ausgesendeten und empfangenen Pulses eingesetzt, um eine Änderung der Frequenz bzw. die Dopplerfrequenz zu messen und die Relativgeschwindigkeit zu bestimmen. Das kohärente Pulsdemodulationsverfahren wird deshalb oft auch als Puls-Doppler-Verfahren bezeichnet [317].

Ein weiteres Verfahren, das häufig zur Anwendung kommt, ist die Frequenzmodulation. Hier wird im Gegensatz zur Pulsmodulation die Frequenz zeitlich variiert. Die Bestimmung des Abstandes erfolgt dabei auf indirektem Wege auf Basis der Frequenzänderung zwischen empfangenem und ausgesendetem Signal.

Die Frequenz kann auf verschiedenen Wegen moduliert werden. In der Automobiltechnik kommen im Wesentlichen die folgenden Verfahren zur Anwendung [317, 312]:

- Frequency Shift Keying (FSK)
- Frequency Modulated Shift Keying (FMSK)
- Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)
- Chirp Sequence Modulation

Stellvertretend wird im weiteren Verlauf auf das FMCW-Verfahren eingegangen, das im Rahmen dieser Arbeit in der verwendeten Radarsensorik zum Einsatz kommt [317]. Bei diesem Verfahren wird die Frequenz der ausgesendeten Wellen linear bzw. rampenförmig in Abhängigkeit der Zeit verändert (s. Abbildung 2.5). Abhängig von der Entfernung und der Relativgeschwindigkeit Δv_r eines reflektierenden Objektes verschiebt sich die empfangene (f_E) gegenüber der ausgesendeten Frequenzrampe (f_G) nur zeitlich (Δt) oder auch nach oben bzw. unten ($f_{Doppler}$). Besteht keine Relativgeschwindigkeit zwischen aussendendem Radarsensor und reflektierendem

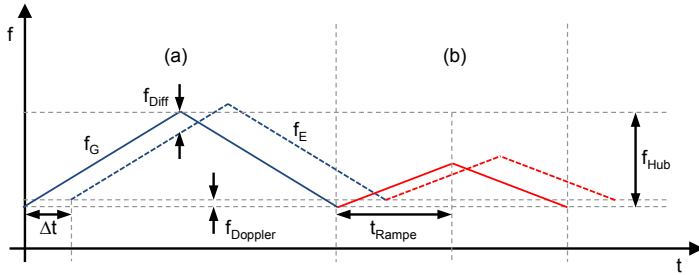


Bild 2.5: Ausgesendete und empfangene Frequenzrampen beim FMCW-Verfahren (nach [317])

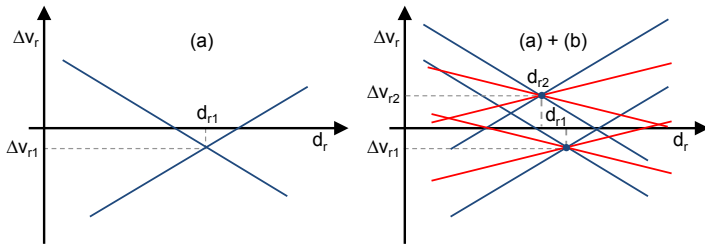


Bild 2.6: Relativgeschwindigkeits-Abstands-Diagramm mit einem Ziel (a) und mehreren Zielen (a)+(b) (nach [317])

Objekt, so vergrößert sich die Differenzfrequenz f_{Diff} mit dem Abstand. Kommt zusätzlich noch eine Relativgeschwindigkeit hinzu und nähert sich das reflektierende Objekt an, verringert sich die Differenzfrequenz um die Dopplerverschiebung $f_{Doppler}$.

Aufgrund der zwei Einflussgrößen Abstand d_r und Relativgeschwindigkeit Δv_r , die zu einer Änderung der Differenzfrequenz führen, ergibt sich im zugehörigen $\Delta v_r - d_r$ Diagramm eine Gerade (s. Abbildung 2.6). Um die Mehrdeutigkeit aufzuheben, ist eine weitere Messung mit einer Frequenzrampe, die eine abweichende Steigung hat, erforderlich. Bei Anwendung einer Rampe mit negativer Steigung vergrößert sich wie bei einer Rampe

mit positiver Steigung die Differenzfrequenz mit dem Abstand. Jedoch nähert sich das Objekt zusätzlich an, wird die Differenzfrequenz im Gegensatz zu einer positiven Rampe zusätzlich vergrößert. Mit der zusätzlichen Rampe lässt sich die Mehrdeutigkeit aufheben. Der Schnittpunkt beider Geraden im $\Delta v_r - d_r$ Diagramm kennzeichnet das detektierte Objekt mit zugehöriger Relativgeschwindigkeit und zugehörigem Abstand.

Bei Detektierung von mehreren Objekten entstehen im $\Delta v_r - d_r$ Diagramm auch mehrere Schnittpunkte. Jedoch handelt es sich bei dem Beispiel in Abbildung 2.6 bei zwei Schnittpunkten lediglich um Scheinziele. Um diese Scheinziele auszuschließen, werden weitere Frequenzrampen mit abweichender Steigung ausgesendet. Danach werden nun nur die Objekte berücksichtigt, bei denen sich alle Rampen im gleichen Punkt schneiden. Bei einer geringen Anzahl von Objekten können somit Scheinziele überwiegend ausgeschlossen werden (s. Abbildung 2.5) [317].

Die Zeitdauer t_{Rampe} der Frequenzrampen liegt im Bereich von mehreren Millisekunden und bestimmt dabei die Auflösung der Relativgeschwindigkeit. Dagegen wird die Auflösung der Abstandsmessung im Wesentlichen durch die Bandbreite bzw. den Frequenzhub der Rampe festgelegt f_{Hub} [317].

Als Trägerfrequenz kommt neben 76 - 77 GHz auch der Frequenzbereich zwischen 24,0 GHz und 24,25 GHz zum Einsatz. Des Weiteren steht für die Zukunft der Bereich zwischen 77 und 81 GHz, der das auslaufende 24 GHz Ultra Wide Band (UWB) ersetzen soll, zur Verfügung [113, 249]. Radarsensoren mit einer Trägerfrequenz bei 24 GHz sind im Vergleich zu Sensoren mit 77 GHz meist kostengünstiger [306, 312]. Jedoch haben sie bei gleichbleibender Antennengröße eine größere Strahlbreite und somit eine schlechtere Winkelauflösung. Um beispielsweise eine vergleichbare Winkeltrennfähigkeit zu erreichen, benötigen 24 GHz Sensoren eine 3-mal so große Antenne [113]. Sensoren im 24 GHz Bereich eignen sich deshalb für den mittleren Entfernungsbereich von bis zu 100 m [317].

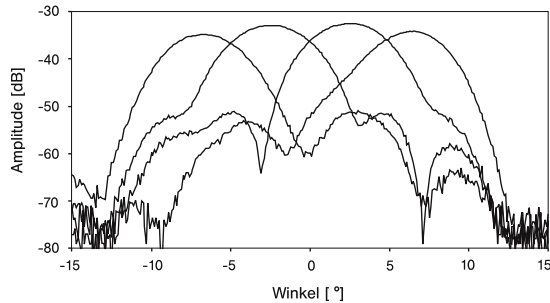


Bild 2.7: Antennendiagramm eines 4-strahligen Radarsensors. Nachdruck mit Genehmigung von Springer Nature: [305] © 2006

Neben der Bestimmung von Relativgeschwindigkeit und radialem Abstand eines detektierten Objektes ist auch der Versatz zur Sensorlängsachse bzw. der Winkel von großem Interesse. Nur so kann beispielsweise entschieden werden, ob sich ein Objekt auf der eigenen oder auf der Nachbarfahrspur befindet. Zur Bestimmung des Winkels kommen im Wesentlichen zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz. Beim sogenannten Scanning wird die Antenne mechanisch geschwenkt und innerhalb eines Messzyklus der gesamte Erfassungsbereich abgetastet. Das Scanningverfahren zeichnet sich durch seine Genauigkeit bei der Winkelbestimmung sowie durch die Möglichkeit aus, dass auch Objekte anhand ihres Winkels voneinander getrennt werden können [317]. Im Gegensatz zum Scanningverfahren wird bei Mehrstrahlverfahren die Antenne nicht bewegt, sondern es werden mindestens zwei überlagerte Radarstrahlen ausgesendet. Auf Basis der Amplitudenverhältnisse der empfangenen Radarstrahlen sowie des bekannten Antennendiagramms kann der Winkel des Objektes zur Sensorlängsachse geschätzt werden. Abbildung 2.7 zeigt ein Antennendiagramm eines 4-strahligen Sensors. Im Gegensatz zu Videosensoren sind Radarsensoren wesentlich unempfindlicher gegen schlechte Wetterverhältnisse wie z.B. Regen und Nebel [113, 267]. Des Weiteren lassen sich mit Radarsensoren für den Automobilbereich

Entfernungen bis 250 m messen und somit eine größere Vorausschau erzielen [93]. Vorteilhaft im Vergleich zu anderen Sensortechnologien ist auch die Möglichkeit des verdeckten Einbaus. Beispielsweise können Radarsensoren hinter der Stoßstange platziert werden und ermöglichen somit eine größere Flexibilität bei der Wahl des Einbauortes und des Fahrzeugdesigns [248]. Dagegen haben Radarsensoren gegenüber Videosensoren Nachteile in der Bestimmung der Objektbreite und der genauen lateralen Position. Weiterhin gestaltet sich die Abschätzung der Höhe bzw. der Überfahrbarkeit eines Objektes bei Radarsensoren erheblich schwieriger als bei Videosensoren. Nicht zuletzt ist auch die Klassifikation von Objekten unzuverlässiger, da nicht wie bei Videosensoren Informationen über die Kontur, Texturierung und Abmessungen von Objekten zur Verfügung stehen bzw. sich nur ungenau schätzen lassen [267]. Verbesserung der Objektdaten insbesondere des lateralen Abstands und Typs sind deshalb Anforderungen an die nächste Generation von Radarsensoren [112]. Um die sich in ihren technischen Eigenschaften oft konträr zueinander verhaltenden Eigenschaften bei Radar- und Videosensoren auszugleichen, gehen die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auch in Richtung der Kombination beider Technologien bzw. Fusion der Messdaten [178].

2.2.3 Lidar

Lidarsensoren⁴ funktionieren ähnlich wie Radarsensoren. Im Vergleich zu Videosensoren handelt es sich wie beim Radarsensor nicht um ein passives sondern um ein aktives Messverfahren. Die Wellenlänge der ausgesendeten elektromagnetischen Wellen liegt im Bereich von 800 nm bis 1000 nm. Aufgrund des guten Signal-Rausch-Verhältnisses wird die von Laserdioden ausgesendete Infrarotstrahlung überwiegend als Puls moduliert [102]. Anhand des Vergleichs zwischen ausgesendetem und empfangenem Signal kann die Laufzeit und somit, unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit

⁴ LIDAR - Light Detection and Ranging

keit, die Entfernung zum reflektierenden Objekt bestimmt werden. Die Pulsdauern des ausgesendeten Signals liegen bei Lidarsensoren im Bereich von 30 ns. Des Weiteren erreichen die eingesetzten Hochleistungslaserdioden eine Spitzenstrahlungsleistung von bis zu 70 W [102]. Für den Empfang des reflektierten Signals werden häufig PIN-Dioden⁵ oder Avalanchedioden (APD⁶) eingesetzt, wobei Avalanchedioden über eine höhere Empfindlichkeit und besseres Signal-Rausch-Verhältnis im Vergleich zu PIN-Dioden verfügen [129]. Dagegen sind PIN-Dioden temperaturstabiler und kostengünstiger als Avalanchedioden [102]. Das elektrische Signal der Empfangsdioden, das die Form einer Gaußglocke hat, wird durch das sog. Parallel Gating-Verfahren digitalisiert und zeitabhängig in einzelnen Speicherzellen gespeichert. Eine Speicherzelle entspricht dabei einem Entfernungsschritt. Werden von einem reflektierenden Objekt mehrere Empfangspulse aufgezeichnet und die zugehörigen Entfernungsschritte miteinander addiert, entsteht eine Gaußverteilung um den wahren Wert der Entfernung [102]. Die horizontale und vertikale Auflösung geschieht beim Lidarsensor entweder durch einen mehrstrahligen Beam oder durch mechanisches Scannen, wobei beim Scannen die Strahlablenkung mit einem Spiegel oder durch Bewegung der Sende- und Empfangsoptik realisiert wird. Aus Kostengründen wird beim Lidarsensor die Relativgeschwindigkeit im Gegensatz zum Radarsensor nicht direkt über den Dopplereffekt gemessen. Stattdessen wird die Geschwindigkeit aus der Differentiation des Abstandes gewonnen [102].

Da es sich wie beim Videosensor um ein optisches Verfahren handelt, ist die Lidar-Technologie anfällig gegen Nebel und Gischt sowie Gegenlicht der Sonne. Bei Regen oder Nebel werden Strahlen reflektiert und können so zu einer Sättigung im Empfänger des Lidarsensors führen, die wiederum eine Messung von weiteren Objekten unmöglich macht. Allerdings verfügen heutige Sensoren über eine Adaption der Empfindlichkeit. Aufgrund des stark langgezogenen Signalechos von sogenannten weichen Objekten,

⁵ PIN Diode - Positive Intrinsic Negative Diode

⁶ APD - Avalanche Photodiode

das beispielsweise durch Reflektion an Regentropfen aus unterschiedlichen Entfernungen entsteht, können Fahrzeuge von Regen unterschieden werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit anhand der Länge des Empfangspulses die Sichtweite zu bestimmen [129]. Bei trockenen Wetterbedingungen ist die maximale Reichweite von 200 m mit der Reichweite von Radarsensoren vergleichbar [11]. Gegenlicht bzw. infrarotes Licht der Sonne kann wie bei Videosensoren zur Blendung des Lidarsensors führen. Abhilfe können hier Filter schaffen, die den Gleichlichtanteil der Sonne dämpfen [102]. Im Gegensatz zu Radarsensoren können mit Lidarsensoren auch Fahrbahnmarkierungen erfasst werden [177, 269]. Somit ist eine direkte Zuordnung von Objekten, die sich innerhalb und außerhalb der eigenen Fahrspur befinden, wesentlich sicherer und muss nicht wie bei Radarsensoren auf Basis von Modellannahmen erfolgen [212]. Allerdings liegt die Detektionsreichweite von Fahrbahnmarkierungen im Bereich von 20 m bis 30 m und eignet sich daher vorwiegend für den Stop-and-go-Verkehr [231].

2.2.4 Car-to-X

Mit Radar- und Lidarsensoren können Reichweiten bis zu 250 m erzielt werden (s. Abschnitt 2.2.2 u. 2.2.3). Damit das Umfeld in größeren Entfernungen erfasst werden kann, muss auf eine Kommunikation zwischen Fahrzeug-zu-Fahrzeug (Car-to-Car bzw. C2C) oder Fahrzeug-zu-Infrastruktur (Car-to-Infrastructure bzw. C2I) zurückgegriffen werden. Zur Vereinfachung wird im Folgenden nur der Begriff Car-to-Car verwendet. Neben der erhöhten Reichweite ermöglicht die Car-to-Car-Kommunikation Umfeldinformationen über Bereiche zu erlangen, die beispielsweise aufgrund einer engen, nicht einsehbaren Kurve verdeckt sind. Zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur wurde deshalb eigens der WLAN⁷ Standard IEEE⁸ 802.11p entwickelt, der Kommunikationsreichweiten bis

⁷ WLAN - Wireless Local Area Network

⁸ IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

1000 m ermöglicht. Des Weiteren ermöglicht dieser Standard eine verlässliche Kommunikation bei Fahrzeuggeschwindigkeiten bis zu 200 km/h [154]. Die Verbindung zwischen zwei Fahrzeugen wird dabei im ad-hoc-Modus hergestellt. Ad-hoc bedeutet, dass die Kommunikation direkt zwischen beiden Teilnehmern erfolgt und kein zusätzlicher Zugangspunkt (Access Point) erforderlich ist. Im Gegensatz zu den allgemeinen Standards IEEE 802.11a/b/g, ist beim IEEE 802.11p-Standard eine Priorisierung der Informationen möglich. Dadurch können sicherheitskritische Informationen bevorzugt und folglich schneller übertragen werden [23]. Für die sicherheitsrelevante Car-to-Car-Kommunikation hat die europäische Kommission drei 10 MHz-Bänder im Bereich zwischen 5,875 GHz und 5,905 GHz reserviert [7]. Die theoretisch mögliche Übertragungsrate beträgt 27 Mbit/s. Bei sicherheitsrelevanten Anwendungen wird sie jedoch auf 6 Mbit/s reduziert, um die Anzahl der Übertragungsfehler zu verringern [266]. Erste Feldversuche haben gezeigt, dass die Latenzzeit bei der Übertragung einer Nachricht nur wenige Millisekunden beträgt [266].

Das Car-to-Car-Kommunikationssystem besteht im Wesentlichen aus Application Units, On-Board/Communication Units und Road-Side Units [23]. Die Application Unit stellt dabei die Einheit dar, welche die empfangenen Daten der On-Bord bzw. Communication Unit nutzt. Beispielsweise ist hier die Funktion implementiert, die den Fahrer vor einem möglichen Auffahrunfall warnt. Die On-Bord Unit ist für die Abwicklung der Kommunikation mit anderen Teilnehmern zuständig und verfügt mindestens über ein Sende-/Empfangsmodul, das dem IEEE 802.11p-Standard genügt. Daneben kann es beispielsweise über ein weiteres Modul mit dem Standard IEEE 802.11a/b/g verfügen, um nicht sicherheitskritische Daten, z.B. zur Internetnutzung, zu übertragen. Des Weiteren hat die On-Board Unit Zugang zu fahrzeugrelevanten Daten wie Geschwindigkeit, Position und Fahrtrichtung. Die Position wird dabei über ein Satelliten-Navigationssystem,

z.B. NAVSTAR GPS⁹, bestimmt. Nach Bedarf können auch beliebige weitere Daten zur Verfügung gestellt und von der On-Board Unit übertragen werden. Die Road-Side Unit ist mit der On-Board Unit vergleichbar und verfügt auch über mindestens ein Kommunikationsmodul nach dem Standard IEEE 802.11p. Jedoch ist die Road-Side Unit eine stationäre Einheit, die z.B. am Straßenrand steht. Des Weiteren verfügt die Road-Side Unit über weitere Systeme zur Kommunikation mit anderen Road-Side Units oder dem Internet. Die Hauptfunktion dieser Einheiten ist die Erhöhung der Reichweite über die Weiterleitung von Nachrichten an andere Fahrzeuge. Außerdem sind hier Funktionen umgesetzt, die beispielsweise Fahrzeuge über Gefahren informieren oder das aktuelle Tempolimit übermitteln.

Zur Verbreitung von Nachrichten existieren verschiedene Weiterleitungstypen (Forwarding Types) [9, 23]. Bei den verschiedenen Arten der Weiterleitung wird unterschieden zwischen:

- GeoUnicast
- Topologically-Scoped Broadcast
- Single-Hop Broadcast
- GeoBroadcast

Unter GeoUnicast versteht sich die Weiterleitung einer Nachricht an nur einen bestimmten Empfänger. Die Nachricht wird dabei entweder direkt oder indirekt über mehrmaliges Hopping bzw. Weiterleitung durch andere Teilnehmer übertragen. Beim Topologically-Scoped Broadcast wird die Nachricht an alle Nachbar- bzw. direkt erreichbaren Teilnehmer weitergeleitet. Jeder Teilnehmer dieser Gruppe leitet die Nachricht wiederum an alle direkten Nachbarn weiter. Diese Art der Weiterleitung wird so lange fortgeführt, bis die zuvor definierte maximale Anzahl von Hops erreicht ist. Der Single-Hop Broadcast ist ein Sonderfall des Topologically-Scoped Broadcast, bei

⁹ NAVSTAR GPS - Navigation System using Timing and Ranging Global Positioning System

dem die Nachricht nur an alle direkten Nachbar Teilnehmer weitergeleitet wird. Der GeoBroadcast dient zur Verteilung einer Nachricht in einem geografisch definierten Bereich. Der Bereich, in dem die Nachricht verbreitet werden soll, kann entweder als Kreis oder Rechteck und einer Höhenangabe definiert werden.

Neben den unterschiedlichen Arten der Weiterleitung existieren außerdem verschiedene Typen von Botschaften bzw. Message Types. Eine der wichtigsten Botschaften stellt die Cooperative Awareness Message dar [10]. Diese Botschaft wird zyklisch von jedem Teilnehmer an die direkten Nachbar Teilnehmer versendet und enthält mindestens die aktuelle Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung des Fahrzeuges. Mithilfe dieser Botschaft kann sich jeder Teilnehmer ein genaues Bild über die aktuell in der Nähe befindlichen Teilnehmer bzw. Fahrzeuge machen. Zwei weitere Botschaften sind die Decentralized Environment Notification Message [8] und die Signal Phase And Timing Message [266]. Die Decentralized Environment Notification Message ist eine ereignisbasierte Botschaft und dient zur Verbreitung von ortsgebundenen Informationen wie beispielsweise einer Gefahrenstelle. Zur Verbesserung des Verkehrsflusses an Kreuzungen dient die Botschaft Signal Phase And Timing, welche von Road-Side Units bzw. Lichtsignalanlagen versendet werden. Diese Botschaft enthält Informationen über die verbleibende Dauer der Grünphase und ggf. noch weitere Daten wie z.B. Anzahl der Spuren und Einmündungen sowie die Dauer der anschließenden Rotphase.

Das Anwendungsgebiet der Car-to-Car-Kommunikation ist sehr vielfältig. Neben dem großen Anwendungsbereich der Sicherheit eignet sich die Technologie auch für die Erhöhung der Energieeffizienz. Durch die vergleichsweise hohe Reichweite im Vergleich zu Sensoren zur Umfelderkennung kann auf Basis der übermittelten Informationen, wie z.B. Geschwindigkeit von anderen Verkehrsteilnehmern, Phase der Lichtsignalanlage oder aktueller Wert des Tempolimits, frühzeitig und somit energieoptimiert reagiert werden. Neben den großen Möglichkeiten und Chancen wird die notwendi-

ge Mindestanzahl von teilnehmenden Fahrzeugen und Infrastruktureinheiten kritisch gesehen. Damit für den Anwender ein spürbarer Nutzen erzielt werden kann, muss eine ausreichende Anzahl von Teilnehmern vorhanden sein. Das heißt, erste Käufer werden zunächst kaum einen Nutzen spüren. Für Car-to-Car-Anwendungen aus dem Bereich Verkehrsinformation reichen schon wenige Prozent [320] [319]. Bei Anwendungen der Gefahrenwarnung müssen Berechnungen zu Folge mindestens 10 % aller Fahrzeuge mit einem Car-to-Car-Kommunikationssystem ausgestattet sein [38]. Demgegenüber ist für Anwendungen wie Kollisionswarnungen oder kooperative Fahrstrategien eine sehr hohe Ausstattungsrate von mindestens 95 % erforderlich, um einen entsprechenden Nutzen erzielen zu können [190]. Deshalb ist davon auszugehen, dass solche Anwendungen erst bei einer ausreichenden Marktdurchdringung der Car-to-Car-Kommunikation eingeführt werden.

Ein weiterer und wichtiger Aspekt ist die Daten- und Kommunikationssicherheit. Car-to-Car-Systeme sind erst für den Massenmarkt geeignet, wenn kein Missbrauch stattfinden kann. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich zum einen mit der Plausibilisierung von Fahrzeugbewegungsdaten. Damit können missbräuchlich eingespeiste Fahrzeugbewegungen, z.B. eine vorgetäuschte Vollbremsung, erkannt werden [266]. Weiterhin wird an dem Thema Datenschutz gearbeitet. Hier gilt es zu verhindern, dass komplexe Bewegungsprofile von Fahrzeugen und ihren Nutzern erstellt werden können [266].

2.2.5 Elektronischer Horizont

Für die Realisierung von Fahrerassistenzsystemen zur energieeffizienten Längsregelung sind neben Informationen über das vorausliegende Verkehrsgeschehen auch Informationen über die vorausliegenden Streckeneigenschaften erforderlich. Dazu gehören beispielsweise Informationen über den Verlauf der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, der Kurvenkrümmung und

das Steigungsprofil der Fahrbahn. Für die Bereitstellung derartiger Informationen, die auch als elektronischer Horizont bezeichnet werden, werden verschiedene Ansätze verfolgt, die nachfolgend erläutert werden:

- Historiendatenbank
- Statische Karte
- Dynamische Karte

Bei der Historiendatenbank wird davon ausgegangen, dass der überwiegende Teil der gefahrenen Strecken sich stetig wiederholt. Als Beispiele sind hier die Fahrt zur Arbeit oder zur wöchentlichen Freizeitaktivität zu nennen. Mithilfe von serienmäßig verfügbaren Sensoren werden beispielsweise Geschwindigkeit, Steigung und Kurvenkrümmung bestimmt und in einer Datenbank abgespeichert. Beim erneuten Abfahren wird anhand des Lenkwinkels die Strecke mit den vorhandenen Daten in der Historiendatenbank abgeglichen und wiedererkannt. Auf Basis der zuvor abgespeicherten Informationen kann nun das vorausliegende Steigungsprofil, die Geschwindigkeit oder die zu erwartende Antriebsleistung vorhergesagt werden [109, 170, 191]. Bezüglich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit sind aufgrund der individuellen Fahrweise nur grobe Schätzungen möglich, wenn keine zusätzliche Sensorik zur Erfassung der Verkehrszeichen zur Verfügung steht.

Neben dem Lenkwinkel als Erkennungsmerkmal wird in einer anderen Arbeit die Erkennung und Zuordnung der aufgezeichneten Streckeneigenschaften über die Positionsbestimmung eines GPS realisiert [60]. Im Gegensatz zum Unterscheidungsmerkmal Lenkwinkel kann durch die Positionsbestimmung mit einem GPS die Strecke schneller erkannt werden. Des Weiteren wird eine höhere Zuverlässigkeit erreicht, da es nicht zu einer fehlerhaften Erkennung von Kurven nahe der Lenkwinkelschwelle kommen kann [170]. Zur Bestimmung des Höhenprofils können die Informationen des GPS mit den Messgrößen der Fahrzeugsensorik fusioniert werden

und bei mehreren Durchfahrten zu einer höheren Genauigkeit führen [243]. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass ein GPS notwendig ist, welches in vielen Fahrzeugen immer noch nicht zur Serienausstattung gehört und dadurch zusätzliche Kosten verursacht.

Navigationssysteme in Verbindung mit statischen Karten stellen eine weitere Möglichkeit zur Realisierung eines elektronischen Horizontes dar [109]. Heutige digitale Karten verfügen über eine Vielzahl von Informationen wie zulässige Höchstgeschwindigkeit, Steigungsprofil, Kurvenkrümmung, Anzahl der Fahrspuren und gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit [60]. Die Kartendaten werden dabei über spezielle Messfahrzeuge aktualisiert [65]. Jedoch ist die Anzahl von Messfahrzeugen begrenzt, so dass nicht alle Straßenklassen im gleichen Rhythmus und in der gleichen Regelmäßigkeit aktualisiert werden können. Folglich geht mit voranschreitender Zeit die Aktualität einer Karte verloren. Hersteller von Navigationsgeräten erstellen in der Regel 1 bis 4 Kartenupdates pro Jahr [14]. Selbst bei 4 Aktualisierungen pro Jahr kann es mehrere Monate dauern, bis eine Veränderung erfasst und berücksichtigt wird. Die fehlende Aktualität führt in vielen Fällen zu Einbußen bei der Zuverlässigkeit eines Fahrerassistenzsystems, das auf diesen Informationen aufbaut. Ein falscher Wert eines Tempolimits hat zur Folge, dass bei einer automatisierten Längsregelung eine falsche und eventuell sogar zu hohe Geschwindigkeit eingeregelt wird. Dadurch kann es zu sicherheitskritischen Situationen kommen, wenn der Fahrer nicht eingreift. Für die Umsetzung und Erreichung einer hohen Akzeptanz beim Kunden ist folglich eine hohe Aktualität der digitalen Karte erforderlich.

Zur Verbesserung der Aktualität werden seit einigen Jahren dynamische Karten entwickelt. Bei dynamischen Karten besteht die Möglichkeit, das Kartenmaterial inkrementell zu aktualisieren. Somit ist ein vollständiger Austausch der Kartendaten nicht mehr erforderlich. Die Verteilung eines Updates kann beispielsweise ausgehend von einem Serversystem über eine Mobilfunkverbindung erfolgen und den Fahrer zeitnah mit aktuellen Kartendaten versorgen. Problematisch bei inkrementellen Updates sind neben der

limitierten Bandbreite auch die verschiedenen Datenformate der Navigationsgerätehersteller. Ein Konzept zur Reduzierung der Datenmenge, das im europäischen Projekt ActMap entwickelt wurde, sind partielle inkrementelle Updates [32]. Dabei werden nur die Daten übertragen, die für die geografische Position und Anwendung des Benutzers relevant sind. Weiterhin wurde ein Zwischenformat entwickelt, das die Anzahl der notwendigen Übersetzungen zwischen Datenformaten verschiedener Kartenupdate-Anbieter reduziert. Einen weiteren wichtigen Beitrag zu diesem Thema leistet der Zusammenschluss mehrerer Fahrzeughersteller und Automobilzulieferer in Form eines Vereins mit dem Namen Navigation Data Standard e.V. (NDS). Diese Initiative hat zum Ziel, ein einheitliches und geräteunabhängiges Kartenformat zu definieren, das tagesgenaue inkrementelle Updates ermöglicht [200].

Neben der Aktualisierung von Kartendaten über ein zentrales Serversystem bzw. einer Mobilfunkverbindung werden zudem fahrzeugautonome Verfahren verfolgt, bei denen die vorhandene Fahrzeugsensorik zur Aktualisierung der Kartendaten genutzt wird [250, 154]. Diese Ansätze sind vergleichbar zum Historienspeicher (s. oben), jedoch wird hier auf einer bereits vorhandenen digitalen Karte aufgebaut. Mithilfe der heutigen im Fahrzeug verfügbaren Sensortechnologien können vielfältige Informationen über Verkehrs- und Streckenverhältnisse erfasst werden. Dazu gehören beispielsweise die Geometrie der Fahrbahn (Breite, Krümmung) und Attribute wie Verkehrsschilder und andere Straßeneigenschaften [250]. Des Weiteren kann auch das Nutzerverhalten, z.B. gefahrene Geschwindigkeit und Route, erfasst und für zukünftige Vorbeifahrten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden [154].

Eine weitere Stufe von dynamischen Karten bildet die Kombination von serverbasierten und fahrzeugautonomen Verfahren. Dabei werden die erfassten Streckendaten nicht nur im eigenen Fahrzeug gespeichert, sondern auch an einen zentralen Server übertragen [250]. Im zentralen Server werden die empfangenden Daten aller Fahrzeuge, die auch als Floating Car Data (FCD)

bezeichnet werden, aggregiert und den Teilnehmern wieder zur Verfügung gestellt. Dadurch kann eine hohe Aktualität gewährleistet werden und es besteht die Möglichkeit, eine sekundengenaue Aussage über die Streckenbeschaffenheit und Verkehrslage zu treffen und die betroffenen Fahrzeuge zu informieren [180, 128, 127]. Im europäischen Projekt FeedMAP wurde ein ähnliches Konzept verfolgt. Jedoch wurden hier nicht alle erkannten Streckenattribute an den Server übertragen, sondern nur die erfassten Abweichungen von der vorhandenen digitalen Karte. Die Detektierung einer Abweichung kann dabei auf verschiedenen Wegen erfolgen. Beispielsweise kann die Abweichung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit über einen Videosensor oder über die gefahrene Geschwindigkeit erfolgen [276].

Bei Fahrerassistenzsystemen zur energieeffizienten Längsregelung werden neben dem Navigationssystem die Informationen des elektronischen Horizontes häufig in anderen Steuergeräten benötigt. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2001 das ADASIS¹⁰ Forum ins Leben gerufen. Das ADASIS Forum besteht aus einer Gruppe von Fahrzeugherstellern und Zulieferern, die sich zum Ziel gesetzt hat, eine standardisierte Schnittstelle zur Übertragung eines elektronischen Horizontes zu entwickeln. Diese speziell für den CAN¹¹ entwickelte Schnittstelle besteht im Wesentlichen aus einem ADASIS Horizon Provider (AHP) und einem ADASIS Horizon Reconstructor (AHR) [229]. Der AHP extrahiert die relevanten Streckendaten des elektronischen Horizontes aus den Kartendaten und zerlegt diese in einzelne CAN-Botschaften gemäß des ADASIS Protokolls [80]. Im AHR, der sich auf dem Steuergerät des Fahrerassistenzsystems befindet, wird der elektronische Horizont aus den empfangenen CAN-Botschaften rekonstruiert und der Funktion zur Verfügung gestellt. Dabei können auch mehrere Steuergeräte bzw. Fahrerassistenzfunktionen über den CAN und einen entsprechenden AHR auf den elektronischen Horizont zugreifen. Abhängig von den technischen Anforderungen der Fahrerassistenzfunktion kann der elektronische Horizont mit ver-

¹⁰ ADASIS - Advanced Driver Assistance System Interface Specification

¹¹ CAN - Controller Area Network

schiedenen Detaillierungsgraden realisiert werden. Im einfachen Fall wird nur der wahrscheinlichste Pfad (MPP - Most Probable Path) übertragen. Zur Bestimmung des MPP sind verschiedene Annahmen möglich. Ist die Routenführung im Navigationssystem aktiviert, wird diese als MPP verwendet. Ohne Routenführung wird häufig davon ausgegangen, dass die aktuell befahrene Straße nicht verlassen wird. Es besteht außerdem die Möglichkeit, neben dem MPP auch die alternativen Pfade zu übertragen. Die zusätzliche Übertragung von Alternativpfaden hat den Vorteil, dass beim Verlassen des MPP die Fahrerassistenzfunktion direkt auf die Streckendaten des neuen Pfades zurückgreifen kann und nicht warten muss, bis der neue Pfad aufgebaut wurde. Zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, die auf einem elektronischen Horizont basieren, werden seit einiger Zeit Entwicklungsplattformen angeboten, die einen AHP darstellen können und den aktuellen Horizont visualisieren können. Zudem werden skalierbare AHR entwickelt, die an die Anforderungen der Fahrerassistenzfunktion und verfügbaren Steuergeräteressourcen angepasst werden können [181, 79].

2.3 Eco-Fahrerassistenzsysteme

Auf Basis der zuvor erläuterten Sensortechnologien zur Umfelderkennung werden Eco-Assistenzsysteme zur Verringerung des Energiebedarfs entwickelt. Dabei wird zwischen Systemen unterschieden, die den Fahrer vor der Fahrt, während der Fahrt oder nach der Fahrt bei der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unterstützen. In diesem Zusammenhang wird oft auch von sogenannten Pre-Trip-, On-Trip- oder Post-Trip-Systemen gesprochen [287].

Bei Pre-Trip-Systemen handelt es sich in erster Linie um Navigationssysteme, bei denen sich der Fahrer neben einer schnellen und kurzen Route auch eine verbrauchsoptimale Route bestimmen lassen kann. Bei dieser Art von Navigationssystemen wird anhand der topografischen Streckendaten sowie Annahmen über die gefahrene Geschwindigkeit mithilfe eines Modells der

Kraftstoffverbrauch geschätzt und bei der Routenberechnung mitberücksichtigt [164]. Dabei ist auch die Konfiguration des Antriebstranges, ob dieser beispielsweise rein verbrennungsmotorisch oder batterieelektrisch ausgeprägt ist, ausschlaggebend [233]. Des Weiteren können dynamische Daten über die aktuelle Verkehrslage einfließen und zur Bestimmung einer möglichst verbrauchsgünstigen Route beitragen [262, 46]. Das Einsparpotenzial der Eco-Route im Vergleich zur schnellen Route liegt im Durchschnitt bei 9 % bei einem Zeitverlust von ebenfalls 9 % [49]. Die Auswertung von aufgezeichneten Fahrdaten in Schweden zeigt, dass bei 46 % aller gefahrenen Strecken vom Fahrer nicht die Eco-Route gewählt wurde. Im Mittel lag hier das Einsparpotenzial zwischen der Eco-Route und der gewählten Route bei 8,2 %. Bei der Nutzung des Navigationssystems mit Eco-Routing konnte also insgesamt im Mittel eine Einsparung von 4 % erzielt werden [84].

Wie schon erläutert bilden On-Trip-Systeme einen weiteren großen Bereich der Eco-Assistenzsysteme. On-Trip-Systeme unterscheiden sich hauptsächlich in ihrem Automatisierungsgrad [223]. Bei Systemen ohne Automatisierung erhält der Fahrer über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) Hinweise hinsichtlich einer energieeffizienten Fahrweise. Als HMI werden beispielsweise das Kombiinstrument oder Head-Up-Display¹² verwendet [70, 162, 219]. Des Weiteren werden ergänzend auch aktive Fahrpedale eingesetzt, die dem Fahrer zusätzlich eine haptische Rückmeldung geben [77, 18]. Zum Beispiel vor einer Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird dem Fahrer neben einer optischen Rückmeldung auch über eine Vibration oder Gegenkraft am Fahrpedal signalisiert, dass er den Fuß vom Pedal nehmen soll. Bei On-Trip-Systemen mit hohem Automatisierungsgrad wird die Längsführung in weiten Teilen vom Fahrerassistenzsystem übernommen [223, 75, 161]. In diesem Fall muss der Fahrer die Querrführung übernehmen und die Längsführung nur überwachen. Mithilfe eines derartigen Systems wird beispielsweise bei einer vorausliegenden Ortseinfahrt das

¹² Bei einem Head-Up-Display (HUD) wird die Information an die Windschutzscheibe projiziert

Fahrzeug automatisch im Segelbetrieb verzögert. Ergänzt wird das On-Trip-System mit einem HMI, das den Fahrer über die vorausliegenden Ereignisse und Eingriffe informiert.

Die dritte Gruppe der Eco-Assistenzsysteme bilden die Post-Trip-Systeme. Bei dieser Art von Eco-Assistenzsystemen wird der Fahrer nach der Fahrt auf die Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich einer energieeffizienten Fahrweise aufmerksam gemacht. Die Verbesserungshinweise können beispielsweise das Schaltverhalten oder die Nutzung des Schubetriebes betreffen. Des Weiteren wird die Fahrweise anhand eines Punktesystems bewertet und soll so einen Anreiz für Verbesserungen schaffen. Fiat hat im Jahr 2008 ein solches System unter dem Namen eco:Drive in Serie gebracht [214]. In einer Studie mit 5700 Fahrern über einem Zeitraum von 150 Tagen konnte im Mittel ein Einsparpotenzial von 6 % im Vergleich zu Fahrten vor der Nutzung von eco:Drive festgestellt werden [89].

Wie in der Einführung bereits erläutert, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Eco-Assistenzsystemen, die den Fahrer während der Fahrt unterstützen. In den nachfolgenden Abschnitten wird deshalb genauer auf die Funktionsweise und das Einsparpotenzial der oben erwähnten On-Trip-Systeme eingegangen.

2.3.1 Hinweise während der Fahrt

Assistenzsysteme, die den Fahrer mithilfe von Hinweisen bei einer energieeffizienten Fahrweise unterstützen, unterscheiden sich zum einen in der Information und zum anderen in der Art und Weise wie die Information an den Fahrer übermittelt wird.

Bei Fahrzeugen mit manuellem Getriebe sind heutzutage die sogenannten Gangwechselanzeigen weit verbreitet. Bei dieser Art von Assistenzsystem bekommt der Fahrer einen Hinweis über die momentan verbrauchsoptimale Gangstufe. Als HMI wird häufig eine Anzeige im Kombiinstrument verwendet, die beispielsweise mit einem Pfeil ein Hoch- oder Runterschalten

sowie einer Ziffer den Zielgang signalisiert. Das mögliche Einsparpotenzial wurde in einer Studie durch Messungen auf dem Rollenprüfstand ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem BMW Mini Diesel und Ford Transit Diesel eine Einsparung von ca. 4 % bis 6 % im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) erzielt werden kann, wenn anstatt der Testvorgaben die Empfehlungen der Gangwechselanzeige umgesetzt werden [210].

Zusätzlich zur einfachen Gangwechselanzeige werden auch erweiterte Konzepte erprobt. Neben der Wahl der Gangstufe ist auch die Art und Weise wie das Fahrpedal betätigt wird, eine entscheidende Größe, die den Kraftstoffverbrauch beeinflusst. Van der Voort untersucht in einer Probandenstudie im Fahrsimulator, wie hoch das Einsparpotenzial ist, wenn die Fahrer über ein Assistenzsystem Hinweise zur optimalen Gangstufe und zur Betätigung des Gaspedals erhalten [297]. Die Ergebnisse zeigen eine Verringerung des Kraftstoffbedarfs um 16 % im Vergleich zum Fahren ohne Assistenz. Fahrer ohne Assistenz aber mit der Aufforderung zum energieeffizienten Fahren erreichten 9 % Einsparung. Durch das Assistenzsystem kann folglich eine zusätzliche Einsparung von 7 % erreicht werden [297].

Bei einem anderen Ansatz, der auf die Optimierung des Kraftstoffbedarfs im Autobahnverkehr abzielt, bekommt der Fahrer über ein Assistenzsystem eine optimale Geschwindigkeit angezeigt [31]. Ziel bei diesem Ansatz ist es, Schwankungen der Geschwindigkeit zu vermindern und dadurch den Kraftstoffbedarf zu senken. Die optimale Geschwindigkeit wird dabei auf Basis von Echtzeitverkehrsdaten, welche mithilfe von in der Fahrbahn eingelassenen Kontaktschleifen gewonnen werden, zentral auf einem Server ermittelt. Abhängig von der aktuellen Position wird jedem Fahrzeug über eine drahtlose Verbindung die optimale Geschwindigkeit übermittelt. Computersimulationen, bei denen 20 % aller Fahrzeuge über ein derartiges System verfügen, zeigen ein Einsparpotenzial zwischen 10 % bis 20 % im Vergleich zu einem Fahrzeug ohne Assistenz. Bei einer Messfahrt im Realverkehr konnte eine Einsparung von 13 % mit einem Zeitverlust von 6 % ermittelt werden [31].

Eine weitere Möglichkeit den Energiebedarf zu senken, ist die Optimierung von Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgängen (s. Abschnitt 2.1). In der Studie von Wu wird beispielsweise untersucht, ob durch die Anzeige der energieoptimalen Beschleunigung und der Istbeschleunigung eine Kraftstoffeinsparung erzielt werden kann [321]. Die Balkenanzeige ist dabei farblich kodiert und zeigt in Grün jeweils den optimalen Bereich und mit einem überlagerten Balken die aktuelle Beschleunigung an. Das Ziel des Fahrers ist es, den Balken mit der Istbeschleunigung durch die Betätigung des Fahrpedals in den grünen Bereich zu bewegen. Untersuchungen mit einer Probandenstudie im Fahrsimulator zeigen im Stadtverkehr bei Verzögerungen vor Lichtsignalanlagen ein Einsparpotenzial von bis zu 26 % und bei Beschleunigungen von bis zu 31 % im Vergleich zu Fahrern ohne Assistenz [321]. Bei den Ergebnissen zur Reduktion des Kraftstoffbedarfes ist zu beachten, dass es sich um einzelne Situationen und nicht um Ergebnisse für eine gesamte Messfahrt mit mehreren Situationen handelt (s. auch Abschnitt 2.1). Bei unbekanntem, verdecktem oder weit entfernten Geschwindigkeitsbegrenzungspunkt ist es für den Fahrer schwierig bis unmöglich, den richtigen Zeitpunkt für den Beginn des Ausrollvorganges zu bestimmen. Daher werden auch für diesen Anwendungsfall Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer dabei unterstützen. Auf Basis einer digitalen Karte mit Informationen über die vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzungen und Topographie der Straße wird mit einem Fahrzeugmodell das Ausrollverhalten berechnet. Mit der berechneten Ausrollkurve kann dann der richtige Zeitpunkt des Ausrollens bestimmt und der Fahrer über ein geeignetes HMI informiert werden.

Ein derartiges Fahrerassistenzsystem, bei dem der Fahrer über das Kombiinstrument einen Hinweis zum Ausrollen im Segelbetrieb erhält, wurde in einer Simulatorstudie untersucht. Im Vergleich zur Fahrt ohne Assistenz, aber mit der Aufforderung möglichst energieeffizient zu fahren, liegt das Einsparpotenzial im Mittel bei 8 % mit einem Zeitverlust von 1,4 % [52]. In einer ergänzenden Arbeit wurde das System dahingehend erweitert, dass

auch auf langsame vorausfahrende Fahrzeuge ausgerollt wird [162]. In der Simulation konnte dabei für eine Annäherung von 120 km/h auf ein mit 80 km/h fahrendes Fahrzeug ein Einsparpotenzial von ca. 10 % im Vergleich zu einem durchschnittlichen Fahrer ermittelt werden. Die Berechnungen beziehen sich dabei auf eine Strecke von 4 km und eine Sensorreichweite zur Detektierung des vorausfahrenden Fahrzeugs von 150 m [162].

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt eine Studie, die die Wirksamkeit eines unter anderem auf Ausrollhinweisen bestehenden Fahrerassistenzsystems bei schweren Nutzfahrzeugen (40 t) untersucht [71]. In der Studie mit 41 Probanden konnte in einem Fahrsimulator nachgewiesen werden, dass bei der zweiten Fahrt mit Aufforderung zum energieeffizienten Fahren ohne Zeitverlust, diese zu einer Einsparung von 6 % im Vergleich zur ersten Fahrt ohne Aufforderung führte. Gleichzeitig erhöhte sich bei der zweiten Fahrt die Durchschnittsgeschwindigkeit um 1,3 km/h. Bei der dritten Fahrt wurde der Fahrer zusätzlich mit dem Fahrerassistenzsystem unterstützt. Dadurch konnte eine Einsparung um weitere 6,6 % erzielt werden. In diesem Fall verringerte sich die Durchschnittsgeschwindigkeit um 2 % im Vergleich zur zweiten Fahrt ohne Assistenz [71].

In den Arbeiten von Popiv wird untersucht, wie sich verschiedene grafische sowie multimodale HMI-Konzepte auf den Kraftstoffverbrauch und die Reaktionszeit auswirken. Der Fahrer erhält durch das HMI einen Hinweis, wann er den Fuß vom Fahrpedal nehmen und mit der Verzögerung im Schubbetrieb beginnen kann. Die Ergebnisse einer Simulatorstudie mit 26 Probanden zeigen, dass mit grafischen Hinweisen im Kombiinstrument bezogen auf die gesamte Fahrt ohne Assistenz im Mittel eine Einsparung von ca. 4 % erreicht werden kann [219]. In einer weiteren Simulatorstudie mit 30 Probanden untersucht Popiv, wie sich der Einsatz eines multimodalen HMI Konzeptes auf die Kraftstoffreduktion auswirkt. Dabei wird die grafische Anzeige mit einem haptischen Fahrpedal kombiniert. Für die gesamte Fahrt reduziert sich der Kraftstoffverbrauch mit multimodalem Konzept im Vergleich ohne Assistenzsystem um 7,5 %. Die Reaktionszeiten bei

Anwendung des multimodalen Konzeptes verringern sich in Abhängigkeit der Verzögerungssituation zwischen 20 % und 50 % im Vergleich zur allein grafischen Anzeige [218].

Auch in der Studie von Samper werden verschiedene Varianten eines Assistenzsystem untersucht, das durch Ausrollhinweise den Fahrer bei der Umsetzung einer energieeffizienten Fahrweise unterstützt [246]. Im Unterschied zu den Arbeiten von Popiv wird hier der Motor automatisch vom Antriebsstrang entkoppelt, wenn der Fahrer den Fuß vom Fahrpedal nimmt. Das Fahrzeug verzögert somit im Segelbetrieb. Im realen Fahrversuch mit 28 Probanden wurden neben einer grafischen Anzeige im Kombi auch zwei Varianten mit aktiven Fahrpedal verglichen. Bei Anwendung der rein grafischen Anzeige erzielten die Probanden im Mittel eine Einsparung von ca. 6,8 % im Vergleich zur Referenzfahrt ohne Assistenzsystem. Die Fahrzeit verlängerte sich dabei um 2,5 % und die Reaktionszeit bis die Probanden den Fuß vom Fahrpedal nahmen, lag durchschnittlich bei 2,5 s. Der Verbrauch und die Reaktionszeit konnte weiter gesenkt werden, wenn die Probanden das multimodale Anzeigekezept bestehend aus grafischer Anzeige und aktivem Fahrpedal verwendeten. In diesem Fall lag die Kraftstoff einsparung durchschnittlich bei 10 % und die Reaktionszeit bei 0,7 s. Durch die verlängerten Ausrollphasen erhöhte sich die Fahrzeit im Mittel um 4,3 % [246].

Neben der Optimierung von Verzögerungsvorgängen wird das aktive Fahrpedal auch für die Optimierung der Beschleunigung und Konstantfahrt eingesetzt. Dabei wird dem Fahrer über einen Druckpunkt, bei dem sich die Gegenkraft erhöht, die optimale Fahrpedalstellung empfohlen. In der Arbeit von Dorrer wird ein derartiges System in einem Versuchsfahrzeug prototypisch umgesetzt und im realen Fahrversuch auf einem Rundkurs mit 16 Probanden getestet. Das Assistenzsystem optimiert dabei im Wesentlichen den Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgang bei Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Mithilfe eines Radarsensors reagiert das System zudem auf vorausfahrende Fahrzeuge. Die Probanden erreichen auf

dem Rundkurs mit eingeschaltetem Eco-Assistenzsystem im Mittel eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 5,7 % im Vergleich zur Fahrt ohne Assistenzfunktion [77]. Bei Betrachtung einzelner Situationen, liegt das Einsparpotenzial bei Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen im Mittel bei bis zu 12 % und 20 % [77].

Ein ähnliches Assistenzsystem, bei dem eine optimale Stellung des Fahrpedals dem Fahrer empfohlen wird, wird in [18] vorgestellt. Versuche auf dem Rollenprüfstand zeigen für eine Beschleunigung von 0 auf 100 km/h mit anschließender Verzögerung bis in den Stillstand bezogen auf eine Strecke von 1500 m ein Einsparpotenzial von ungefähr 22 %. Bei der alleinigen Betrachtung des Beschleunigungsvorgangs können ca. 5 % Kraftstoff eingespart werden [18].

Neben der Berücksichtigung von Geschwindigkeitsbegrenzungen und Kurven werden auch Assistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer bei der Annäherung an Lichtsignalanlagen unterstützen. Abhängig von der aktuellen Phase sowie der Dauer der Rot- und Grünphase der Lichtsignalanlage eignen sich verschiedene Fahrstrategien, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren [77]. Beispielsweise kann die Geschwindigkeit konstant gehalten oder muss nur leicht reduziert werden, wenn die Restdauer der Rotphase kürzer oder nur geringfügig länger ist als die benötigte Fahrtzeit bis zur Lichtsignalanlage. Dauert die Rotphase erheblich länger als die Fahrtzeit bis zur Lichtsignalanlage und ist ein Stillstand somit nicht mehr vermeidbar, sollte frühzeitig mit Verzögerung im Segel- oder Schubbetrieb begonnen werden. Berechnungen von Dorrer zeigen abhängig vom Schaltzeitpunkt der Lichtsignalanlage ein Einsparpotenzial unter idealen Bedingungen von bis zu 40 % im Vergleich zu Annäherungen ohne Assistenz.

Die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse zeigen, dass bei der Annäherung an Lichtsignalanlagen zum einen die Wahl der Gangstufe und zum anderen der Informationsabstand, bei dem das Fahrzeug über die aktuelle Phase und Restdauer der Lichtsignalanlage informiert wird, einen entscheidenden Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben [277]. Dabei ist zu beachten, dass

der Einfluss des Informationsabstandes auf den Kraftstoffbedarf bei einer Zufahrt mit 50 km/h ab 500 m eine Sättigung erfährt. Insgesamt wird für ein einzelnes Fahrzeug ein Einsparpotenzial von 22 % im Vergleich ohne Unterstützung angegeben. Des Weiteren wurde in der Arbeit von Tielert eine Verkehrsnetzsimulation durchgeführt, um das Einsparpotenzial unter realitätsnahen Bedingungen, z.B. Beeinflussung durch andere Fahrzeuge oder nicht vollständige Umsetzung der Empfehlungen des Assistenzsystems durch den Fahrer, zu untersuchen. Durch die Einbeziehung anderer Fahrzeuge und das nicht ideale Verhalten des Fahrers wird im Vergleich zur Simulation das Einsparpotenzial auf 8 % reduziert. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der Verkehrsnetzsimulation, dass auch die Ausstattungsrate einen erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat. So reduziert sich das Einsparpotenzial von 8 % bei 100 % Ausstattungsrate auf 1,5 % bei 25 % Ausstattungsrate [277]. Abhängig von der Verkehrsdichte, insbesondere bei freier Fahrt ohne Beeinflussung durch vorausfahrende Fahrzeuge, kann es sinnvoll sein, nicht nur den Status der nächsten, sondern auch den Status weiterer Lichtsignalanlagen bei der Wahl der Geschwindigkeit zu berücksichtigen [261].

Ein weiteres Assistenzsystem, das den Fahrer bei der Annäherung an Lichtsignalanlagen unterstützt, wird in [255, 254] vorgestellt. Über eine textuelle Anzeige erhält der Fahrer Informationen über die Restdauer der aktuellen Phase, den Abstand und eine Handlungsempfehlung in Form einer Fahrgeschwindigkeit. Die Übertragung der aktuellen Daten der Lichtsignalanlage erfolgt mithilfe einer drahtlosen Verbindung, die auf dem Standard IEEE 802.15.4 basiert [255, 254].

Ein vergleichbares aber bereits seriennahes System hat der Fahrzeughersteller Audi auf der Consumer Electronics Show (CES) 2014 vorgestellt. Auch hier bekommt der Fahrer über das Kombiinstrument die Restlaufzeit der aktuellen Phase und ggf. eine Geschwindigkeit angezeigt, um die nächste vorausliegende Lichtsignalanlage möglichst innerhalb der Grünphase zu erreichen [12].

Im Vergleich zum obigen Konzept wird in der Arbeit von Richter nicht im Fahrzeug sondern zentral auf Basis von Detektoren zur Verkehrserfassung eine Geschwindigkeitsvorgabe bestimmt. Das hat den Vorteil, dass mehrere Fahrzeuge in die Optimierung einbezogen werden können. Simulationsergebnisse zeigen, dass das Einsparpotenzial bei einer Zufahrt auf eine Lichtsignalanlage für ein Fahrzeug bei bis zu 35 % und im Mittel bei 15 % liegt [232].

Neben den hier aufgeführten Arbeiten existieren noch eine große Anzahl weiterer Arbeiten, die sich mit der Assistenz für Lichtsignalanlagen beschäftigen. Xia berücksichtigt in seiner Arbeit neben der Information über die aktuelle Phase der Lichtsignalanlage auch Informationen über vorausfahrende Fahrzeuge [323]. In [163] wird beispielsweise ein derartiges Assistenzsystem auf Basis einer Applikation für Smartphones vorgestellt. In einer anderen Arbeit wird ein kooperatives Verfahren gezeigt, bei dem nicht nur dem Fahrer Hinweise zum optimalen Fahrverhalten gegeben werden, sondern auch die Schaltung der Lichtsignalanlage angepasst wird [179]. Daneben ist auch die Gestaltung des HMI ein wichtiger Bestandteil, damit ein solches Assistenzsystem eine hohe Akzeptanz und Nutzung erfährt [275].

2.3.2 Automatisierung der Längsführung

Eine weitere Stufe bilden Eco-Assistenzsysteme, bei denen die Längsführung automatisiert wird. Das heißt, der Fahrer übernimmt die Querführung und muss die Längsführung nur überwachen. Diese Systeme haben den Vorteil, dass eine geringere Leistung und Aufmerksamkeit des Fahrers erforderlich ist und die Fahrweise mit einer höheren Genauigkeit optimiert werden kann. Wie bei den hinweisgebenden Assistenzsystemen unterscheiden sich die hier genannten Systeme nach den adressierten Fahrsituationen. Ein weiteres Kriterium ist die Art der Optimierung. Dabei wird entweder nur eine Situation optimiert, z.B. Verzögerung vor einer Kurve, oder es werden mehrere Ereignisse im Voraus berücksichtigt. Einen weiteren Schritt stellt die

Berücksichtigung von dynamischen Informationen dar. Hierbei werden im Unterschied zu statischen Informationen, wie es eine Kurvengeschwindigkeit darstellt, auch veränderliche Informationen wie die Phase von Lichtsignalanlagen oder das aktuelle Verkehrsgeschehen in der Optimierung berücksichtigt.

Das Fahrerassistenzsystem Adaptive Cruise Control (ACC) ist eines der ersten Assistenzsysteme, das eine automatisierte Längsregelung realisiert. Im Gegensatz zum Tempomaten wird bei ACC nicht nur die Geschwindigkeit geregelt sondern auch der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen eingehalten [318]. Ist auf der eigenen Fahrspur kein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden, wird vom ACC die vom Fahrer gewählte Wunschgeschwindigkeit eingeregelt. Nähert sich das Ego-Fahrzeug einem langsameren Fahrzeug an, wird über einen geeigneten Sensor (s. Abschnitt 2.2) der Abstand und die Relativgeschwindigkeit bestimmt und entsprechend Motor sowie Bremse angesteuert. Abhängig von der eingestellten Zeitlücke¹³ des Fahrers regelt ACC den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, bis es die Fahrspur des Ego-Fahrzeugs verlässt.

Im Gegensatz zum manuellen Fahren führt die Nutzung von ACC in vielen Fällen zu einem vorausschauenderen und gleichmäßigeren Fahren mit geringerer Variation der Beschleunigung [189]. Untersuchungen mit 30 Probanden im realen Fahrbetrieb zeigen, dass mit einem ACC im Vergleich zur manuellen Fahrt eine Kraftstoffeinsparung im Mittel von 1,5 % erzielt werden kann [301]. Im großangelegten Feldversuch EuroFOT wurde mit ungefähr 100 Fahrzeugen der Einfluss von ACC auf den Kraftstoffverbrauch ermittelt. Über einen Zeitraum von 12 Monaten wurden alle Fahrten messtechnisch erfasst. Als Referenz dienten die ersten 3 Monate, in denen ohne Assistenzsystem gefahren wurde. Bei der anschließenden Nutzung von ACC konnte dabei eine Kraftstoffeinsparung von 2,8 % auf der Autobahn ermittelt werden. Der Nutzungsgrad von ACC lag während der Studie bei 49 %.

¹³ Als Zeitlücke wird der zeitliche Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug bezeichnet

Damit ergibt sich bezogen auf die gesamte Strecke ein Potenzial von 1,4 % im Vergleich zur rein manuellen Fahrweise [37].

ACC kann demnach schon in seiner Standardausprägung als ein Eco-Fahrerassistenzsystem bezeichnet werden. Um das Potenzial zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs weiter zu erhöhen, beschäftigen sich einige Arbeiten mit der Optimierung des Annäherungs- und Folgeverhaltens von ACC [81, 329, 135, 256, 82, 175, 64, 238, 182, 204]. Dabei werden verschiedene Optimierungsverfahren angewendet, auf die später weiter eingegangen wird.

Eine Weiterentwicklung stellt das sog. Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) dar. Beim CACC werden nicht nur vorausfahrende Fahrzeuge über einen Sensor erfasst, sondern über eine drahtlose Car-to-Car-Kommunikation (s. Abschnitt 2.2.4) auch die aktuelle Geschwindigkeit und Beschleunigung übermittelt [55]. Zudem besteht so die Möglichkeit, mehrere vorausfahrende Fahrzeuge bei der Regelung der Geschwindigkeit zu berücksichtigen. Durch die direkte Verbindung zwischen den Fahrzeugen verkürzt sich die Zeit zur Sensierung von Bewegungsänderungen [56]. Insgesamt lässt sich dadurch die Stabilität der Kolonne und das Auftreten von Staus vermindern [55]. Des Weiteren besteht aufgrund der frühzeitigen und vorausschauenden Sensierung mehrerer Fahrzeuge die Möglichkeit, die Fahrweise anzupassen und den Kraftstoffverbrauch zu senken. Ergebnisse einer Simulationsstudie zeigen, dass in Abhängigkeit von der Position des Fahrzeugs in der Kolonne, der zeitlichen Vorausschau und des zulässigen Abstandstoleranzbereiches zwischen zwei Fahrzeugen eine Einsparung von 20 % bis 25 % erzielt werden kann [168, 264]. Zudem ermöglicht die direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen, den Abstand zu verringern und eine Kolonne bzw. einen Platoon zu bilden. Bei Pkw-Kolonnen auf der Autobahn mit Abständen von wenigen Metern kann somit der Kraftstoffverbrauch zwischen 22 % und 32 % reduziert werden. Wird der Abstand auf ca. 10 m vergrößert, liegt das Einsparpotenzial nur noch bei 4 % bis 6 % [327]. Simulationsergebnisse für zwei Lkw mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h zeigen beim geringsten zeitlichen Abstand ein mögliches Einsparpotenzial von ca. 7 %

im Vergleich zum vorausfahrenden Lkw, wobei der absolute Wert der Zeitlücke nicht angegeben ist [17].

Ein ähnliches Ziel wurde im EU-Projekt SARTRE¹⁴ verfolgt. Bei dem im Projekt SARTRE entwickelten System wird auf Basis eines Führungsfahrzeugs eine Kolonne gebildet und neben der Längsführung auch die Querverführung aller nachfolgenden Fahrzeuge automatisiert [136]. Alle Fahrer der nachfolgenden Fahrzeuge hinter dem Führungsfahrzeug können sich demzufolge anderen Beschäftigungen widmen, so lange sie sich in der Kolonne befinden. Während des Projektes wurden unter anderem Fahrversuche durchgeführt, um das Einsparpotenzial zu bestimmen. Die Kolonne bestand dabei aus einem Lkw als Führungsfahrzeug und einem weiteren Lkw sowie 3 nachfolgenden Pkw. Alle Fahrzeuge fuhrten des Weiteren mit einer Geschwindigkeit von 85 km/h und einem Abstand von 8 m. Im Vergleich zur Referenzfahrt eines jeden Fahrzeugs ohne Kolonne, lag die Einsparung zwischen 11,5 % und 15 % für alle Folgefahrzeuge und für den vorausfahrenden Lkw bei 7 % [72].

Im Bereich von Platooning und CACC existieren eine Reihe weiterer Arbeiten. Wichtige Themen sind die Entwicklung von Regelstrategien [205, 316, 16] und Untersuchungen der Stabilität einer Kolonne (string stability) [150, 216, 247, 213], Erprobungen in Fahrversuchen bzw. bei Wettbewerben und in der Simulation [108, 198, 330, 103], Kommunikationssysteme [259, 155] und der Einfluss menschlichen Verhaltens [134, 225].

Neben der Verbesserung des Folgeverhaltens zur Reduktion des Energiebedarfs werden auch Systeme entwickelt, die wie bei hinweisgebenden Assistenzsystemen streckenspezifische Informationen berücksichtigen. Dazu gehören wie bereits erläutert die zulässige Höchstgeschwindigkeit, die Steigung und Krümmung der Fahrbahn. Auf Basis dieser Informationen werden die notwendigen Beschleunigungs-, Konstantfahrt- und Verzögerungsabschnitte hinsichtlich einer energieeffizienten Fahrweise optimiert.

¹⁴ SARTRE - Safe Road Trains for the Environment

Im Rahmen des vom BMWi¹⁵ geförderten Projektes Famos wurde ein ACC System um eine wie zuvor beschriebene automatisierte Längsführung ergänzt und in einem Versuchsträger implementiert. Das entwickelte Assistenzsystem optimiert im Wesentlichen die Verzögerungsvorgänge vor Geschwindigkeitsbegrenzungen, Vorfahrtszeichen, Kreuzungen, Kurven sowie Kuppen. Die energieeffiziente Verzögerung wird dabei entweder im Segel- oder im Schubbetrieb vorausschauend ausgeführt, so dass am entsprechenden Schild die gewünschte Geschwindigkeit erreicht wird. Die Ergebnisse des Fahrversuchs auf einer 32,3 km langen Teststrecke bei Wolfsburg zeigen ein Einsparpotenzial von 13 % im Vergleich zur Referenzfahrt. Bei der Referenzfahrt wurden die Verzögerungsvorgänge mit einer Beschleunigung von 1 m/s^2 umgesetzt [75, 121]. Der Zeitverlust bei Anwendung der energieeffizienten Verzögerungsstrategien liegt bei 3 %.

In den Arbeiten von Meinheit und Töpler wird ein vorausschauend fahrendes Hybridfahrzeug auf Basis eines Subcompact-Klasse-Fahrzeugs konzipiert [194, 279]. Im Vergleich zu [75, 121] werden hier auch der Beschleunigungsvorgang und die Konstantfahrt optimiert. Ein weiterer Freiheitsgrad besteht in Form der Batterie, die zusätzlich eine Rekuperation der Bremsenergie ermöglicht. Durch die Simulation von Fahrten auf einem 25,6 km langen Rundkurs bei Aachen konnte insgesamt ein Einsparpotenzial von 3 % bis 5 % im Vergleich zum Hybridfahrzeug ohne Vorausschau ermittelt werden [40]. Ergebnisse von Messfahrten mit Probanden zeigen bei einer Verzögerungssituation von 100 km/h auf 80 km/h und 60 km/h mit anschließender Kurve eine Einsparung von 30 % beim Hybridfahrzeug ohne Vorausschau und 45 % beim Hybridfahrzeug mit Vorausschau im Vergleich zur Fahrt mit konventionell angetriebenem Fahrzeug [40].

Um die Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen zur energieeffizienten Längsregelung beim Fahrer zu erhöhen, werden zudem Systeme entwickelt, die sich an das Fahrverhalten des Fahrers anpassen. Während der Fahrt ohne

¹⁵ BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Assistenzsystem wird anhand des Fahrverhaltens bestimmt, um welchen Fahrertyp, beispielsweise sportlich oder ökonomisch, es sich handelt. Entsprechend des Fahrertyps wird dann die Fahrstrategie angepasst und damit zu einer höheren Akzeptanz des Fahrers beigetragen [30, 35, 273].

In den vorangegangenen Beispielen wird häufig nur das aktuelle oder nächste Ereignis für die Bestimmung einer energieeffizienten Fahrweise berücksichtigt. Das kann dazu führen, dass zum Beispiel der Schubbetrieb gewählt wird, obwohl es aber unter Berücksichtigung der vorausliegenden Streckeneigenschaften energieeffizienter gewesen wäre, zuvor stärker zu beschleunigen, um danach eine längere Strecke im Segelbetrieb zurücklegen zu können [188]. Aus diesem Grund beschäftigen sich eine Vielzahl von Forschungsarbeiten mit der Optimierung der Fahr- und Betriebsweise über einen definierten Vorausschauhorizont. In der Literatur wird diese Methode auch als Modellprädiktive Regelung oder im englischsprachigen Raum als Model Predictive Control (MPC) bzw. Receding Horizon Control (RHC) bezeichnet.

In [331] wird eine automatisierte Längsregelung auf Basis einer MPC im Zustandsraum entworfen. Die MPC hat dabei eine Vorausschau von 4 s bis 12 s. Messfahrten mit 20 Fahrern auf einer 15 km langen Teststrecke ergaben eine Kraftstoffeinsparung von ca. 6 % bei einer Erhöhung der Fahrzeit von ca. 4 % im Vergleich zum durchschnittlichen Fahrer ohne Assistenz. Dabei ist zu beachten, dass ein Horizont von 12 s für eine Vielzahl von Verzögerungsvorgängen nicht ausreichend ist und dadurch vergleichsweise spät auf Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit reagiert wird.

Auch Terwen untersucht in seiner Arbeit den Einsatz einer MPC zur vorausschauenden Regelung schwerer Lastkraftwagen [272]. Die von Terwen entwickelte MPC bestimmt in Abhängigkeit der vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kurvenkrümmungen und Steigungsinformationen den optimalen Verlauf von Antriebs- und Bremsmoment sowie der Gangstufe. Auf einer Vergleichsfahrt zwischen Stuttgart und Hamburg konnte das entwickelte MPC-Verfahren eine Kraftstoffeinsparung von 3 % im Ver-

gleich zu einem herkömmlichen Tempomaten erzielen [272]. Die Lösung des Hybrid-Optimalsteuerungsproblems wird dabei in eine überlagerte Suche für die diskrete Anzahl von Schaltvorgängen-/folge und eine unterlagerte Lösung der reellwertigen Größen wie Schaltzeitpunkte und Steuergrößen aufgeteilt. Dabei wird die optimale Anzahl der Schaltvorgänge durch vollständiges Auszählen und die Schaltfolge durch das Branch & Bound Suchverfahren ermittelt. Durch die Trennung von diskreten und reellen Größen entsteht ein sog. gewöhnliches Mehrphasen-Optimalsteuerungsproblem (MPOSP). Für die Lösung dieses Problems wird mithilfe der direkten Mehrzielmethode das MPOSP diskretisiert. Im weiteren Verlauf kommen zwei weiterentwickelte Methoden, die sequenzielle Quadratische Programmierung mit dem Trust-Region-Filter-SQP-Verfahren sowie die Quadratische Programmierung mit dem Aktive-Menge-Verfahren auf Basis der Dynamischen Programmierung, zum Einsatz [272].

Einen Schwerpunkt bei der modellprädiktiven Regelung von Fahrzeugen bildet die Dynamische Programmierung. Das Prinzip der Dynamischen Programmierung von Bellmann beruht auf der Teilung eines großen Problems in eine definierte Anzahl von Teilproblemen [36]. Bei diesem Ansatz werden die Optimallösungen der Teilprobleme bestimmt und gespeichert. Auf Basis der optimalen Teillösungen wird schrittweise die optimale Lösung des Gesamtproblems bestimmt. Durch diese Vorgehensweise können Rekursionen, das heißt die erneute Berechnung von bereits gelösten Teilproblemen, vermieden und der Berechnungsaufwand erheblich reduziert werden. Im Vergleich zu anderen Optimierungsverfahren führt die Dynamische Programmierung zu einer globalen Optimallösung. Des Weiteren wird eine einfache Berücksichtigung von Nebenbedingungen und Nichtlinearitäten ermöglicht [245].

Die Optimierung der Fahrweise wird dabei in ein sogenanntes Kürzestes-Wege-Problem bzw. in einen kantengewichteten und gerichteten Graphen übertragen, der mithilfe der Dynamischen Programmierung gelöst werden kann. Da die streckenbezogenen Informationen über den Weg vorliegen,

wird auch das Optimierungsproblem entlang des Weges in eine definierte Anzahl von Stufen diskretisiert. Als Zustandsvariablen dienen häufig die Fahrzeuggeschwindigkeit und die aktuelle Gangstufe. Das Kantengewicht wird anhand einer Kostenfunktion ermittelt, die neben dem Energiebedarf bzw. Kraftstoffverbrauch auch andere Größen berücksichtigen kann. In vielen Fällen werden zusätzlich Größen wie Fahrzeit, Geschwindigkeit und Ruck verwendet, um auch diese in der Optimierung zu berücksichtigen. Auf Basis der Steuergrößen u kann das System vom Zustand $x(k)$ in den Zustand $x(k+1)$ überführt werden, wodurch die Kosten $g(k)$ entstehen. Als Steuergrößen kommen Fahrpedalstellung bzw. Antriebsmoment, Bremspedal oder Bremskraft und Gangstufe in Betracht. Bei Hybridfahrzeugen muss zusätzlich noch das Moment der elektrischen Maschine berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Zustandsgrößen und Steuergrößen sowie der Weg diskretisiert vorliegen müssen.

Im nachfolgenden Abschnitt wird nun exemplarisch auf den Algorithmus der Vorwärtsrechnung näher eingegangen. Ausgehend vom Anfangszustand werden für die folgende Stufe für alle möglichen Kombinationen der Steuergröße die Folgezustände und die resultierenden Kosten bestimmt. Liegt der Zustand/Knoten im erlaubten Bereich, wird dieser als besucht markiert und die Kosten sowie der Ausgangszustand der Ausgangsstufe abgespeichert. In den nächsten Stufen werden dann für jeden besuchten Zustand wieder alle möglichen Kombinationen der Steuergröße angewendet und die Kosten, bestehend aus Kosten des Ausgangszustandes und Kosten für den Übergang zum nächsten Zustand, bestimmt. Wurde ein Knoten schon besucht, wird überprüft, ob die Gesamtkosten des aktuellen Pfades geringer sind. Bei geringeren Kosten werden diese und der zugehörige Zustand der Vorgängerstufe abgespeichert. Ist die Endstufe erreicht, wird Stufe für Stufe rückwärts die optimale Trajektorie mit den niedrigsten Kosten bestimmt.

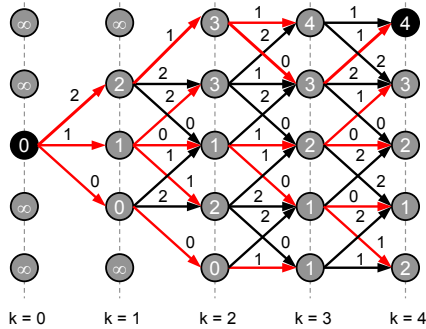


Bild 2.8: Beispiellösung eines Kürzesten-Wege-Problems mit 5 Stufen

Abbildung 2.8 zeigt exemplarisch für 5 Stufen und 5 Zuständen pro Stufe sowie 3 möglichen Steuergrößen den Ablauf des Algorithmus zur Bildung der Trajektorie mit den geringsten Kosten bzw. zur Suche des kürzesten Weges. Die roten Pfeile zeigen jeweils den kürzesten Weg zur Vorgängerstufe. Wie bereits erläutert, existiert eine Vielzahl von Arbeiten, die sich mit der Optimierung des Geschwindigkeitsprofils durch Anwendung der Dynamischen Programmierung beschäftigen.

In der Arbeit von Hellström wird eine energieeffiziente Fahrstrategie auf Basis der Dynamischen Programmierung für einen 40 t Lkw entworfen und im realen Fahrversuch getestet. Auf dem 120 km langen Autobahnabschnitt zwischen Norrköping und Södertälje (Steigungen zwischen -3 % und +3 %) zeigen die Ergebnisse eine Kraftstoffeinsparung von 2,6 % bei vergleichbarer Fahrzeit im Vergleich zur Fahrt mit herkömmlichen Tempomaten mit einer Setzgeschwindigkeit von 84 km/h [118]. Des Weiteren konnte die Anzahl der Schaltvorgänge um 42 % reduziert werden. Die entworfene Fahrstrategie berechnet dabei auf Basis der Steigungsdaten die Setzgeschwindigkeit des Tempomaten und kann nicht direkt die Gangstufe vorgeben. Für die Testfahrt wurde eine Horizontlänge von 1500 m und ein erlaubter Geschwindigkeitsbereich von 79 km/h bis 89 km/h angewendet.

In einer aufbauenden Arbeit von Hellström wird zudem simulationstechnisch untersucht, inwieweit das Einsparpotenzial durch eine Hybridisierung in Verbindung mit einer Dynamischen Programmierung weiter erhöht werden kann. Steuergrößen des Antriebsstranges sind dabei die Einspritzmenge des Dieselmotors, die Motorspannung der elektrischen Maschine, das Bremsmoment und die Gangstufe. Der konventionelle und hybridisierte Antriebsstrang verfügen beide über einen Dieselmotor mit 320 PS, wobei der hybridisierte Antriebsstrang zusätzlich aus einer elektrischen Maschine mit 40 PS sowie einer Batterie mit 3,5 kWh besteht. In der Simulation können mit hybridisiertem Antriebsstrang auf der Strecke zwischen Norrköping-Södertälje ca. 6 % Kraftstoff bei vergleichbarer Fahrzeit im Vergleich zum herkömmlichen Tempomaten eingespart werden [118]. Für die Optimierung der Fahrweise ohne Hybridisierung liegt die Einsparung mit ca. 2,5 % sehr nahe an den gemessenen Werten aus dem Fahrversuch (s. oben) [118].

Auch die Arbeit von Radke untersucht den Einsatz einer energieeffizienten Längsregelung auf Basis einer Dynamischen Programmierung [223]. Allerdings wird im Vergleich zu Hellström der Einsatz im Pkw untersucht. Außerdem liegt bei dieser Arbeit der Fokus nicht auf Autobahnen sondern auf Außerortsstraßen mit variierenden Tempolimits. Im Vergleich zu den Arbeiten von Hellström besteht des Weiteren die Möglichkeit, mithilfe eines Radarsensors in Verbindung mit einer Prädiktion auch vorausfahrende Fahrzeuge in der Optimierung der Fahrstrategie zu berücksichtigen. Ähnlich wie bei Hellström werden das Kupplungseingangsmoment, die Bremskraft und die Gangstufe als Steuergrößen verwendet. Bei einer Messfahrtenstudie mit 18 Probanden auf einem Rundkurs bei Weissach mit einer Länge von 23 km konnte im Mittel eine Einsparung von 10,2 % erzielt werden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit lag dabei im Mittel 1,3 % über den manuellen Fahrten [221, 223].

Gausemeier untersucht in ihrer Arbeit neben der Verwendung von statischen auch die Nutzung von Informationen über die aktuelle Phase und deren Restlaufzeit von Lichtsignalanlagen [100, 99]. Allerdings handelt es sich bei

dieser Arbeit nur um simulationstechnische Betrachtungen, die noch nicht im Versuchsfahrzeug umgesetzt und erprobt wurden. Auch in [142, 107] wird der Einsatz der Dynamischen Programmierung für die Bestimmung von energieoptimalen Geschwindigkeitstrajektorien im Bereich von Lichtsignalanlagen simulationstechnisch untersucht.

Daneben existieren eine Reihe weiterer Arbeiten, die sich mit dem Einsatz der Dynamischen Programmierung zur Bestimmung von energieoptimalen Geschwindigkeitstrajektorien für konventionelle und alternative Antriebe sowie mit der Optimierung des Rechenaufwands beschäftigen [274, 57, 303, 302, 304, 209, 195, 196, 157, 293].

Abweichend von der Methode der Dynamischen Programmierung beschäftigen sich außer den bereits vorgestellten Arbeiten noch Weitere mit der Optimierung des Geschwindigkeitsverlaufes für konventionell angetriebene und Hybridfahrzeuge unter Berücksichtigung von vorausfahrenden Fahrzeugen, Lichtsignalanlagen, Steigungsverlauf und Geschwindigkeitsbegrenzungen [145, 21, 137, 140, 141, 139, 242, 126, 159].

2.4 Auswirkungen auf die Fahrsicherheit

Wie bereits in der Einführung in Kapitel 1 erläutert, trägt ein energieeffizientes Fahrverhalten auch häufig zu einer Erhöhung der Fahrsicherheit bei. Daneben existieren jedoch Situationen, bei denen energieeffizientes und sicheres Fahrverhalten zu einem Zielkonflikt führen kann. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit vorhandene Fahrerassistenzsysteme den Fahrer bei der Abwägung zwischen energieeffizientem und sicherem Fahren unterstützen und unsichere Fahrzustände vermeiden können. Weiterhin ist zu klären, ob der Einsatz von Eco-Assistenzsystemen selbst zu sicherheitskritischen Zuständen führen kann.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Nutzung von ACC im Mittel zu einem niedrigeren Kraftstoffverbrauch als bei einer manuellen Fahrt ohne Assistenzsystem führt (s. Abschnitt 2.3.2). In dem bereits vorgestellten

Feldversuch [144, 37] wurde zudem untersucht, wie sich die Nutzung von ACC auf die Fahrsicherheit auswirkt. Als Bewertungsgröße wurde hier der zeitliche Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug herangezogen. Der zeitliche Abstand, der üblicherweise auch Zeitlücke genannt wird, gibt die Zeit an, die das Ego-Fahrzeug benötigt, um die aktuelle Position des vorausfahrenden Fahrzeugs zu erreichen [294]. Im Vergleich zum Abstand, berücksichtigt diese Größe auch die gefahrene Geschwindigkeit und eignet sich daher besser für die Beschreibung des Sicherheitsabstandes. Als Orientierung wird in Deutschland eine Zeitlücke von 1,8 s empfohlen. Dieser Wert entspricht einem Abstand in Metern von der Hälfte der angezeigten Geschwindigkeit in km/h. Fuhren die Probanden während des Feldversuches mit ACC, erhöhte sich auf Autobahnen die mittlere Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug um 16 % im Vergleich zur Fahrt ohne Assistenzsystem. Außerdem reduzierte sich der Anteil sehr geringer Zeitlücken unter 0,5 s um 73 %. Nicht zuletzt waren 67 % weniger starke Bremsungen im Vergleich zu Fahrten ohne ACC erforderlich [37]. Die Ergebnisse für Stadt- und Landstraßen zeigen ähnliche Ergebnisse für die Reduktion kritischer Zeitlücken mit 63 % und 81 % sowie 45 % und 32 % weniger Bremsvorgänge [186]. Zu vergleichbaren Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkungen von ACC auf die Sicherheit und den Kraftstoffverbrauch kommt der niederländische Feldversuch The Assisted Driver [19]. Der Feldversuch umfasste eine Anzahl von 20 Personen, die für einen Zeitraum von 5 Monaten mit einem VW Passat mit ACC unterwegs waren. Als Referenz diente der erste Monat, bei dem die Probanden ohne Assistenz fuhren. Die Ergebnisse zeigen auch hier, dass mit ACC im Mittel eine Kraftstoffeinsparung von 3 % erzielt werden kann. Gleichzeitig erhöht sich die mittlere Zeitlücke um ca. 0,2 s im Vergleich zur manuellen Fahrt ohne ACC [19].

Eco-Assistenzsysteme, die zusätzlich zum ACC auf Basis von Streckendaten die Regelung der Geschwindigkeit übernehmen (s. Abschnitt 2.3), tragen dazu bei, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit eingehalten und dadurch die Fahrsicherheit erhöht wird. Neben der zulässigen Höchstge-

schwindigkeit wird überwiegend auch vor Kurven die Geschwindigkeit entsprechend angepasst und dadurch eine höhere Fahrstabilität gewährleistet [250, 223, 161, 331]. Weiterhin positiv auf die Sicherheit wirken sich die Berücksichtigung von Vorfahrtsschildern und Lichtsignalanlagen aus [161], die die Wahrscheinlichkeit eines Übersehens durch den Fahrer verringern. Daneben existieren Eco-Assistenzsysteme, die auch das aktuelle Wettergeschehen bei der Wahl der Geschwindigkeit einfließen lassen und auf diesem Wege zu einer Erhöhung der Sicherheit beitragen [70].

Vergleichbar wie bei Eco-Assistenzsystemen mit automatisierter Längsregelung können auch hinweisgebende Assistenzsysteme einen Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit leisten. Jedoch liegt hier bisher der Schwerpunkt entweder auf der Erhöhung der Energieeffizienz (s. Abschnitt 2.3.1) oder der Sicherheit [299, 15]. Hinweisgebende Eco-Assistenzsysteme unterstützen den Fahrer hauptsächlich bei der Wahl der Geschwindigkeit und des Verzögerungspunktes sowie beim effizienten Beschleunigen. Hält sich der Fahrer an die Empfehlungen, können auch hinweisgebende Systeme die Fahrstabilität und somit die Fahrsicherheit erhöhen. Im Vergleich zu Systemen mit automatisierter Längsregelung wird die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern meist nur aus Sicht der Energieeffizienz betrachtet, z.B. in [162].

Aus diesem Grund werden seit einiger Zeit auch hinweisgebende Assistenzsysteme konzipiert und erprobt, die bei der Optimierung der Fahrgeschwindigkeit auch den Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen berücksichtigen [184, 211, 197]. Der Fahrer bekommt somit zusätzlich Hinweise, wenn er aufgrund eines vorausfahrenden Fahrzeugs verzögern oder seinen zu geringen Abstand wieder vergrößern soll [211]. Zusätzlich werden in der Arbeit von Yay Informationen über den Fahrzustand und das Wetter bei der Bestimmung einer sicheren und effizienten Fahrweise berücksichtigt. Um eine höhere Akzeptanz zu erreichen, wird des Weiteren die Historie bzw. das normale Fahrverhalten mit einbezogen und die Empfehlungen an den Fahrer angepasst [325].

Auch Lange untersucht in seiner Arbeit ein hinweisgebendes Assistenzsystem, das dem Fahrer zum einen die aktuelle Geschwindigkeit und den Zeitpunkt zum Verzögern im Schubbetrieb aufgrund einer Geschwindigkeitsbegrenzung anzeigt. Zum anderen wird der Fahrer über einen sicheren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug informiert. Die Hinweise werden dabei über ein kontaktanaloges Head-Up-Display und ein aktives Gaspedal an den Fahrer übermittelt [169]. In einer Simulatorstudie mit 29 Probanden reduzierte sich der Kraftstoffverbrauch beim Einsatz der kombinierten optischen und haptischen Assistenz im Mittel um 8,6 % im Vergleich zur Fahrt ohne Assistenz. Beim alleinigen Einsatz der optischen Assistenz erhöhte sich der Kraftstoffverbrauch um 5,7 %, jedoch ohne statistische Signifikanz. Des Weiteren wurden auch die Auswirkungen auf das Einhalten der Geschwindigkeitsbegrenzungen und des Sicherheitsabstandes zu vorausfahrenden Fahrzeugen untersucht. Die Ergebnisse zeigen hier, dass die mittlere Abweichung zwischen gefahrener und erlaubter Geschwindigkeit sowie die Standardabweichung der gefahrenen Geschwindigkeit beim Einsatz des Assistenzsystems mit optischen und haptischen Hinweisen signifikant verringert werden. Beim Sicherheitsabstand konnte im Vergleich zur Fahrt ohne Assistenzsystem keine Erhöhung der mittleren und minimalen Zeitlücke beobachtet werden. Der Autor erklärt dieses Ergebnis anhand der fehlenden Bewegungsdynamik und dem eingeschränkten Sichtbereich der Sichtsimulation [169].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist eine mögliche Ablenkung vom Verkehrsgeschehen durch die optische Anzeige. In der Studie von Lange wird die Ablenkung bzw. das Blickverhalten unter anderem durch den Anteil der Blicke beschrieben, die auf das Head-Up-Display gerichtet sind. Im Vergleich zur ausschließlich optischen Assistenz kann der Anteil der HUD-Blicke von ca. 26 % auf 14 % bei der rein haptischen Variante signifikant gesenkt werden. Bei Anwendung der kombinierten Variante wird der Anteil der HUD Blicke auf 19 % im Vergleich zur rein haptischen Assistenz signifikant erhöht und

liegt damit auf vergleichbarem Niveau bei Fahrten ohne Assistenzsystem [169].

Ähnliche Ergebnisse spiegelt der Overall Workload Index wieder, der in der Studie von Lange mithilfe des NASA TLX Fragebogens gemessen wurde. Der Overall Workload Index misst auf einer Skala von 0 bis 100 % die subjektive Beanspruchung des Fahrers. Bei einer rein optischen Unterstützung empfinden die Probanden keine signifikante Erhöhung ihrer Beanspruchung. Die Werte liegen mit ungefähr 28 % und 30 % auf einem vergleichbaren Niveau. Beim Einsatz der haptischen und kombiniert optisch-haptischen Assistenz sehen die Probanden eine signifikante Verringerung ihrer Beanspruchung auf 18 % und 17 % im Vergleich ohne Assistenz und rein optischer Assistenz [169]. Des Weiteren wurden die Probanden nach ihrem empfundenen Sicherheitsgefühl befragt, das im Schulnotensystem von 1 - sehr gut bis 6 - ungenügend bewertet wurde. Ohne Assistenz und beim Einsatz der rein optischen Assistenz gaben die Probanden mit 2,3 bis 2,5 ein vergleichbares Sicherheitsgefühl an. Im Vergleich zur rein optischen Assistenz verbesserte sich das Sicherheitsgefühl bei der haptischen und der kombinierten Assistenz auf ungefähr 2 und 1,6 signifikant [169]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine rein optische Assistenz nicht zu einer signifikanten Verringerung der objektiven und subjektiven Sicherheit führt, dagegen aber die Sicherheit mit einer haptischen und kombiniert optisch-haptischen Assistenz im Vergleich zur rein optischen verbessert werden kann.

Der Effekt der Ablenkung durch optische Eco-Assistenzsysteme wurde auch innerhalb des Projektes TeleFOT beleuchtet. Das Projekt TeleFOT ist eine Zusammenfassung von einer Vielzahl von Feldversuchen und Probandenstudien, die den Einfluss von sogenannten portablen Assistenzsystemen unter anderem auf den Kraftstoffverbrauch und die Sicherheit analysieren [202]. Zu den untersuchten Systemen gehört auch das Smartphone basierte System FOOTlite [87, 91, 88], welches dem Fahrer während der Fahrt optische Hinweise hinsichtlich einer energieeffizienten und sicheren Fahr-

weise zur Verfügung stellt. Die Ergebnisse der UK DFOT2 Studie mit 15 berücksichtigten Probanden zeigen, dass bei der Fahrt mit Assistenzsystem im Vergleich ohne Unterstützung keine Unterschiede hinsichtlich des Blickverhaltens festgestellt werden konnten [311]. Blickdauer und Blickhäufigkeit auf die Straße, Instrumententafel und Spiegel lagen mit und ohne Assistenz auf vergleichbarem Niveau und wiesen keine signifikanten Unterschiede auf. Lediglich die Dauer und die Häufigkeit der Blicke weg von der Straße wurden zu Gunsten der Blicke hin zum Assistenzsystem verringert. Der Anteil der gesamten Blickdauer zum Assistenzsystem lag im Mittel bei 4,3 % und die Blickhäufigkeit bei 11,3 %. Die durchschnittliche Blickdauer war 0,43 s und kein Blick auf das Assistenzsystem hatte eine Dauer von länger als 2 s [42], die als besonders unfallgefährdend angesehen wird [153]. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Lange konnte in der UK DFOT2 Studie eine signifikante Erhöhung der Zeitlücke von 13 % bzw. 0,3 s im Vergleich ohne Assistenz (2 s) ermittelt werden [278]. Des Weiteren erzielten die Probanden im Mittel eine signifikante Verringerung des Kraftstoffverbrauches von 3,5 % [315].

Auch andere Studien kommen zu dem Ergebnis, dass ein optisches Assistenzsystem nicht oder nur zu einer leicht höheren Ablenkung und Beanspruchung führt. Die Bedienung eines Radios, das Wechseln einer CD¹⁶ oder die Bedienung eines Navigationssystems führen im Vergleich zu anzeigenden Eco-Assistenzsystemen zu einer höheren Beanspruchung [237]. Dagegen können hinweisgebende Systeme, die auf einer haptischen Rückmeldung basieren, zu einer Senkung der Ablenkung sowie Beanspruchung beitragen und die Fahrsicherheit erhöhen [265]. Des Weiteren lässt sich zusammenfassen, dass der Fahrer die Nutzung des Eco-Assistenzsystems an die aktuelle Verkehrssituation anpasst. In einer Studie mit 27 Probanden verringerte sich der Zeitanteil von Blicken auf das HMI bei für den Fahrer anspruchsvolleren Situation signifikant. Das heißt die Probanden passten die HMI Blicke

¹⁶ CD - Compact Disc

an die aktuelle Situation zur Gewährleistung der Fahrsicherheit an [235]. Eine Art Priorisierung der Ziele Kraftstoffeinsparung, Verkürzung der Fahrzeit und Sicherheit konnte in einer weiteren Studie festgestellt werden. Sicherheit stand für die Probanden im Vergleich zu den anderen Kriterien Fahrzeit und Kraftstoffeinsparung stets an höchster Stelle [74].

Die Erhöhung des Unfallrisikos durch visuelle Eco-Assistenzsysteme hängt also von der resultierenden Beanspruchung des Fahrers durch das System ab. Je einfacher die Aufgabe für den Fahrer ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Unfallrisiko durch ein derartiges System erhöht wird [153]. Aus diesem Grund ist es wichtig, möglichst einfache und gut verständliche Mensch-Maschine-Schnittstellen zu entwickeln und die Informationen individuell einzublenden [187, 152, 43].

Neben einer veränderten Fahrweise und Beanspruchung des Fahrers können auch Sicherheitsrisiken aufgrund der Verfügbarkeit des Eco-Assistenzsystems auftreten. Beispielsweise kann eine Abweichung der hinterlegten zulässigen Höchstgeschwindigkeit dazu führen, dass eine zu hohe Geschwindigkeit vom System oder vom Fahrer eingeregelt wird. Ein weiteres denkbares Szenario ist eine verspätete oder ausbleibende Reaktion des Eco-Assistenzsystems wegen eines eingeschränkten Sichtbereichs oder einer Fehlfunktion des Sensors. Für diese Art der Beeinflussung der Sicherheit ist es deshalb umso wichtiger, dass der Fahrer ständig das System überwacht, nicht abgelenkt oder bei automatisierten Systemen zu anderweitigen Tätigkeiten verleitet wird und somit bei Fehlfunktionen oder Erreichen der Systemgrenze rechtzeitig eingreifen kann [58]. Bei Probandenstudien mit ACC und Spurhalteassistent (LKS¹⁷) konnten keine negativen Effekte hinsichtlich einer Fehleinschätzung der Systemgrenzen und übermäßiges Vertrauen in das System festgestellt werden [54, 310].

Mit der Beeinflussung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer hat sich nach bisheriger Kenntnis nur eine Studie ansatzweise be-

¹⁷ LKS - Lane Keeping Support

schäftigt. In einer Messfahrtenstudie in Japan wurde untersucht, ob bei Anwendung einer energieeffizienten Fahrweise nachfolgende Fahrzeuge vermehrt das Ego-Fahrzeug überholen [20]. Die Ergebnisse zeigen jedoch keinen Zusammenhang zwischen einer energieeffizienten Fahrweise und dem Anstieg der Überholvorgänge. Des Weiteren wurde auch der Einfluss eines Hinweisschildes untersucht. Das Hinweisschild weist dabei den Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs darauf hin, dass das vorausfahrende Fahrzeug eine ökonomische Fahrweise mit geringerer Beschleunigung und Verzögerung umsetzt. Bei Fahrten mit Hinweisschild im Vergleich zu Fahrten ohne Hinweisschild erhöhte sich der Anteil von Überholvorgängen von 18,3 % auf 27,1 % [20]. Obwohl auch hier keine statistische Signifikanz vorliegt, kann vermutlich von einem gewissen Trend hin zu einem höheren Anteil von Überholvorgängen ausgegangen werden. Ein dauerhaftes Hinweisschild ist somit wahrscheinlich keine geeignete Maßnahme, um nachfolgende Fahrer zu einem gemäßigerem Fahrverhalten zu bewegen und die Eco-Fahrweise zu akzeptieren [20].

2.5 Schlussfolgerungen und Fokussierung der Arbeit

Der Bereich Eco-Fahrerassistenzsysteme ist ein breitangelegtes Forschungsgebiet. Eine wichtige Voraussetzung um energieeffizientes Fahren zu unterstützen und zu automatisieren, ist die Umfelderkennung. Aufgrund des erforderlichen Vorausschauhorizontes sind hier insbesondere Systeme zur Umfelderkennung mit Reichweiten von mehreren hundert Metern im Fokus. Für den nahen bis mittleren Bereich kommen in erster Linie Video-, Radar- und Lidarsensoren infrage. Für weiter entfernt liegende Ereignisse und Streckeneigenschaften eignen sich zum einen die Car-to-X-Kommunikation und zum anderen die digitale Karte. Auf Basis der Umfelderkennung wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Eco-Fahrerassistenzsystemen entwickelt und erprobt sowie vereinzelt auch in Serie gebracht. Besonders in

Verzögerungssituationen kann der Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu einer herkömmlichen Fahrweise um bis zu 60 % reduziert werden, wohingegen sich die Fahrzeit dabei um bis zu 30 % erhöhen kann. Insgesamt ergeben sich in Abhängigkeit der Strecken- und Verkehrsverhältnisse im realen Fahrbetrieb über die gesamte Strecke gesehen im Mittel ungefähr 10 % bis 15 % Einsparpotenzial. Eine erhebliche Anzahl von Untersuchungsergebnissen deutet drauf hin, dass Eco-Assistenzsysteme gleichzeitig einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit leisten. Vorausschauenderes Fahren mit angepasster Geschwindigkeit trägt zu einer höheren Fahrstabilität und einem größeren Sicherheitsabstand bei. Sicherheitsrisiken, die aufgrund von Ablenkung durch hinweisgebende Eco-Fahrerassistenzsysteme entstehen können, werden als leicht erhöht, aber in Verbindung mit einfachen und gut verständlichen Anzeigen als beherrschbar angesehen. Die im Einführungskapitel 1 aufgeführten Bedenken bezüglich der Fahrsicherheit können bei Anwendung von Eco-Fahrerassistenzsystemen insbesondere für das Ego-Fahrzeug und die vorausfahrenden Fahrzeugen nicht bestätigt werden.

Demgegenüber existieren bezüglich der Beeinträchtigung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern und daraus resultierenden sicherheitskritischen Situationen, wie zu dichtes Auffahren und Überholen durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer, bisher keine aussagekräftigen Erkenntnisse. Außerdem wurden bisher für dieses Problem keine wirkungsvollen Konzepte aufgezeigt, um einen Konflikt zwischen sicherem und energieeffizientem Fahren zu entschärfen oder zu verhindern.

Der Fokus der Arbeit wird deshalb auf die Untersuchung der Beeinflussung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern und die Beeinflussung der Fahrsicherheit gelegt. Des Weiteren sollen Konzepte für Eco-Fahrerassistenzsysteme entworfen und erprobt werden, die einen möglichen Zielkonflikt zwischen sicherem und energieeffizientem Fahren entschärfen.

Dazu werden im folgenden Kapitel 3 zunächst energieeffiziente Fahrweisen analysiert, die zu einer Beeinträchtigung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern und der Sicherheit führen können. Im darauf folgenden Kapitel 4

werden mithilfe von Fahrversuchen im Realverkehr ausgewählte Fahrstrategien im Hinblick auf die Beeinflussung der Fahrsicherheit untersucht und bewertet. Die Ergebnisse des Fahrversuchs im Realverkehr dienen im nächsten Kapitel 5 als Grundlage, um Konzepte zur Erhöhung der Sicherheit von Eco-Assistenzsystemen zu entwerfen und simulationstechnisch zu analysieren. Abschließend wird in Kapitel 6 das in der Simulation analysierte Konzept in einem Versuchsfahrzeug umgesetzt und in einer Messfahrtenstudie dessen Wirksamkeit im Realverkehr untersucht.

3 Beeinflussung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer

Die Darstellung des Standes der Technik und Wissenschaft im letzten Kapitel zeigt, dass schon zahlreiche Untersuchungen zur energieeffizienten Längsregelung existieren. Sie zeigt hingegen auch auf, dass der Einfluss von energieeffizientem Fahren auf nachfolgende Verkehrsteilnehmer und daraus mögliche resultierende sicherheitskritische Fahrzustände bisher kaum untersucht wurden. Um dieser Fragestellung nach zu gehen, wird in diesem Kapitel analysiert, unter welchen Umständen es bei Anwendung energieeffizienter Fahrstrategien zu einer Senkung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer kommen kann. Dazu werden für eine aussagekräftige Bewertung zunächst Bewertungsgrößen für Energieeffizienz und Sicherheit definiert. Im darauffolgenden Abschnitt werden verschiedene Einflussfaktoren identifiziert, die vermutlich zu einer Entstehung einer sicherheitskritischen Situation beitragen und diese verstärken oder abschwächen können.

3.1 Bewertungsgrößen

Für die Beschreibung von Sicherheit und Energieeffizienz werden im nachfolgenden Abschnitt zunächst Bewertungsgrößen definiert. Die Bewertungsgrößen sollen dazu dienen, um später verschiedene Fahrstrategien und Situationen hinsichtlich ihrer Fahrsicherheit und Energieeffizienz vergleichen zu können.

3.1.1 Energieeffizienz

Effizienz beschreibt im Allgemeinen das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Ein System oder eine Vorgehensweise ist dabei umso effizienter, je geringer der Aufwand bei gleichbleibendem Nutzen ist. In Bezug auf die Energieeffizienz bedeutet das, dass ein Fahrzeug energieeffizienter ist, wenn es beispielsweise auf gleicher Strecke weniger Kraftstoff benötigt.

Die Energieeffizienz eines Fahrzeugs hängt zu einem großen Teil von der Energieeffizienz seiner Energiewandler wie Motor und Getriebe ab. Die Energieeffizienz von Energiewandlern wird durch den Wirkungsgrad (η) ausgedrückt, der das Verhältnis von abgeführter (E_{ab}) und zugeführter Energie (E_{zu}) beschreibt (s. Gleichung 3.1).

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} \quad (3.1)$$

Bei einem verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug entspricht der Wirkungsgrad des Antriebstranges somit dem Verhältnis der abgegebenen Energie an den Rädern zur Überwindung der Fahrwiderstände und der zugeführten Energie in Form des Kraftstoffs. Der Wirkungsgrad des Antriebstranges beeinflusst die Energieeffizienz eines Fahrzeuges jedoch nicht allein. Daneben haben auch die Fahrwiderstände und die Fahrweise einen entscheidenden Einfluss auf die Energieeffizienz (s. Kapitel 1).

Die verbreitetste Größe zur Beschreibung der Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen ist der Kraftstoffverbrauch in Liter (l) oder bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen der Energiebedarf in Kilowattstunden (kWh) bezogen auf die zurückgelegte Strecke. Dieser wird auch als Streckenverbrauch (b_s) bezeichnet. Für die Beschreibung der Energieeffizienz wird in der vorliegenden Arbeit deshalb der Streckenverbrauch in Liter pro 100 km herangezogen.

3.1.2 Fahrsicherheit

Für die Bewertung der Fahrsicherheit im Zusammenhang mit nachfolgenden Fahrzeugen sind Größen erforderlich, die die Interaktion zwischen zwei Fahrzeugen beschreiben. Dazu gehört zum einen der Abstand (d_x) und zum anderen das Annäherungsverhalten bzw. die Fahrzeuggeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs v_e und des nachfolgenden Fahrzeugs v_h (s. Abbildung 3.1).

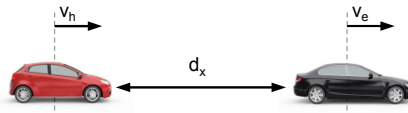


Bild 3.1: Beschreibung der Fahrzeug zu Fahrzeuginteraktion durch Abstand (d_x) und Geschwindigkeit des hinteren (v_h) und des Ego-Fahrzeugs (v_e)

Time Headway

Damit der Fahrer rechtzeitig auf ein abruptes Bremsmanöver des vorausfahrenden Fahrzeugs reagieren kann, wird ein ausreichender Sicherheitsabstand benötigt. Die alleinige Berücksichtigung des Abstandes (d_x) ist hierfür nicht aussagekräftig genug. Zum einen erhöht sich der Bremsweg mit dem Quadrat der Geschwindigkeit und zum anderen wird bei gleichbleibender Reaktionszeit eine zur Geschwindigkeit proportional ansteigende Strecke zurückgelegt. Eine Größe, die dieses Verhalten ansatzweise berücksichtigt, ist der zeitliche Abstand τ zwischen zwei Fahrzeugen [86]. Eine andere Bezeichnung für diese Größe ist auch Zeitlücke oder im englischen Sprachraum Time Headway. Die Zeitlücke berechnet sich aus dem Abstand und der Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs (s. Gleichung 3.2).

$$\tau = \frac{d_x}{v_h} \quad (3.2)$$

Wie bereits erläutert, wird in Deutschland eine Zeitlücke von 1,8 s empfohlen. Dieser Wert entspricht der sogenannten „Tacho-Halbe-Regel“. Das heißt bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h soll ein Abstand von 50 m zum vorausfahrenden Fahrzeug gehalten werden. Daneben ist in Deutschland bei Unterschreitung einer Zeitlücke von 0,9 s mit einer Verwarnung oder einem Bußgeld zu rechnen. Das heißt, eine geringe Zeitlücke bedeutet nicht unmittelbare Gefahr, sie kann sich aber bei einer plötzlich auftretenden starken Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs dahin entwickeln.

Time to Collision

Zur Bewertung der Fahrsicherheit zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen ist neben der Zeitlücke auch die Bewertung des Annäherungsverhaltens erforderlich. Im Vergleich zur Zeitlücke, die nur eine potenzielle Gefahr signalisiert, zeigt die Time to Collision (TTC) ein akutes Kollisionsrisiko an. Die Time to Collision (t_{ic}) ist definiert als Quotient des Abstandes und der Relativgeschwindigkeit (Δv) und gibt die Zeit an, bis beide Fahrzeuge unter Beibehaltung ihrer Geschwindigkeit kollidieren (s. Gleichung 3.3 und Abbildung 3.1) [116].

$$t_{ic} = \frac{d_x}{\Delta v} \quad \text{mit} \quad \Delta v = v_h - v_e \quad (3.3)$$

Bei Betrachtung beider Definitionen fällt auf, dass eine niedrige TTC nur dann auftreten kann, wenn gleichzeitig auch eine geringe Zeitlücke besteht [294]. Aufgrund der Definition beider Größen ist es des Weiteren nicht möglich, eine TTC zu erreichen, die geringer als die aktuelle Zeitlücke ist (s. Abbildung 3.2).

Eine niedrige Zeitlücke und niedrige TTC kennzeichnen demnach ein akutes Unfallrisiko. Liegt eine geringe Zeitlücke und eine hohe TTC vor, so kann dieser Zustand als Drängeln oder dichtes Auffahren bezeichnet werden. Der normale Bereich wird in der Regel durch eine mittlere Zeitlücke und hohe TTC charakterisiert.

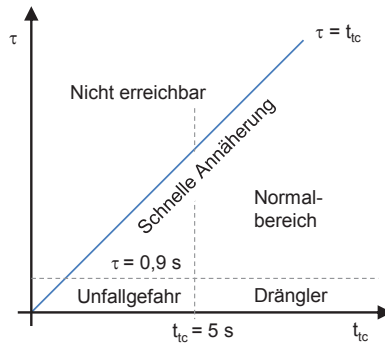


Bild 3.2: Gegenüberstellung von Zeitlücke (τ) und Time to Collision (t_{tc}) (nach [90, 294])

Im Vergleich zur Zeitlücke existieren bei der Time to Collision keine Empfehlungen oder Grenzwerte seitens des Gesetzgebers, unterhalb dieser Verwarnungen oder Bußgelder verhängt werden. Minderhoud und Vogel zitieren in ihren Arbeiten mehrere Studien, die als kritische Grenze für die Time to Collision Werte zwischen 1,5 s bis 5 s angeben [199, 294]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass je niedriger die Time to Collision ist, desto höher ist das Risiko einer Kollision. Zur Bewertung der Fahrsicherheit bei Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien werden im weiteren Verlauf der Arbeit die Zeitlücke und die Time to Collision als Bewertungsgrößen verwendet.

3.2 Einflussfaktoren

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Einflussfaktoren aufgezeigt, die zum einen vermutlich das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern und zum anderen die Längsdynamik des Ego-Fahrzeugs beeinflussen (s. Abbildung 3.3). Zu den Einflussfaktoren gehören unter anderem die Fahrer bzw. die nachfolgenden Verkehrsteilnehmer selbst.

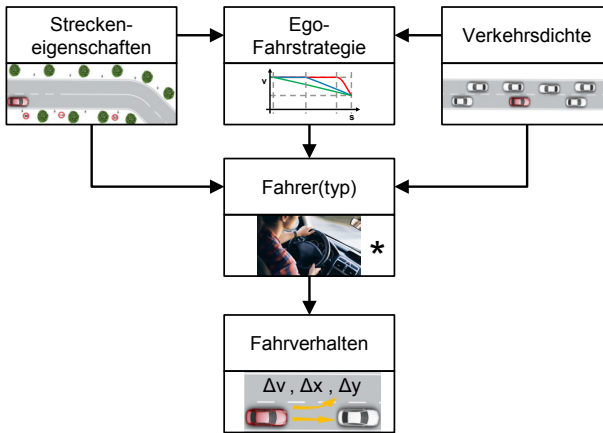


Bild 3.3: Einflussfaktoren, die auf die Ego-Fahrstrategie und den nachfolgenden Fahrer wirken.
(*) Bildquelle: wurde von [295] nach <https://pixabay.com/de/fahren-auto-autofahren-2934477/> geändert, abgerufen am 02.04.2018

Zum Beispiel kann es ausschlaggebend sein, ob es sich um einen defensiven oder sportlichen nachfolgenden Fahrer handelt. Ein weiterer Einflussbereich sind die Streckeneigenschaften wie Anzahl der Fahrspuren, Einsehbarkeit und Steigung. Sie haben einerseits Einfluss auf das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern und andererseits auch auf das längsdynamische Verhalten des Ego-Fahrzeugs. Daneben spielt vermutlich auch die Verkehrsdichte sowie gebundener oder ungebundener Verkehr eine Rolle. Nicht zuletzt hat auch, wie in Abschnitt 2.1 bereits beschrieben, die angewendete Fahrstrategie des Ego-Fahrzeugs einen Einfluss auf die Längsdynamik und folglich auf den nachfolgenden Verkehr.

3.2.1 Fahrertyp

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren, wenn es um das Fahrverhalten geht, ist der Fahrer selbst. Vorausgesetzt wird dabei natürlich, dass der Fahrer das Fahrzeug selbst steuert und nicht ein Fahrerassistenzsystem, welches bei-

spielsweise die Längsregelung übernimmt. Die grundsätzliche Einstellung und gegenwärtige Verfassung des Fahrers entscheidet darüber, wie er auf die auf ihn einwirkenden Situationen und Reize reagiert. Zum Beispiel ist davon auszugehen, dass ein vorausschauender und gelassener sowie ökonomischer Fahrer rücksichtsvoller auf eine energieeffiziente Fahrweise des vorausfahrenden Fahrzeugs reagiert als ein aggressiver oder sportlicher Fahrer. Der gelassene Fahrer wird vermutlich das Fahrverhalten akzeptieren und sich an die Situation anpassen. Das heißt, er wird weder versuchen zu überholen noch zu drängeln und folglich keine unsichere Situation herbeiführen.

3.2.2 Streckeneigenschaften

Die Streckeneigenschaften sind neben dem Fahrer wichtige Einflussfaktoren, die einerseits die Fahrstrategie bzw. den Verlauf der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und dadurch wiederum das Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers beeinflussen können. Andererseits wirken auch die Streckeneigenschaften direkt auf das Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers.

Anzahl der Fahrspuren Die Anzahl der Fahrspuren hat in erster Linie Einfluss auf die Möglichkeit, das Ego-Fahrzeug zu überholen. Existieren beispielsweise zwei Fahrspuren in eine Richtung, kann bei einer aus Sicht des nachfolgenden Verkehrsteilnehmers nicht tolerierbaren Fahrweise dieser das Ego-Fahrzeug überholen [217]. Dadurch reduziert sich die Wahrscheinlichkeit für ein unsicheres Fahrverhalten. Vorausgesetzt ist in diesem Fall natürlich eine freie Überholspur, die nicht durch andere Verkehrsteilnehmer oder das Ego-Fahrzeug selbst belegt ist. Natürlich kann auch auf einspurigen Straßen der nachfolgende Fahrer das Ego-Fahrzeug überholen, jedoch besteht dabei beispielsweise auf schlecht einsehbaren Streckenabschnitten oder mit dichtem Gegenverkehr ein erhebliches Risiko, mit entgegenkommenden Fahrzeugen zu kollidieren. Es lässt sich also festhalten, dass vermutlich einspurige Streckenabschnitte, die zudem keine Überhol-

möglichkeit bieten, im Mittel zu einem risikoreicheren Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern führen, wenn das Ego-Fahrzeug eine energieeffiziente Fahrstrategie anwendet.

Gefahrene Geschwindigkeit Neben der Anzahl der Fahrspuren ist davon auszugehen, dass auch die gefahrene Geschwindigkeit eine beeinflussende Wirkung auf das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern hat. Mit der gefahrenen Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit gemeint, die unter den vorherrschenden Bedingungen von den Verkehrsteilnehmern auf diesem Streckenabschnitt im Mittel gefahren wird. Die gefahrene Geschwindigkeit wird von vielen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören beispielsweise die zulässige Geschwindigkeitsbegrenzung, die Licht- und Wetterverhältnisse, Fahrbahnbreite und Krümmung, Einsehbarkeit, Steigung sowie die Verkehrsdichte [217]. In vielen Fällen weicht die gefahrene Geschwindigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ab. Das heißt besonders bei einer höheren gefahrenen als zulässigen Geschwindigkeit führt eine frühzeitige Verzögerung bzw. abweichende Fahrgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs zu einer Irritation bei nachfolgenden Verkehrsteilnehmern. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn davon ausgegangen wird, dass ein Fahrerassistenzsystem zur energieeffizienten Längsregelung die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht überschreitet. Entgegengesetzt dazu wird eine niedrigere gefahrene Geschwindigkeit dazu beitragen, das Konfliktpotenzial zu verringern.

Zulässige Höchstgeschwindigkeit Auch die Änderungshäufigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist eine wichtige Einflussgröße, die das längsdynamische Verhalten des Ego-Fahrzeugs und das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern beeinflussen kann [217]. Des Weiteren ist sie ein Indikator für die Häufigkeit von Konfliktsituationen zwischen Ego-Fahrzeug und nachfolgenden Fahrern. Eine Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit führt oft auch zu einer Änderung der gefahrenen

Geschwindigkeit. Insbesondere bei Verzögerungsvorgängen mit hohen Änderungen der Geschwindigkeit ist mit erheblichen Abweichungen von der gefahrenen Geschwindigkeit zu rechnen, die zu Irritationen von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern führen können. Treten zudem die Änderungen mit einer hohen Häufigkeit auf, so steigt die Relevanz derartiger Situationen, die in einer Verminderung der Fahrsicherheit resultieren können.

Für eine Abschätzung der Häufigkeit wurde die Bundesstraße B1 von Unna nach Berlin untersucht [244]. Die Ergebnisse für die Strecke mit einer Länge von ca. 450 km zeigen insgesamt 401 Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Im Mittel ändert sich auf dieser Strecke somit die Höchstgeschwindigkeit einmal pro gefahrenen Kilometer. Die Verteilung der Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit macht deutlich, dass die häufigsten Änderungen zwischen 30 km/h und 50 km/h liegen (s. Abbildung 3.4).

Diese machen insgesamt 69 % aller Änderungen aus, wovon 34 % auf negative Änderungen sprich Verzögerungen und 35 % auf positive Änderungen sprich Beschleunigungen entfallen.

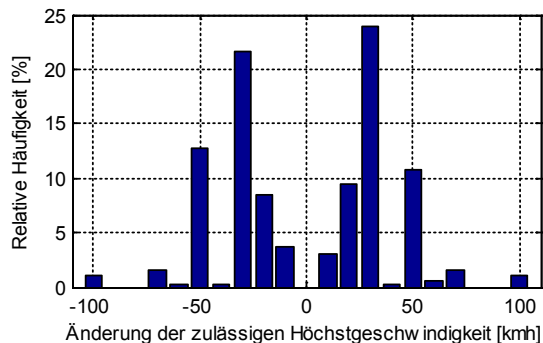


Bild 3.4: Relative Häufigkeit von Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf der Bundesstraße B1 zwischen Unna und Berlin (450 km, N=401) [244]

Das bedeutet, dass auf der analysierten Strecke bei Anwendung energieeffizienter Fahrstrategien häufig und mit hohen Abweichungen von der gefahrenen Geschwindigkeit zu rechnen ist. Es besteht also die Wahrscheinlichkeit, dass es häufig zu Irritation und Verminderungen der Fahrsicherheit kommen wird. Die Ergebnisse für die Bundesstraße B1 sind nicht repräsentativ und können nur als eine erste Abschätzung angesehen werden.

Vorhersehbarkeit Ein weiterer Einflussfaktor ist die Vorhersehbarkeit. Sie beeinflusst in erster Linie das Fahrverhalten der nachfolgenden Verkehrsteilnehmer. Unter Vorhersehbarkeit wird in dieser Arbeit die Einsehbarkeit oder Bekanntheit des Streckenabschnittes verstanden. Beispielsweise ist es denkbar, dass eine Abweichung des Ego-Fahrzeugs von der erwarteten Fahrweise zu einer verstärkten Veränderung des Fahrverhaltens des nachfolgenden Fahrers führt, wenn der Grund für die Änderung für den nachfolgenden Fahrer noch nicht ersichtlich ist [217]. Das kann einerseits einer schlechten Einsehbarkeit oder andererseits der Unbekanntheit des Streckenabschnittes geschuldet sein. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach einer nicht einsehbaren Kurve. Bei Anwendung einer energieeffizienten Fahrweise wird das Ego-Fahrzeug schon frühzeitig vor der Kurve mit der Verzögerung beginnen. Durch die schlechte Einsehbarkeit oder Unbekanntheit des Streckenabschnittes führt dieses Fahrverhalten vermutlich zu einem Unverständnis beim nachfolgenden Verkehrsteilnehmer. Unter Umständen wird dadurch der nachfolgende Fahrer dazu bewegt, sein Fahrverhalten zu verändern. Für die Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien bedeutet das, dass eine abweichende Fahrweise vermutlich besonders dann zu Konflikten bei nachfolgenden Verkehrsteilnehmern führt, wenn der Grund für diese Fahrweise nicht nachvollziehbar ist.

Fahrwiderstände Wie schon erläutert, hat die Topografie einen Einfluss auf die mittlere gefahrene Geschwindigkeit eines Streckenabschnittes. Daneben übt die Topografie aber auch einen erheblichen Einfluss auf den Geschwindigkeitsverlauf von energieeffizienten Fahrstrategien aus. Besonders bei Verzögerungsvorgängen im Schub- und Segelbetrieb verlängert oder verkürzt sich die Strecke und Dauer der Verzögerung signifikant. Das hat zur Folge, dass sich bei einer leichten negativen Steigung die Geschwindigkeit nur langsam verringert und die Ausrollstrecke um einige hundert Meter verlängert wird. Für eine möglichst energieeffiziente Nutzung der kinetischen und potenziellen Energie muss das Ego-Fahrzeug in diesem Fall schon sehr früh mit der Verzögerung beginnen. Dadurch weicht besonders im mittleren Abschnitt der Verzögerung die Geschwindigkeit von der zulässigen und auch der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Bei einer derart hohen Abweichung über lange Zeit kann davon ausgegangen werden, dass dieses Fahrverhalten bei nachfolgenden Verkehrsteilnehmern verstärkt zu Irritation und Unverständnis führt [217].

3.2.3 Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte hat einen Einfluss auf die Fahrstrategie des Ego-Fahrzeugs und vermutlich auch auf die Fahrweise von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern [217].

Bei freier Fahrt kann das Ego-Fahrzeug ohne Einschränkungen die optimale Fahrweise hinsichtlich der Energieeffizienz durchführen. Dagegen wird beim gebundenen Verkehr bzw. bei Folgefahrt die Fahrweise des Ego-Fahrzeugs durch das vorausfahrende Fahrzeug beeinflusst bzw. begrenzt. In diesem Fall kommen Fahrstrategien zum Einsatz, die das Fahrverhalten der vorausfahrenden Fahrzeuge antizipieren und entsprechend die Fahrweise anpassen (s. Abschnitt 2.3.2).

Weiterhin ist davon auszugehen, dass auch nachfolgende Fahrer durch die Verkehrsdichte beeinflusst werden. Dabei wird das Fahrverhalten von nach-

folgenden Verkehrsteilnehmern vermutlich einerseits von Fahrzeugen vor dem Ego-Fahrzeug und andererseits von Fahrzeugen direkt hinter ihnen beeinflusst. Beispielsweise ist es vorstellbar, dass sich von dem Ego-Fahrzeug entfernende Fahrzeuge bei Anwendung einer abweichenden bzw. energieeffizienten Fahrweise des Ego-Fahrzeugs eine andere Auswirkung auf das Fahrverhalten von nachfolgenden Fahrern haben, als wenn die vorausfahrenden Fahrzeuge im dichten Abstand zum Ego-Fahrzeug fahren. Entfernen sich die Fahrzeuge oder hat das Ego-Fahrzeug freie Fahrt, wird somit eine abweichende Fahrweise des Ego-Fahrzeugs vermutlich zu einer stärkeren Irritation und Ablehnung führen, als wenn die Fahrzeuge dicht vor dem Ego-Fahrzeug bleiben. Neben der veränderten Fahrweise des Ego-Fahrzeugs können nachfolgende Verkehrsteilnehmer auch durch ihre jeweiligen Nachfolger beeinflusst bzw. durch dichtes Auffahren zusätzlich unter Druck gesetzt werden.

3.2.4 Fahrstrategien

Die Fahrstrategie bestimmt im Wesentlichen unter Berücksichtigung der Fahrwiderstände und der Verkehrsdichte den Verlauf der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs. In Abhängigkeit der gewählten Strategie führt dies zu einem Fahrverhalten, das mehr oder weniger von der gefahrenen Geschwindigkeit abweicht und somit das Fahrverhalten von nachfolgenden Fahrern beeinflusst [217].

Verzögerung Für die Verzögerung existieren, wie in Abschnitt 2.1 bereits erläutert, verschiedene Möglichkeiten, diese energieeffizient zu realisieren. Die Anwendung des Segelbetriebes führt im Vergleich zum Schubbetrieb und zur Rekuperation im Normalfall zur größten Abweichung von der gefahrenen Geschwindigkeit. Bei einer hohen negativen Steigung kehrt sich das Verhältnis um und der Segelbetrieb führt zu einem Halten oder sogar Beschleunigen des Ego-Fahrzeugs. In diesem Fall überwiegt die Hangab-

triebskraft im Vergleich zu den übrigen Fahrwiderständen. Bei Anwendung des Segelbetriebes von 100 km/h auf 50 km/h in der Ebene treten im Vergleich zu einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit und anschließender Verzögerung über die Radbremse Zeitverluste von bis zu 30 % auf. Im Zusammenhang mit den zuvor erläuterten Fahrertypen, Streckeneigenschaften und der zuvor erläuterten Verkehrsdichte kann dies zu erheblichen Irritationen und unsicheren Fahrweisen bei nachfolgenden Fahrern führen.

Konstantfahrt Auch bei energieeffizienten Strategien für den Bereich der Konstantfahrt können Irritationen von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern hervorgerufen werden. Die Sägezahnfahrweise und die Ausnutzung der topografischen Verhältnisse führen zu einer größeren Variation der Geschwindigkeit im Vergleich zur üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeit. Die Abweichungen von der gefahrenen bzw. zulässigen Höchstgeschwindigkeit hängen dabei stark vom zugelassenen Toleranzband ab. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Sägezahnfahrweise aufgrund des häufigen Wechsels zwischen Beschleunigung und Verzögerung zu einem unkomfortablen Verhalten für den Ego-Fahrer führen würde und deshalb in Zukunft nicht zu Anwendung kommen wird.

Beschleunigung Der eigentliche Vorgang der Beschleunigung stellt im Hinblick auf eine Beeinflussung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern eine untergeordnete Rolle dar, da eine energieeffiziente Beschleunigung in vielen Fällen im Vergleich zur Beschleunigung mit maximalem Moment nur einen geringen Zeitverlust zur Folge hat. Einen größeren Einfluss hat dagegen das spätere Beschleunigen oder das Beschleunigen auf eine geringere Geschwindigkeit, weil zum Beispiel bald schon wieder verzögert werden muss (s. Abschnitt 2.1). In diesem Fall ist eine höhere Abweichung von der gefahrenen Geschwindigkeit zu erwarten, die vermutlich zu einer stärkeren Beeinträchtigung von nachfolgenden Fahrern führt.

3.2.5 Zusammenfassung

Die Analyse hat gezeigt, dass der Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs mit hoher Wahrscheinlichkeit ein wichtiger Einflussfaktor ist. Handelt es sich um einen gelassenen Fahrer, ist mit einer größeren Toleranz bei Abweichungen vom gewünschten Fahrverhalten zu rechnen. Dagegen wird ein sportlicher oder aggressiver Fahrer eher wenig Verständnis zeigen und ggf. versuchen zu überholen oder den vorausfahrenden Fahrer durch dichtes Auffahren unter Druck zu setzen.

Neben dem Fahrertyp dürften auch die Streckeneigenschaften eine wichtige Rolle spielen. Insbesondere bei einspurigen Strecken, die schlecht einsehbar sind und bei denen die gefahrene Geschwindigkeit über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegt, ist bei Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien eine verstärkte Beeinflussung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern zu erwarten. Des Weiteren ist anzunehmen, dass besonders bei hohen Änderungen der Geschwindigkeit und folglich großen Abweichungen von der gefahrenen Geschwindigkeit mit Konflikten mit nachfolgenden Verkehrsteilnehmern zu rechnen ist.

Daneben scheint auch die Verkehrsdichte vor und hinter dem Ego-Fahrzeug ein wichtiger Einflussfaktor zu sein. Bei einer dichten Verkehrslage werden alle Fahrzeuge insgesamt mit einem geringeren Abstand zueinander fahren und eine energieeffiziente Folgefahrt sich weniger stark auswirken. Hingegen wird bei freier Strecke oder einer geringen Verkehrsdichte mit einem höheren Unverständnis der nachfolgenden Verkehrsteilnehmer zu rechnen sein.

Hinsichtlich energieeffizienter Fahrstrategien ist zu erwarten, dass Strategien für die energieeffiziente Verzögerung sowie die Beschleunigung auf eine geringere Geschwindigkeit als die gefahrene Geschwindigkeit zu den Strategien gehören, die nachfolgende Fahrer mit am stärksten beeinflussen. Diese Strategien führen in der Regel über eine lange Zeit zu einer großen Abweichung von der gefahrenen und zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

3.3 Festlegung des Untersuchungsgegenstandes

Um der Frage nachzugehen, inwieweit sich energieeffizientes Fahren auf die Fahrsicherheit auswirkt, werden nun verschiedene Versuche für den Realverkehr definiert. Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes von Versuchen im Realverkehr werden auf Basis der vorhergehenden Überlegungen diejenigen Situationen ausgewählt, bei denen mit einer signifikanten Beeinflussung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern und folglich der Fahrsicherheit zu rechnen ist.

In einer ersten Studie soll der Frage nachgegangen werden, wie sich die Anwendung eines Eco-ACC Systems auf das Folge- bzw. Abstandsverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern im Vergleich zur manuellen Fahrweise auswirkt. In diesem Zusammenhang soll dabei auch der vermutete Einfluss der Verkehrsdichte untersucht werden.

Da das Eco-ACC System nur eine energieeffiziente Folgeregelung umsetzt, ist das Ziel einer zweiten Studie, den Einfluss von Fahrstrategien zu untersuchen, die auch auf Änderungen von Geschwindigkeitsbegrenzungen vorausschauend reagieren. Aufgrund des vermuteten hohen Einflusses soll das Augenmerk hierbei auf Verzögerungs- und Beschleunigungsstrategien gelegt werden. Bei der Auswahl der Teststrecke sind nach Möglichkeit besonders einflussreiche Streckeneigenschaften wie einspurige Fahrbahnen in jede Richtung, eine hohe Abweichung von der gefahrenen Geschwindigkeit, eine hohe Absenkung bzw. Anhebung der Geschwindigkeitsbegrenzung und eine geringe Einsehbarkeit zu berücksichtigen.

4 Untersuchung der Fahrsicherheit bei Anwendung energieeffizienter Fahrstrategien

Im folgenden Kapitel wird untersucht, inwieweit sich eine energieeffiziente Fahrweise auf nachfolgende Verkehrsteilnehmer und deren Fahrverhalten sowie auf die Fahrsicherheit im Realverkehr auswirkt. Ziel der ersten Studie ist es, den Einfluss eines Eco-ACC zu untersuchen, das eine energieeffiziente Folgeregelung ermöglicht (s. Abschnitt 4.1). In einer weiteren Studie wird dagegen der Einfluss von Fahrstrategien untersucht, die eine vorausschauende Verzögerung und Beschleunigung auf Geschwindigkeitsbegrenzungen realisieren (s. Abschnitt 4.2).

4.1 Energieeffiziente Folgefahrt mit Eco-ACC

Zur Untersuchung des Einflusses von Eco-ACC auf nachfolgende Verkehrsteilnehmer und die Fahrsicherheit wird zunächst das Studiendesign und der Aufbau des Versuchsträgers vorgestellt. Danach wird die Vorgehensweise bei der Auswertung der Messdaten erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse präsentiert und diskutiert sowie Schlussfolgerungen gezogen. Die Ergebnisse der Studie wurden vorab auszugsweise in [124] veröffentlicht.

4.1.1 Studiendesign

Das Hauptziel der Studie, die vom FKFS¹ im Auftrag von der Firma Bosch durchgeführt wurde, war es zu untersuchen, ob der Einsatz eines Eco-ACC Systems im Vergleich zur manuellen Fahrweise zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauches führt [34]. Des Weiteren wurde die Studie dazu genutzt, um für die folgenden Untersuchungen das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern bei manueller Fahrweise und bei Fahrten mit Eco-ACC aufzuzeichnen und bereitzustellen.

Die Studie umfasst eine Stichprobengröße von 30 Probanden. Das Alter und Geschlecht wurde dabei an die Verteilung der deutschen Bevölkerung angelehnt. Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurde ein Rundkurs auf öffentlichen Straßen, der um und durch die Innenstadt von Stuttgart führt, definiert. Der Rundkurs bildet ungefähr die Verteilung der jährlichen Fahrleistung auf den verschiedenen Straßenklassen ab, die mit dem Pkw im deutschen Straßennetz zurückgelegt werden. Der Rundkurs hat dabei eine Länge von 62,65 km, wovon 49 % auf Autobahn und Bundesstraßen, 21 % auf Landstraßen und 30 % innerhalb geschlossener Ortschaften entfallen [34].

Um Gewöhnungseffekte zu minimieren, erhielt jeder Proband vor den eigentlichen Messfahrten die Gelegenheit, sich während einer Runde auf dem Rundkurs an das Fahrzeug und die Nutzung des ACC Systems zu gewöhnen. Wenige Tage später fanden die ersten zwei ergebnisrelevanten Fahrten statt. Die eine Hälfte der Probanden startete dabei mit der manuellen Fahrt (MAN) und die andere Hälfte mit der ACC-Fahrt. Dadurch sollte verhindert werden, dass Lerneffekte das Ergebnis verfälschen. Zur Untersuchung des Einflusses der Verkehrsdichte wurde jeweils eine Fahrt innerhalb des Berufsverkehrs bzw. Hauptverkehrszeit (HV) und die andere Fahrt in der Nebenverkehrszeit (NV) durchgeführt. In der Regel fand eine Woche später am gleichen Wochentag und zur gleichen Uhrzeit die ACC bzw. manuelle

¹ FKFS - Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart

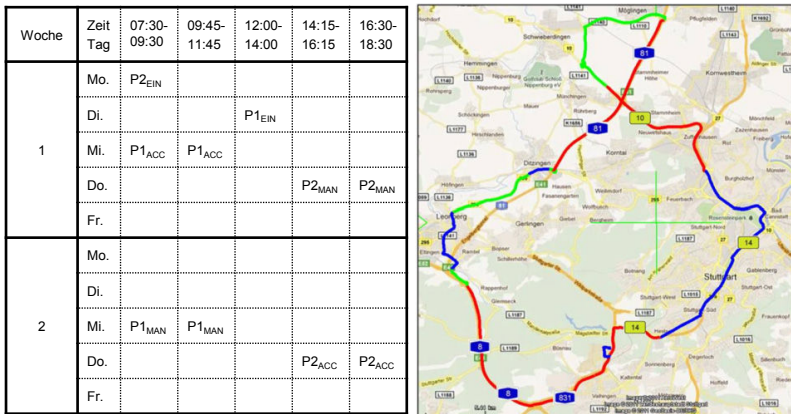


Bild 4.1: Beispielhafte Zeitplanung (links) und Rundkurs der Probandenstudie (rechts) [34]. Karte: © GeoBasis-DE / BKG 2011. Nachdruck mit Genehmigung von Springer Nature: [124] © 2013

Fahrt statt. Durch diese Vorgehensweise sollten zudem Einflüsse aufgrund von verschiedenen Wochentagen und Uhrzeiten vermieden werden. Ein beispielhafter Zeitplan für zwei Probanden ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Alle Fahrten fanden im Zeitraum zwischen dem 16.05.2011 und dem 28.07.2011 statt [34].

4.1.2 Aufbau des Versuchsfahrzeugs

Als Versuchsfahrzeug kam ein BMW der Baureihe 530d (E60) mit Automatikgetriebe zum Einsatz (s. Anhang C). Das Fahrzeug ist mit einem Bosch ACC Stop & Go System ausgestattet [48], welches auf einem Bosch Longe Range Radar der 3. Generation (LRR3) basiert (s. Anhang B). Der Bosch LRR3 Sensor hat eine Reichweite von bis zu 250 m und einen horizontalen Öffnungswinkel von bis zu 30°. Das ACC System ist in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 200 km/h verfügbar und ermöglicht somit eine Bremsung bis in den Stillstand sowie selbständiges Wiederanfahren inner-

halb von 3 s oder nach Bestätigung des Fahrers. Zur Beobachtung der nachfolgenden Fahrzeuge wurde zusätzlich ein LRR3 als Heckradar hinter der Heckscheibe verbaut.

Neben dem Standard-Fahrprogramm verfügt das ACC zusätzlich über ein Eco-Fahrprogramm zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Im Eco-Fahrprogramm wird insbesondere die Folgefahrt optimiert. Dazu wird mit einer sogenannten Toleranzzone die Abstandsregelung auf eine feste Zeitlücke aufgelöst. Innerhalb der Toleranzzone werden unnötige Verzögerungen und Beschleunigen vermieden. Außerdem wird häufiger der Schubbetrieb genutzt und die Reaktion auf weit entfernte Objekte reduziert. Ziel ist es, durch diese Maßnahmen das Fahrverhalten von vorausfahrenden Fahrzeugen weniger stark nachzuahmen. Des Weiteren wird bei hoher Verkehrsdichte die Beschleunigung reduziert und bei kurzen Phasen ohne Zielobjekt die Beschleunigung unterdrückt. Bei einer hohen Verkehrsdichte wird davon ausgegangen, dass in naher Zukunft wieder ein Zielobjekt vorhanden sein wird und somit eine Beschleunigung auf die Setzgeschwindigkeit ineffizient wäre.

Während einer Versuchsreihe auf einer Teststrecke konnte bei einer Folgefahrt hinter einem vorausfahrenden Hasenfahrzeug, das einen definierten Stop & Go Zyklus fuhr, im Vergleich zum Standard-ACC Fahrprogramm ein Einsparpotenzial von 4,6 % ermittelt werden. Im Falle eines stauähnlichen Zyklus lag die Einsparung bei 11 % [252].

Innerhalb der Eco-ACC Studie lag das ermittelte Einsparpotenzial im Stadtverkehr während der Hauptverkehrszeit bei bis zu 3,5 % im Vergleich zur manuellen Fahrt, wobei nur Fahrer berücksichtigt wurden, die einen Suspend-Anteil von weniger als 3 % erreichten. Der Suspend-Anteil gibt an, welche Strecke bezogen auf die Gesamtstrecke die Probanden das ACC System übersteuerten. Diese Bedingung traf bei 17 von 30 Probanden zu [34].

4.1.3 Auswertung

Um die Vorgehensweise bei der Auswertung zu erläutern, werden zunächst die Bewertungsgrößen und Maßzahlen vorgestellt, die zur Analyse der Sicherheit bzw. des Fahrverhaltens von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern herangezogen werden. Für die Analyse des Fahrverhaltens von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern ist zudem eine Auswahl des relevanten Fahrzeugs erforderlich, das sich auf der gleichen Fahrspur hinter dem Ego-Fahrzeug bewegt. Die Funktionsweise des entwickelten Algorithmus wird im darauffolgenden Abschnitt vorgestellt. Anschließend wird ein Überblick über den Ablauf sowie zu den einzelnen Schritten der Auswertung gegeben.

Maßzahlen der Bewertungsgrößen

Zur Bewertung des Fahrverhaltens und der Fahrsicherheit dienen die bereits vorgestellten Größen: Zeitlücke und Time to Collision (s. Abschnitt 3.1). Da sich Zeitlücke und TTC während einer Messung zeitlich ändern, müssen aus dem Verlauf der jeweiligen Bewertungsgröße geeignete Maßzahlen ermittelt werden, die später einen Vergleich zwischen verschiedenen Fahrten ermöglichen:

- Mittelwert und Median: Zeigen die mittlere Lage der Bewertungsgröße an. Zum Beispiel die Zeitlücke hatte im Mittel einen Wert von 1,5 s (Mittelwert) oder die Zeitlücke war 50 % der Fahrzeit kleiner und 50 % der Fahrzeit größer als $\tau_{0,5} = 1,5 \text{ s}$ (Median)
- Minimaler und maximaler Wert: Minimum und Maximum geben Auskunft über die Extremwerte während einer Messung. Zum Beispiel ein Fahrzeug nähert sich während der gesamten Messung bis auf $\tau_{min} = 1 \text{ s}$ an und ist maximal $\tau_{max} = 3 \text{ s}$ entfernt
- Expositionszeit oder zeitlicher Anteil der Exposition: Zeit und Anteil der Exposition geben Information über die Dauer der Unterschreitung eines bestimmten Grenzwertes [199]. Bei der Zeitlücke kann es

beispielsweise von Interesse sein zu erfahren, über welche Dauer der empfohlene Wert von 1,8 s unterschritten wird. Zum Beispiel während der Messung von 100 s fährt das nachfolgende Fahrzeug für eine Dauer von 40 s unterhalb von 1,8 s. Daraus ergibt sich eine Expositionszeit von 40 s oder ein Expositionsanteil von $q_{\tau < 1.8s} = 0,4$.

Für die Bewertung des Fahrverhaltens von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern und der Fahrsicherheit werden in dieser Studie der Median der Zeitlücke sowie die Expositionsanteile für $\tau < 0,9s$ und $\tau < 1,8s$ verwendet. Bei der TTC werden das Minimum und der Expositionsanteil $q_{ttc < 5s}$ für jede Messfahrt bestimmt.

Objektauswahl

Um das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern zu analysieren, ist eine Auswahl des relevanten Objektes aus den vom Radarsensor detektierten Objekten erforderlich. In dieser Studie werden die Objekte als relevant bezeichnet, die vom Ego-Fahrzeug beeinflusst werden und folglich zur Beeinträchtigung der Sicherheit beitragen können. In erster Linie sind das Fahrzeuge, die sich auf der gleichen Fahrspur hinter dem Ego-Fahrzeug bewegen. Fahrzeuge auf Nachbarspuren werden vom Ego-Fahrzeug weniger beeinflusst und können das Ego-Fahrzeug in der Regel ungehindert überholen.

Die Auswahl der Objekte auf Basis des Querversatzes (d_y) zur Längsachse des Ego-Fahrzeugs ist ungenau. Insbesondere bei kurvigen Strecken wird dann häufig ein Objekt auf der Nachbarspur als relevantes Objekt ausgewählt (s. Abbildung 4.2). Bei nach vorne gerichteten Funktionen wie ACC, die einen Radarsensor zur Objekterfassung verwenden, erfolgt deshalb die Auswahl auf Basis der Abweichung zum prädierten Ego-Fahrzeugkurs. Zur Prädizierung des Ego-Fahrzeugkurses werden oftmals Informationen über die Ego-Bewegung, Bewegung vorausfahrender Fahrzeuge und stehender Objekte wie beispielsweise Leitplanken herangezogen [288]. Für

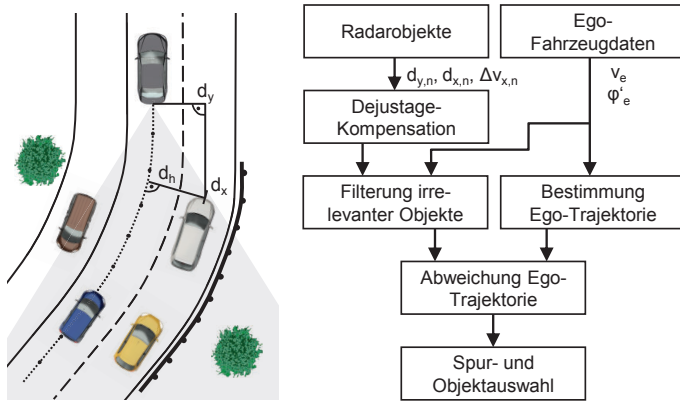


Bild 4.2: Beispielhafte Situation einer Objektauswahl (links) und Ablauf des Algorithmus zur Objektauswahl (rechts) [324]. Nachdruck mit Genehmigung von Springer Nature: [124] © 2013

nach hinten gerichtete Anwendungen, wie in dieser Studie, kann dagegen die Auswahl der Objekte auf Basis der Abweichung (d_h) zur Historie des Ego-Kurses bestimmt werden (s. Abbildung 4.2).

Der in der Arbeit von Xia umgesetzte Algorithmus besteht im Wesentlichen aus zwei Pfaden [324]. Im ersten Pfad (s. Abbildung 4.2 rechts) können im ersten Schritt zunächst Ungenauigkeiten aufgrund einer Sensordejustage kompensiert werden. Im nächsten Schritt werden alle nicht relevanten Objekte herausgefiltert. Dazu gehören im Wesentlichen stehende und entgegenkommende Objekte (siehe braunes Fahrzeug in Abbildung 4.2 links). Im zweiten Pfad (s. Abbildung 4.2 rechts) wird auf Basis von Informationen über die Ego-Bewegung die Historie der Ego-Trajektorie bestimmt. Als Eingangsinformationen für die Bestimmung der Ego-Trajektorie dienen die Fahrzeuggeschwindigkeit (v_e) und Gierrate des Ego-Fahrzeugs (ϕ_e). Im vorletzten Schritt werden für alle verbliebenen Objekte (blaues, gelbes und hellgraus Fahrzeug) des ersten Pfades die Abstände zur Ego-Trajektorie (d_h) berechnet. Anhand der Abstände zur Ego-Trajektorie und Entfernung zum

Ego-Fahrzeug (dunkelgraues Fahrzeug) sowie Annahmen zur Fahrbahnbreite können im letzten Schritt die Objekte den einzelnen Fahrspuren zugeordnet und das relevante Objekt (siehe blaues Fahrzeug) ausgewählt werden.

Ablauf der Auswertung

Im folgenden Abschnitt wird nun genauer auf die einzelnen Schritte der Messdatenauswertung in Matlab eingegangen (s. Abbildung 4.3). Die Messdaten werden zunächst in Matlab importiert und auf die relevanten Daten für die Auswertung reduziert. Danach kommt der zuvor beschriebene Algorithmus zur Objektauswahl zur Anwendung, der in jeder Messung alle Fahrzeuge, die sich auf der gleichen Fahrspur direkt hinter dem Ego-Fahrzeug bewegen, bestimmt und auswählt. Auf Basis dieser vorverarbeiteten Daten werden im nächsten Schritt für jede Messfahrt der Probanden die oben vorgestellten Maßzahlen der Bewertungsgrößen bestimmt. Um eine Aussage über die statistische Signifikanz von Unterschieden bei Lageparametern der Verteilungen zwischen manueller Fahrweise und Fahrt mit ACC treffen zu können, werden im letzten Schritt statistische Tests angewendet.

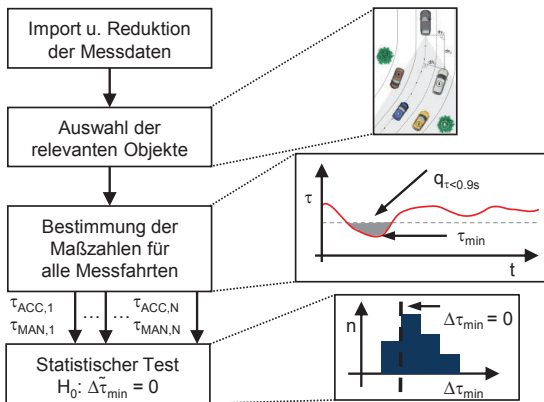


Bild 4.3: Ablauf zur Auswertung der Messdaten. Nachdruck mit Genehmigung von Springer Nature: [124] © 2013

Zur Überprüfung der statistischen Signifikanz von Unterschieden bei Lageparametern kommen grundsätzlich parametrische und nicht-parametrische Testverfahren infrage. Die Anwendung von parametrischen Tests setzt voraus, dass es sich um eine Normalverteilung handelt [298]. Tests auf Normalverteilung haben jedoch gezeigt, dass die Verteilungen der Maßzahlen keiner Normalverteilung unterliegen, so dass parametrische Tests nicht angewendet werden können. Auch im Bereich der nicht-parametrischen Tests existiert eine Reihe von Testverfahren, die sich ähnlich wie parametrische Tests in ihren Voraussetzungen zur Anwendung unterscheiden.

Innerhalb dieser Studie soll untersucht werden, wie sich das Fahrverhalten von nachfolgenden Fahrern ändert, wenn der Fahrer des Ego-Fahrzeugs mit Eco-ACC und manuell ohne ACC fährt. Bei beiden Fahrten handelt es sich jeweils um den gleichen Ego-Fahrer, der auch während des ACC-Betriebs das Fahrverhalten durch Übersteuern beeinflussen kann. Deshalb ist davon auszugehen, dass es sich in diesem Fall um eine verbundene Stichprobe handelt. Das bedeutet für die Analyse der statistischen Signifikanz kommen hier nur nicht-parametrische Tests für verbundene Stichproben in Betracht. Bei zwei verbundenen Stichproben wird häufig der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewendet, der allerdings voraussetzt, dass die Differenzverteilung $D_i = Y_i - X_i$ nicht nur unabhängig identisch verteilt, sondern auch symmetrisch um den Median verteilt ist [78]. Die Analyse der Verteilung der Maßzahlen zeigt jedoch, dass die Symmetriebedingung überwiegend nicht erfüllt ist.

Eine Alternative zum Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ist der Vorzeichen-test. Der Vorzeichentest stellt keine Anforderung hinsichtlich der Symmetrie der Verteilung [78, 298]. Im Gegensatz zum Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test muss jedoch beachtet werden, dass der Vorzeichentest konservativer ist. Aufgrund der Tatsache, dass er nur das Vorzeichen berücksichtigt und nicht die Lage, spricht dieser Test bei gleicher Stichprobengröße und gleichem Signifikanzniveau weniger auf Abweichungen an [78].

Das heißt, es besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit β , dass der Test keine signifikanten Unterschiede anzeigt, obwohl in Wirklichkeit ein signifikanter Unterschied besteht. Diese Eigenschaft wird auch als Fehler zweiter Art β bezeichnet. Das gleiche gilt auch für den Fall, dass wirklich ein signifikanter Unterschied besteht und der Test diesen richtig anzeigt. Dieser Fall wird auch als Trennschärfe oder Güte² bezeichnet und hängt direkt mit dem Fehler zweiter Art zusammen $(1 - \beta)$ [78].

Die geringere Trennschärfe des Vorzeichentests im Vergleich zum Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test oder zum T-Test spiegelt sich auch in der sogenannten Effizienz³ wieder. Anhand der Effizienz können zwei unterschiedliche Tests bei gleichem Signifikanzniveau miteinander verglichen werden. Dazu wird bei beiden Tests die Stichprobengröße jeweils so gewählt, dass sich bei beiden Tests die gleiche Trennschärfe $(1 - \beta)$ ergibt. Aus dem Verhältnis der beiden Stichprobengrößen N_A und N_B ergibt die Effizienz (s. Gleichung 4.1) [78, 239, 290].

$$\text{Effizienz von Test B} = 100 \frac{N_A}{N_B} \quad (4.1)$$

Eine Effizienz von Test B von zum Beispiel 50 % besagt, dass bei Test B die Stichprobe doppelt so groß im Vergleich zu Test A sein muss, um mit Test B die gleiche Trennschärfe wie mit Test A zu erlangen. Die Effizienz des Vorzeichentests im Vergleich zum T-Test sinkt von 96 % bei $N = 6$ auf bis zu 64 % bei $N \rightarrow \infty$. Aus diesem Grund wird von einer Anwendung des Vorzeichentests bei Stichproben $n > 40$ abgeraten [29, 239, 240, 290].

Daneben bietet der Vorzeichentest wie jeder andere Signifikanztest die Möglichkeit, den Fehler erster Art (α) zu kontrollieren. Der Fehler erster Art beschreibt die Wahrscheinlichkeit, einen signifikanten Unterschied anzuzeigen, obwohl kein signifikanter Unterschied besteht.

² Die Trennschärfe bzw. Güte wird im englischsprachigem Raum Power genannt

³ Die Effizienz wird im im englischsprachigem Raum Power-Efficiency genannt

	Nullhypothese	Alternativhypothese	Ablehnung von H_0
Zweiseitiger Test	$H_0 : \tilde{D} = 0$	$H_1 : \tilde{D} \neq 0$	$T \leq Q_{\alpha/2}$ oder $T \geq Q_{1-\alpha/2}$
Einseitiger Test	$H_0 : \tilde{D} \leq 0$	$H_1 : \tilde{D} > 0$	$T \geq Q_{1-\alpha}$
	$H_0 : \tilde{D} \geq 0$	$H_1 : \tilde{D} < 0$	$T \leq Q_{\alpha}$

Tabelle 4.1: Mögliche Hypothesen des Vorzeichentests [29, 78]

Des Weiteren soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass der Vorzeichentest und der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test nicht direkt auf Gleichheit zweier Mediane testen, sondern ob der Median \tilde{D} der Differenzverteilung $D_i = Y_i - X_i$ gleich Null ist (H_0). Bei einseitigen Tests wird auf größer bzw. kleiner gleich Null getestet (s. Tabelle 4.1). Wenn im Folgenden von signifikanten Unterschieden gesprochen wird, dann ist damit immer gemeint, dass der Median der Differenzverteilung signifikant kleiner oder größer Null ist. Für Auswertung von Abweichungen bei der Lage der Maßzahl-Verteilungen wird aufgrund der zuvor diskutierten Voraussetzungen im folgenden Abschnitt der Vorzeichentest angewendet.

4.1.4 Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund einer fehlerhaften Aufzeichnung der Messdaten des Heckradars können insgesamt nur $N = 15$ Probanden bei der Auswertung berücksichtigt werden, bei denen jeweils alle Messungen:

- Manuelle Fahrt (MAN) innerhalb Nebenverkehrszeit (NV),
- ACC-Fahrt (ACC) innerhalb Nebenverkehrszeit (NV),
- Manuelle Fahrt (MAN) innerhalb Hauptverkehrszeit (HV) und
- ACC-Fahrt (ACC) innerhalb Hauptverkehrszeit (HV)

verfügbar und vollständig sind. Um eine differenzierte Auswertung zu erhalten, werden die Bewertungsgrößen neben der gesamten Fahrt auch für ver-

schiedene Straßenklassen und Fahrzustände ermittelt. Für die Unterscheidung der verschiedenen Straßenklassen werden die in Abschnitt 4.1.1 vorgestellten Kategorien angewendet. Dabei werden die Straßenklassen Autobahn und Bundesstraße sowie Landstraße zur Straßenklasse außerorts zusammengefasst.

Untersuchungen zum Abstandsverhalten in der Arbeit von Flizek haben ergeben, dass niedrige zeitliche Abstände besonders bei stationären Folgefahrten und kritische Kollisionszeiten (t_{ic}) nur bei instationärer Folgefahrt bzw. Annäherungsvorgängen auftreten [90]. Eine Folgefahrt unterscheidet sich von einer Annäherung im Wesentlichen in der Relativgeschwindigkeit zwischen Ego- und nachfolgenden Fahrzeug. Zur Unterscheidung zwischen Folgefahrt und Annäherung werden für die Auswertung die folgenden Schwellen definiert:

- Stationäre Folgefahrt: $|\Delta v| < v_e \cdot 0,05$
- Annäherung: $\Delta v \geq v_e \cdot 0,05$

Des Weiteren werden in der Auswertung Abschnitte ohne nachfolgendes Fahrzeug sowie Stillstandszeiten nicht berücksichtigt. Außerdem ist zu beachten, dass sich die Angaben zur TTC nur auf Annäherungsvorgänge von nachfolgenden Fahrzeugen beziehen. Zur Bestimmung der statistischen Signifikanz der Ergebnisse wird wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben der Vorzeichentest angewendet. Da untersucht werden soll, ob sich bei Anwendung von Eco-ACC das Fahrverhalten von nachfolgenden Fahrern bzw. der zeitliche Abstand und die TTC im Vergleich zur manuellen Fahrweise verringert, wird der einseitige Vorzeichentest verwendet. Als Signifikanzniveau werden im Folgenden $\alpha = 0,05$ für signifikant und $\alpha = 0,1$ für marginal signifikant angewendet.

Abbildung 4.4 zeigt für den Bereich innerorts bei Folgefahrt die Verteilung der Zeitlückenmediane ($\tau_{0,5}$) jeweils für die manuellen Fahrten (MAN) und Fahrten mit ACC. Hier wird deutlich, dass sich bei Fahrten mit ACC im

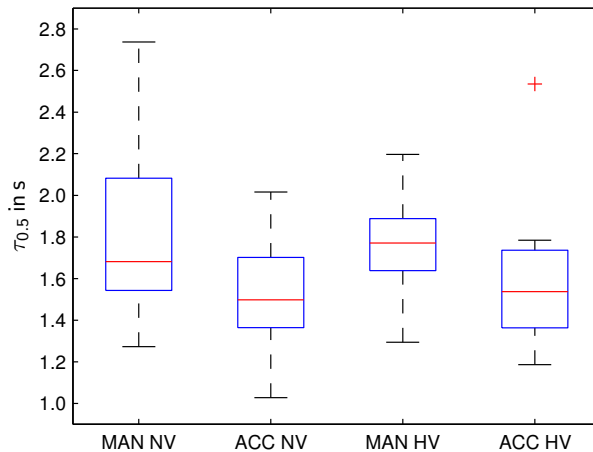


Bild 4.4: Verteilung der Zeitlückenmediane für ACC und manuelle Fahrt (MAN) während Nebenverkehrszeit (NV) und Hauptverkehrszeit (HV), Folgefahrt im Bereich innerorts

Vergleich zu manuellen Fahrten die Verteilung der Zeitlückenmediane nach unten verschiebt. Dieses Verhalten lässt sich sowohl bei Fahrten innerhalb der Nebenverkehrszeit (NV) als auch während der Hauptverkehrszeit beobachten. Zum Beispiel liegt der Median der Verteilung der Zeitlückenmediane ($\tilde{\tau}_{0.5}$) bei manuellen Fahrten während der Nebenverkehrszeit bei 1,68 s. Das bedeutet, dass bei 50 % aller Probanden 50 % der Zeit mit nachfolgendem Fahrzeug die Zeitlücke unterhalb von 1,68 s liegt, wohingegen bei Fahrten mit ACC dieser Wert auf 1,5 s absinkt. Innerhalb der Hauptverkehrszeit liegen die Mediane der Zeitlückenmediane mit 1,77 s und 1,54 s auf vergleichbaren Niveaus.

Um der Frage nachzugehen, ob nachfolgende Fahrer den Abstand signifikant verkürzen bzw. sich der Zeitlückenmedian verringert, wenn die Probanden mit ACC anstatt manuell fahren, wird wie bereits erläutert ein einseitiger Vorzeichentest durchgeführt. Dazu wird zunächst die Differenzverteilung der Zeitlückenmediane gebildet (s. Gleichung 4.2).

$$\Delta\tau_{0.5,i} = \tau_{0.5,MAN,i} - \tau_{0.5,ACC,i} \quad \text{mit} \quad i = 1 \dots N, N = 15 \quad (4.2)$$

Abbildung 4.5 zeigt das zugehörige Histogramm der absoluten Häufigkeiten (H) für die Verteilung der Differenzen der Zeitlückenmediane $\Delta\tau_{0.5}$ innerhalb der Neben- und Hauptverkehrszeit.

Auch hier wird deutlich, dass die Differenzen der Zeitlückenmediane in beiden Fällen überwiegend positiv sind. Das heißt, in den überwiegenden Fällen halten die nachfolgenden Verkehrsteilnehmer einen größeren Abstand bei manueller Fahrt im Vergleich zur Fahrt mit ACC. Mithilfe des Histogramms lässt sich nun die Teststatistik (T) des Vorzeichentest berechnen. Dazu werden die Differenzen mit positiven Vorzeichen gezählt (s. Gleichung 4.3).

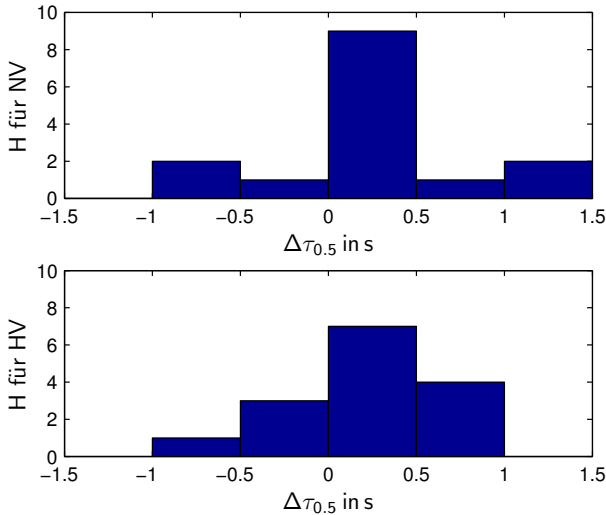


Bild 4.5: Differenzverteilungen der Zeitlückenmediane zwischen manueller und ACC-Fahrt innerhalb der Nebenverkehrszeit (oben) und Hauptverkehrszeit (unten), Folgefahrt im Bereich innerorts

$$T = \sum_{i=1}^N Z_i \quad \text{mit} \quad Z_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \Delta\tau_{0.5,i} > 0 \\ 0 & \text{wenn } \Delta\tau_{0.5,i} < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Die Nullhypothese $H_0 : D \leq 0$ ist abzulehnen, wenn die Teststatistik (T) größer oder gleich des Quantils ($Q_{1-\alpha}$) der Binomialverteilung $\text{Bin}(15; 0,5)$ ist. Für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ ergibt sich ein Quantil von $Q_{95} = 11$. In der Nebenverkehrszeit mit einer Anzahl von 12 positiven Vorzeichen ist somit die Nullhypothese aufgrund von $12 \geq 11$ zu einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ abzulehnen. Umgekehrt lässt sich auch die Wahrscheinlichkeit p bestimmen, dass unter der Nullhypothese 12 oder mehr positive Vorzeichen vorhanden sind [78]. Für $\text{Bin}(0,5; 15)$ ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von $p = 0,0176$, die deutlich unter dem geforderten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ liegt. Für die Hauptverkehrszeit ergibt sich ein p -Wert von $p = 0,0592$ wonach die Nullhypothese nur zum Niveau von $\alpha = 0,1$ abgelehnt werden kann. In diesem Fall kann nur von einem Trend bzw. marginaler Signifikanz gesprochen werden.

In den nachfolgenden Tabellen 4.2 bis 4.4 sind die Ergebnisse aller Bewertungsgrößen zusammengefasst. Die Tabellen zeigen jeweils den Median der zugehörigen Bewertungsgrößenverteilung. Liegt ein signifikanter Unterschied zwischen manueller Fahrt (MAN) und Fahrt mit ACC vor, so sind diese einerseits farblich und durch Sterne gekennzeichnet. Bei einer gelben Markierung bzw. einem Stern ist der Median der Differenzverteilung marginal signifikant größer oder kleiner zum Niveau $\alpha = 0,1$. Bei einer grünen Markierung mit zwei Sternen ist der Median der Differenzverteilung signifikant größer oder kleiner Null zum Niveau $\alpha = 0,05$.

Bei stationärer Folgefahrt (s. Tabelle 4.2) sind signifikante Unterschiede innerorts und marginal signifikante Unterschiede bezogen auf die gesamte Fahrt zu beobachten.

	Parameter	Einheit	Gesamte Fahrt		Innerorts		Außerorts	
			ACC	MAN	ACC	MAN	ACC	MAN
NV	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,47*	1,58*	1,50**	1,68**	1,34	1,39
	$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	0,63	0,61	0,69	0,57	0,75	0,67
	$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,10	0,11	0,04	0,05	0,16	0,17
	$\tilde{t}_{tc,0,5}$	[s]	77,64	83,51	79,93	86,39	76,09	77,71
	$\tilde{q}_{ttc < 5s}$	[1]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HV	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,45	1,51	1,54*	1,77*	1,35	1,39
	$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	0,70	0,62	0,62**	0,52**	0,71	0,69
	$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,15	0,15	0,06	0,04	0,17	0,20
	$\tilde{t}_{tc,0,5}$	[s]	72,21	73,77	71,69	83,93	71,59	71,58
	$\tilde{q}_{ttc < 5s}$	[1]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 4.2: Lageparameter der verteilten Bewertungsgrößen bei stationärer Folgefahrt [124]

Wie bereits im obigen Beispiel zur Bestimmung der Signifikanz vorgestellt, sinkt der Median der Verteilung der Zeitlückenmediane ($\tilde{\tau}_{0,5}$) um 11 % (NV) und 13 % (HV), wenn die Probanden mit ACC im Vergleich zur manuellen Fahrt innerorts unterwegs waren. Auch der Median der Verteilung des Anteils der Zeitlücken unter der empfohlenen Zeitlücke von 1,8 s ($\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$) steigt innerorts zur Hauptverkehrszeit von 52 % auf 62 % an. Auch zur Nebenverkehrszeit ist ein Anstieg zu beobachten, jedoch nicht signifikant. Im Bereich außerorts sind die Mediane der Bewertungsgrößenverteilungen für manuelle und ACC-Fahrten auf vergleichbarem Niveau. Dieses Ergebnis lässt sich dadurch erklären, dass auf der Autobahn weniger verzögert und beschleunigt wird und dadurch das Eco-ACC zu keinem anderen Fahrverhalten der nachfolgenden Fahrer führt. Insgesamt wird außerorts eine geringere Zeitlücke gefahren als innerorts. Dieses Verhalten lässt sich auch am Median der zeitlichen Anteilen mit $\tau < 0,9s$ erkennen ($\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$). Auf der Autobahn fahren 50 % der Probanden ca. 15 % der Zeit mit einem zeitlichen Abstand von unter 0,9 s, wobei innerorts im Mittel nur 5 % der Fahrzeit diese Grenze unterschritten wird. Der Median der Verteilung des Medians der

	Parameter	Einheit	Gesamte Fahrt		Innerorts		Außerorts	
			ACC	MAN	ACC	MAN	ACC	MAN
NV	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	2,16**	2,45**	2,10*	2,45*	2,27	2,30
	$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	0,35	0,30	0,36*	0,27*	0,38	0,34
	$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,04	0,04	0,02	0,02	0,07	0,04
	$\tilde{t}_{tc,0,5}$	[s]	16,75	16,25	15,35	15,06	18,30	17,50
	$\tilde{q}_{ttc < 5s}$	[1]	0,07	0,08	0,09	0,10	0,03	0,04
HV	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	2,36	2,44	2,33	2,47	2,36	2,22
	$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	0,29	0,27	0,34	0,38	0,34	0,38
	$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,03	0,04	0,02	0,02	0,05	0,05
	$\tilde{t}_{tc,0,5}$	[s]	17,09	15,51	14,12	14,19	18,97	17,75
	$\tilde{q}_{ttc < 5s}$	[1]	0,09	0,08	0,11	0,11	0,05	0,06

Tabelle 4.3: Lageparameter der verteilten Bewertungsgrößen bei Annäherungen [124]

TTC ($\tilde{t}_{tc,0,5}$) ist für alle Unterscheidungsfälle erwartungsgemäß hoch. Auch der Median des Anteils von TTC unterhalb der kritischen Grenze von 5 s ($\tilde{q}_{ttc < 5s}$) bezogen auf alle Annäherungssituationen liegt immer bei 0 %. Die hohen Werte bei der TTC lassen sich dadurch erklären, dass bei stationärer Folgefahrt per obiger Definition keine hohen Relativgeschwindigkeiten auftreten und somit auch keine niedrigen TTC entstehen können.

Bei Annäherungen (s. Tabelle 4.3) liegen die Zeitlücken auf einem höheren und die zeitliche Anteile auf einem niedrigerem Niveau als im Vergleich zur stationären Folgefahrt. Jedoch können auch hier bei Fahrten mit Eco-ACC Unterschiede beim Median der Zeitlücke und beim Anteil von Zeitlücken unterhalb von 1,8 s beobachtet werden. Im Gegensatz zu den auf höherem Niveau befindlichen Zeitlücken ist die TTC erwartungsgemäß wesentlich geringer als bei stationärer Folgefahrt. Im Vergleich zur stationären Folgefahrt liegt der Median der Verteilung der Mediane der TTC zwischen 15 s und 19 s. Auch der Anteil der TTC unterhalb von 5 s steigt auf bis 11 %. Jedoch können auch bei Annäherungen keine signifikanten Unterschiede bei der TTC zwischen ACC und manueller Fahrt festgestellt werden.

	Parameter	Einheit	Gesamte Fahrt		Innerorts		Außerorts	
			ACC	MAN	ACC	MAN	ACC	MAN
NV	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,81**	2,04**	1,85**	2,27**	1,63	1,82
	$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	0,50*	0,40*	0,46**	0,32**	0,58	0,49
	$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,07	0,07	0,03	0,03	0,10	0,10
	$\tilde{t}_{tc,0,5}$	[s]	30,48	28,11	25,54*	22,56*	35,92	33,98
	$\tilde{q}_{TTC < 5s}$	[1]	0,04	0,05	0,05	0,08	0,02	0,02
HV	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,87**	2,00**	2,01	2,22	1,71	1,76
	$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	0,47**	0,43**	0,42	0,35	0,54	0,51
	$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,08	0,07	0,03	0,02	0,12	0,12
	$\tilde{t}_{tc,0,5}$	[s]	28,52**	25,20**	21,77	20,32	33,44	31,19
	$\tilde{q}_{TTC < 5s}$	[1]	0,05	0,05	0,08	0,08	0,02	0,03

Tabelle 4.4: Lageparameter der verteilten Bewertungsgrößen für die gesamte Fahrt

Bei Betrachtung der Ergebnisse bezogen auf die gesamte Fahrt (s. Tabelle 4.4) liegen die Mediane der Bewertungsgrößenverteilungen überwiegend zwischen denen der stationären Folgefahrt und der Annäherung. Auch hier ist insbesondere innerorts und bezogen auf die gesamte Strecke ein signifikanter Unterschied bei den Differenzverteilungen der Lageparameter zwischen ACC und manueller Fahrt zu erkennen. Abweichend zur Unterscheidung in verschiedene Folgefahrzustände treten bei Betrachtung der gesamten Fahrt auch signifikante Unterschiede beim Median der Verteilung des Medians der TTC auf. Jedoch ist hier der Wert bei manueller Fahrt niedriger als bei Fahrten mit ACC. Dieses Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass bei manueller Fahrt die Probanden dynamischer verzögern und nachfolgende Fahrer weniger Zeit haben, um auf die Änderung zu reagieren und es folglich zu niedrigeren TTC kommt.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass bei Fahrten mit Eco-ACC die nachfolgenden Fahrer den mittleren zeitlichen Abstand um bis zu 10 % bis 20 % reduzieren. Im Bereich von sicherheitskritischen Zeitlücken unterhalb von 0,9 s sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Daneben

gibt es Hinweise auf eine leichte Erhöhung der TTC, wenn die Probanden mit ACC unterwegs sind. Jedoch sind im Bereich von sicherheitskritischen TTCs unterhalb von 5 s keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Die Ergebnisse deuten also darauf hin, dass die Nutzung von Eco-ACC teilweise eine Verschlechterung des Abstandsverhaltens zur Folge hat, aber diese nicht unbedingt zu einer erhöhten Anzahl von sicherheitskritischen Situationen führt.

Innerhalb dieser Studie wurden nur die Auswirkungen eines Eco-ACC untersucht, das im Wesentlichen eine energieeffiziente Folgeregelung mit vergleichsweise niedrigem Vorausschauhorizont umsetzt. Deshalb stellt sich die Frage, inwieweit sich Fahrstrategien auf das Fahrverhalten bzw. Abstandsverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern auswirken, die mit einer größeren Vorausschau arbeiten und folglich zu einer früheren und größeren Abweichung von der erlaubten bzw. gefahrenen Geschwindigkeit führen (s. Abschnitt 2.1). Um der Frage nachzugehen, werden in der folgenden Studie gezielt derartige Strategien im Realverkehr untersucht.

4.2 Energieeffiziente Beschleunigung und Verzögerung bei Geschwindigkeitsbegrenzungen

Die Ergebnisse der Studie zum Einfluss von Eco-ACC auf das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern zeigen, dass zwar der zeitliche Abstand reduziert wird, jedoch keine Unterschiede im sicherheitskritischen Bereich beobachtet werden können. Um der Frage weiter nachzugehen, ob energieeffiziente Fahrstrategien zu einer Verschlechterung der Sicherheit führen, werden in der folgenden Studie Strategien untersucht, die im Vergleich zum bereits untersuchten Eco-ACC über einen längeren Zeitraum von der erlaubten bzw. typischerweise gefahrenen Geschwindigkeit abweichen. Aufgrund der zu erwartenden Häufigkeit und Abweichung von der gefahrenen Geschwindigkeit (s. Abschnitt 3.2.2) wird zum einen der Anwendungs-

fall des Verzögerns vor Geschwindigkeitsbegrenzungen untersucht, bei dem frühzeitig im Schub- oder Segelbetrieb verzögert wird. Zweiter Untersuchungsgegenstand ist das sogenannte verringerte Hochbeschleunigen. Wie bereits erläutert, wird beim verringerten Hochbeschleunigen bei einer Erhöhung der zulässigen Geschwindigkeit aufgrund einer in naher Zukunft liegenden Wiederherabsetzung nicht auf die erlaubte Geschwindigkeit beschleunigt und ggf. frühzeitig mit der Verzögerung begonnen. Im folgenden Abschnitt wird zunächst das Design der Studie und der Aufbau des Versuchsfahrzeugs erläutert. Danach wird auf die Vorgehensweise bei der Auswertung der Messdaten eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Die Durchführung der Studie erfolgte im Rahmen der Diplomarbeit von Ponomarev [217] und dem Praktikum von Grob [106]. Die Ergebnisse der Studie wurden vorab in [123] veröffentlicht.

4.2.1 Studiendesign

Zunächst werden die Anforderungen an die Teststrecken definiert, um die in Abschnitt 3.2 abgeleiteten Einflussgrößen im realen Fahrversuch untersuchen zu können. Außerdem wird auf weitere Anforderungen eingegangen, die auf einen reibungslosen Ablauf der Studie abzielen. Auf Basis der Anforderungen werden danach die ausgewählten Teststrecken und ermittelten Referenzstrategien vorgestellt. Im letzten Schritt wird genauer auf den Ablauf der Messfahrten eingegangen.

Anforderungen an die Teststrecke

Wie in Abschnitt 3.2 bereits hergeleitet, entscheidet in erster Linie die Anzahl der Fahrspuren bzw. die Möglichkeit zum Überholen über eine mögliche Beeinträchtigung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern. Deshalb kommen bei der Auswahl nur Strecken mit einspuriger Verkehrsführung pro Richtung in Betracht. Daneben ist besonders bei Strecken mit einer hohen Abweichung zwischen dem Geschwindigkeitsverlauf der energieeffizi-

enten Fahrstrategie und der typischerweise gefahrenen Geschwindigkeit mit Änderungen des Fahrverhaltens von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern zu rechnen. Ein wichtiger Faktor, der die gefahrene Geschwindigkeit beeinflusst, ist die erlaubte Höchstgeschwindigkeit. Daher sollte entlang der Strecke die Änderung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit einen hohen Wert aufweisen. Daneben beeinflusst die Steigung den Geschwindigkeitsverlauf der energieeffizienten Fahrstrategie. Die Strecke sollte aufgrund dessen in der Ebene liegen oder eine leicht negative Steigung aufweisen. Somit wird beispielsweise bei der Verzögerung die Dauer und die Höhe der Geschwindigkeitsabweichung nicht verkürzt. Eine weitere Anforderung an die Strecke ist eine möglichst geringe Einseh- bzw. Vorhersehbarkeit. Wie bereits erwähnt, wird bei einer Abweichung von der typischerweise gefahrenen Geschwindigkeit dadurch möglicherweise das Unverständnis weiter erhöht und die nachfolgenden Fahrer zu einer Änderung des Fahrverhaltens bewegt. Ähnliches gilt vermutlich für Strecken mit niedriger Verkehrsdichte, wo vor dem Ego-Fahrzeug eine freie Strecke herrscht. Jedoch sollte die Strecke nicht nur aus diesem Grund eine niedrige Verkehrsdichte aufweisen. Auch aus Gründen der Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit ist es ratsam, dass vor dem Fahrzeug die Strecke frei ist, damit die Fahrstrategie nicht durch vorausfahrende Fahrzeuge beeinflusst wird und zu anderen Messungen vergleichbar bleibt. Nicht zuletzt ist es wichtig, dass der nachfolgende Fahrer nicht den Eindruck erhält, in irgendeiner Art und Weise beobachtet zu werden oder Teilnehmer einer Studie zu sein. Aus diesem Grund sollte die Teststrecke über einen geeigneten Startpunkt verfügen, der den heranahenden Fahrer keinen Verdacht schöpfen lässt, z.B. eine Kreuzung oder Bushaltestelle.

Neben den Anforderungen bezüglich der Fahrstrategie sind bei der Streckenauswahl auch Anforderungen zu berücksichtigen, die sich auf einen sicheren und reibungslosen Ablauf der Studie beziehen. Dazu gehört eine gute Wendemöglichkeit am Ende der Strecke, um wieder sicher und zügig zum Startpunkt zurückkehren zu können [217]. Außerdem ist es unabding-

bar, dass zu jeder Zeit die StVO⁴ eingehalten wird. Dazu gehört beispielsweise die Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Deshalb sollte auf dieser Strecke die typischerweise gefahrene Geschwindigkeit nicht die erlaubte Geschwindigkeit überschreiten. Zusätzlich zur Wendemöglichkeit ist darauf zu achten, dass am Startpunkt herannahende Fahrzeuge gut beobachtet werden können und ausreichender Raum zum Ausscheren und Beschleunigen vor dem Fahrzeug vorhanden ist.

Teststrecken und Fahrstrategien

Auf Basis der zuvor beschriebenen Anforderungen wurden für die zu untersuchenden Situationen „Verzögerung vor einer Geschwindigkeitsbegrenzung“ und „Verringertes Hochbeschleunigen“ entsprechende Teststrecken ausfindig gemacht. Dazu wurde mithilfe einer digitalen Karte, die auch die Geschwindigkeitsbegrenzungen enthält, eine Vorauswahl getroffen. Die vorausgewählten Strecken wurden als nächstes vor Ort besichtigt und mithilfe einiger Messungen begutachtet [217]. Auf Basis der Messdaten und der Ergebnisse der Besichtigung erfolgte die Auswahl der im Folgenden vorgestellten Strecken.

Verzögerung vor Tempolimits Zur Untersuchung des Fahrverhaltens von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern bei Anwendung von energieeffizienten Verzögerungsstrategien wurde die Strecke zwischen Bebenhausen und Tübingen (L1208) ausgewählt. Die Strecke hat insgesamt eine Länge von ungefähr 3 km, wobei das Schild, welches die Aufhebung der Geschwindigkeit signalisiert, als Referenz- bzw. Startpunkt für alle nachfolgenden Analysen dient (s. Abbildung 4.6). Zwischen dem Referenzpunkt und dem Ortseingangsschild von Tübingen liegt eine Strecke von 2540 m. Zwischen den beiden Ortschaften gilt eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h, die

⁴ StVO - Straßenverkehrs-Ordnung

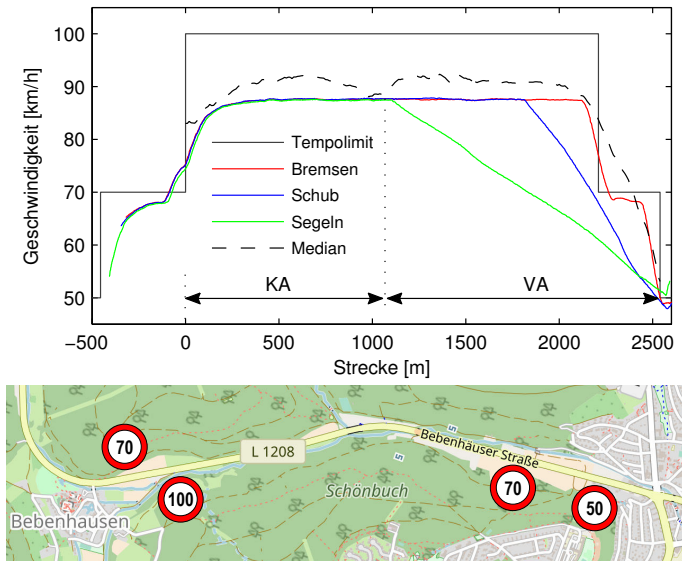


Bild 4.6: Die obere Abbildung zeigt den Verlauf der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zwischen Bebenhausen und Tübingen sowie den Verlauf, der in der Vorstudie ermittelten mittleren Geschwindigkeit (Median). Außerdem wird der Geschwindigkeitsverlauf der Fahrstrategien dargestellt [217, 123]. Die untere Abbildung zeigt den zugehörigen Kartenausschnitt mit Bebenhausen (links) und Tübingen (rechts) (Quelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende, <https://www.openstreetmap.org/copyright>, geändert am 19.01.2018).

am Ortseingang von Tübingen in zwei Schritten von 100 km/h auf 70 km/h und auf 50 km/h herabgesetzt wird [217].

Zur Ermittlung einer realitätsnahen Geschwindigkeit im Konstantfahrt- (KA) und Verzögerungsabschnitt (VA) wurde mithilfe einer Vorstudie der Verlauf der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit auf dem Abschnitt zwischen Bebenhausen und Tübingen ermittelt [217]. Dazu wurden nach dem Zufallsprinzip mehrere Fahrzeuge verfolgt und deren Differenzgeschwindigkeit mit einem Frontradarsensor gemessen. Dabei wurde über das ACC eine große Zeitlücke gewählt, damit der vorausfahrende Fahrer bei Wahl seiner Ge-

schwindigkeit nicht beeinflusst bzw. unter Druck gesetzt wurde. Anhand der gemessenen Daten und dem für jede Messung bestimmten Referenzpunkt wurde für jedes Fahrzeug der Geschwindigkeitsverlauf über dem Weg ermittelt. Aus den Geschwindigkeitsverläufen wurde dann in einem weiteren Schritt die mittlere Geschwindigkeit bzw. der Median in einen 10 m Raster entlang der gesamten Strecke bestimmt (s. Abbildung 4.6).

Auf Basis der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit wurde eine Geschwindigkeit von 88 km/h, die einer angezeigten Geschwindigkeit von 90 km/h entspricht, festgelegt. Die Bremsvorgänge konnten leider nicht vollständig an den Verlauf der mittleren Geschwindigkeit angepasst werden, da dies zu einer Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit geführt hätte. Aus diesem Grund wurden die Bremsvorgänge so gelegt, dass nur mit einer leicht erhöhten Geschwindigkeit das jeweilige Schild erreicht wurde (s. Abbildung 4.6).

Als energieeffiziente Fahrstrategien wurden zum einen der Schubbetrieb (blau) und zum anderen der Segelbetrieb im Leerlauf (grün) ausgewählt (s. Abbildung 4.6). Damit der Ortseingang mit 50 km/h erreicht wird, muss 1430 m vorher mit dem Segelbetrieb begonnen werden. Beim Schubbetrieb ist eine Strecke von 730 m erforderlich.

Im Konstantfahrabschnitt (1110 m) unterscheiden sich die drei Fahrstrategien (Bremsen, Schub- und Segelbetrieb) nicht in ihrem Geschwindigkeitsverlauf und benötigen daher alle die gleiche Fahrzeit (s. Tabelle 4.5). Im Verzögerungsabschnitt liegt der Zeitverlust im Segelbetrieb gegenüber zur Referenzstrategie Bremsen bei 24 %. Im Schubbetrieb beträgt der Zeitverlust im Vergleich zum Bremsen 11 %. Demgegenüber kann beim Segeln eine Kraftstoffeinsparung von 58 % und im Schubbetrieb von 33 % gegenüber dem Bremsen erzielt werden.

Verringertes Hochbeschleunigen Für die Untersuchungen zur Strategie des verringerten Hochbeschleunigens wurde der Streckenabschnitt der K1055 von Stuttgart-Vaihingen nach Böblingen ausgewählt [217]. Auf dem

Strategie	Konstantfahrabschnitt (KA)		Verzögerungsabschnitt (VA)	
	Zeit in s	Kraftstoffverbrauch in l/100km	Zeit in s	Kraftstoffverbrauch in l/100km
Bremsen			63,2	4,48
Schub	46,1	6,94	70,0	3,00
Segeln			78,3	1,86

Tabelle 4.5: Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch für den Konstantfahrt- und Verzögerungsabschnitt zwischen Bebenhausen und Tübingen [217]. © 2013 IEEE. Nachdruck mit Genehmigung von [123]

relevanten Abschnitt wird die erlaubte Geschwindigkeit von 60 km/h auf 100 km/h erhöht und schon nach ungefähr 1070 m wieder auf 50 km/h heruntersetzt. Als Startpunkt dient eine Haltebucht ca. 700 m vor der Erhöhung auf erlaubte 100 km/h, von der aus herannahende Fahrzeuge gut beobachtet werden können (s. Abbildung 4.7).

Auch für diese Strecke wurde nach der gleichen Vorgehensweise wie bei der Strecke zwischen Bebenhausen und Tübingen die üblicherweise gefahrene Geschwindigkeit durch die Messung von vorausfahrenden Fahrzeugen bestimmt [217]. Bei Betrachtung des Ergebnisses fällt auf, dass bei der Herabsetzung der zulässigen Geschwindigkeit auf 50 km/h die Fahrer im Mittel die Geschwindigkeit von ungefähr 80 km/h nur leicht auf 75 km/h verringern (s. Abbildung 4.7). Dieses Fahrverhalten hängt vermutlich mit der nach 200 m späteren Erhöhung auf 70 km/h zusammen. Aufgrund der Geschwindigkeitsüberschreitung kann hier nicht das reale Fahrverhalten in der Referenzstrategie nachgebildet werden. Deshalb ist die Strecke nur bedingt für die Untersuchungen geeignet. Allerdings konnte bezüglich der anderen Anforderungen wie Startpunkt und Wendemöglichkeiten keine geeignetere Strecke gefunden werden. Anhand der Ergebnisse der Vorstudie wurde eine Geschwindigkeit von 78 km/h (80 km/h angezeigte Geschwindigkeit) für die Konstantfahrt der Referenzstrategie definiert (HB80).

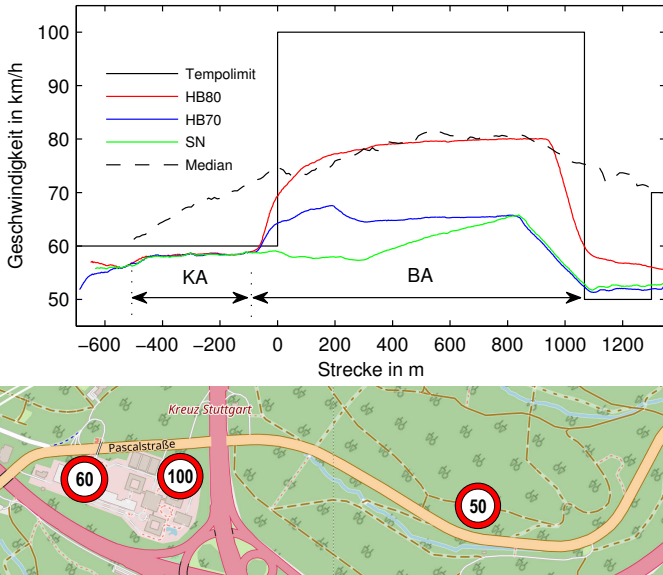


Bild 4.7: Die obere Abbildung zeigt den Verlauf der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen sowie den Verlauf der in der Vorstudie ermittelten mittleren Geschwindigkeit (Median). Außerdem wird der Geschwindigkeitsverlauf der Fahrstrategien dargestellt [217]. Die untere Abbildung zeigt den zugehörigen Kartenausschnitt mit Stuttgart-Vaihingen (links) und Richtung Böblingen (rechts) (Quelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende, <https://www.openstreetmap.org/copyright>, geändert am 19.01.2018).

Der Bremsvorgang wurde in solcher Weise modelliert, dass das Fahrzeug die 50 km/h Begrenzung mit leicht überhöhter Geschwindigkeit erreicht (s. Abbildung 4.7). Um der frühen Beschleunigung gerecht zu werden (s. Median in Abbildung 4.7), wurde der Punkt der Beschleunigung für alle Strategien 100 m vor die Erhöhung der erlaubten Geschwindigkeit (100 km/h) gelegt. Für die in diesem Teil der Studie zu untersuchende Strategie des verringerten Hochbeschleunigens wurden zwei unterschiedliche Fahrprofile definiert. Bei der Strategie HB70 wird nur leicht auf eine angezeigte Geschwindigkeit von 70 km/h beschleunigt und danach in den Schubbe-

trieb geschaltet. Im Schubbetrieb wird die Geschwindigkeit durch das leichte Gefälle der Strecke nahezu konstant gehalten. Ungefähr 250 m vor der 50 km/h-Begrenzung wird in die Gangstufe 3 geschaltet, um das Fahrzeug rechtzeitig zu verzögern. Als zweite energieeffiziente Strategie wurde der Segelbetrieb (SN) angewendet. In diesem Fall wird zunächst die Geschwindigkeit konstant auf 60 km/h gehalten. 220 m nach der Erhöhung der erlaubten Geschwindigkeit auf 100 km/h wird in den Segelbetrieb geschaltet und das Gefälle der Strecke genutzt, um zu beschleunigen. Die Verzögerung auf die Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h erfolgt auch hier im Schubbetrieb und der 3. Gangstufe.

Im 400 m langen Konstantfahrabschnitt (KA) liegt für alle Strategien aufgrund des gleichen Geschwindigkeitsverlaufes der Kraftstoffverbrauch bei 11,12 l/100km und die benötigte Fahrzeit bei 24,8 s (s. Tabelle 4.6). Für den Beschleunigungsabschnitt (BA) mit einer Länge von 1167 m benötigt die Referenzstrategie (HB80) eine Fahrzeit von 56,3 s und führt zu einem Kraftstoffverbrauch von 4,17 l/100km. Bei Anwendung der Strategie HB70 erhöht sich die Fahrzeit um 16,9 %, wohingegen sich der Kraftstoffverbrauch um 40 % reduziert. Mit der Strategie Segeln (SN) erhöht sich im Vergleich zum Bremsen die Fahrzeit um 23,8 % und der Kraftstoffverbrauch verringert sich dagegen um 52 %.

Strategie	Konstantfahrabschnitt (KA)		Beschleunigungsabschnitt (BA)	
	Zeit in s	Kraftstoffverbrauch in l/100km	Zeit in s	Kraftstoffverbrauch in l/100km
HB80			56,3	4,17
HB70	24,8	11,12	65,8	2,50
SN			69,7	2,00

Tabelle 4.6: Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch für den Konstantfahr- und Beschleunigungsabschnitt zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen [217]

Randbedingungen und Ablauf der Studie

Um einen Kompromiss zwischen Aufwand und signifikanten Ergebnissen zu erzielen, wurde die Anzahl der Wiederholungen (N) pro Strategie auf 30 festgelegt. Eine weitere wichtige Randbedingung ist die Vergleichbarkeit der Messungen. Da nicht alle Wiederholungen bzw. Messungen an einem Tag stattfinden konnten, wurde darauf geachtet, dass die herrschenden Bedingungen möglichst vergleichbar waren. Dazu gehören in erster Linie die Wetter- und Sichtverhältnisse, da diese das Fahrverhalten maßgeblich beeinflussen (s. Abschnitt 3.2). Alle Messungen wurden daher nur an regen- und schneefreien Tagen sowie nur bei Tageslicht durchgeführt. Weiterhin sollten auch die Verkehrsverhältnisse möglichst vergleichbar sein. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurde darauf geachtet, dass die Messungen nur an Wochentagen und in gleichen Zeiträumen stattfanden. Damit unter den aktuell herrschenden Bedingungen möglichst immer eine gleiche Anzahl von Messungen jeder Strategie verfügbar ist, wurden die einzelnen Fahrstrategien außerdem immer abwechselnd angewendet [217].

Neben den Umfeldbedingungen ist ein reproduzierbarer Geschwindigkeitsverlauf für einen späteren Vergleich der Ergebnisse unabdingbar. Bei jeder Wiederholung einer Fahrstrategie wurde der nachfolgende Fahrer bzw. Proband deshalb dem gleichen Geschwindigkeitsverlauf des Versuchsfahrzeugs ausgesetzt. Ein reproduzierbarer Geschwindigkeitsverlauf wurde dadurch sichergestellt, dass in weiten Teilen die Beschleunigung und Konstantfahrt sowie Verzögerung unter Zuhilfenahme der ACC Funktion erfolgte. Die Einleitung des Segel- und Schubbetriebes sowie des Bremsvorganges wurde über Merkmale entlang der Strecke, wie zum Beispiel Schilder und Leitpfosten, sichergestellt [217].

Da das Abstandsverhalten von nachfolgenden Fahrern unter verschiedenen Fahrstrategien verglichen werden soll, ist es zudem erforderlich, dass während der gesamten Messung das nachfolgende Fahrzeug vom Hecksensor erfasst wird. Daher wurden Messungen, bei denen sich ein Fahrzeug außer-

halb des Erfassungsbereiches des Sensors bewegte, als ungültig erklärt. Die aktuelle Fahrstrategie wurde so oft wiederholt, bis eine gültige Messung erfolgte [217]. Zur Verdeutlichung ist im Folgenden der Ablauf einer Messung beschrieben:

1. Warten am Startpunkt auf ein herannahendes Fahrzeug
2. Starten der Messung am Messtechnikrechner
3. Beschleunigung auf die zuvor festgelegte Fahrgeschwindigkeit
4. Einleiten der Verzögerung (Segeln, Schub oder Bremsen)
5. Anhalten der Messung bei Erreichen des Zielpunktes
6. Wenden und Rückfahrt zum Startpunkt

4.2.2 Aufbau des Versuchsfahrzeugs

Als Versuchsfahrzeug kam ein BMW 530d Touring (E61) mit Automatikgetriebe zum Einsatz (s. Anhang C). Das Fahrzeug ist mit einem Bosch LRR3 Sensor ausgestattet (s. Anhang B) und verfügt über ein Bosch ACC Stop & Go System [48]. Zusätzlich ist das Fahrzeug mit zwei MRR rear Heckradarsensoren ausgestattet, um die nachfolgenden Fahrzeuge zu erfassen (s. Anhang B). Die Hecksensoren sind jeweils hinter dem Stoßfänger mit einem Winkel von 45° zur Fahrzeuglängsachse verdeckt verbaut. Die Hecksensoren erzielen eine Reichweite von bis zu 80 m und haben einen Öffnungswinkel von bis zu 150° (s. Anhang B). Daneben sind alle Radarsensoren mit einem Messtechnikrechner verbunden. Außerdem sind an der Front- und Heckscheibe jeweils eine USB⁵ Kamera installiert. Mithilfe dieser Kameras kann synchron zur Messung das Fahrzeugumfeld erfasst werden, um später beispielsweise während der Auswertung Unklarheiten beseitigen zu

⁵ USB - Universal Serial Bus

können. Um die Persönlichkeitsrechte anderer Verkehrsteilnehmer zu wahren, wurden alle Videoaufzeichnungen nach der Auswertung der Messdaten gelöscht.

4.2.3 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgt in einer ähnlichen Vorgehensweise wie bei der Studie zum Einfluss von Eco-ACC auf die Fahrsicherheit. Im Folgenden werden zunächst die herangezogenen Maßzahlen der Bewertungsgrößen vorgestellt. Danach wird genauer auf den Ablauf der Auswertung eingegangen. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei unter anderem die Auswahl der statistischen Testverfahren.

Maßzahlen der Bewertungsgrößen

Zur Bewertung des Fahrverhaltens und der Fahrsicherheit bei Anwendung von energieeffizienten Fahrweisen kommen auch in dieser Studie die Bewertungsgrößen Zeitlücke (τ) und Time to Collision (t_{tc}) zur Anwendung. Um eine Aussage über den Verlauf und die Kritikalität der Bewertungsgrößen treffen zu können, werden die folgenden Maßzahlen aus dem Verlauf der Bewertungsgrößen gebildet:

- Median der Zeitlücke ($\tau_{0,5}$)
- Exposition von Zeitlücken $< 1,8$ s ($q_{\tau < 1.8s}$) und $< 0,9$ s ($q_{\tau < 0.9s}$)
- Minimum der Zeitlücke (τ_{min})
- Minimum der TTC ($t_{tc,min}$)

Wie bereits in Abschnitt 4.1.3 erläutert, ist der Median der Zeitlücke ein Maß für die mittlere Zeitlücke des nachfolgenden Fahrzeugs. Beispielsweise bedeutet ein Median von 2 s, dass sich das nachfolgende Fahrzeug 50 % der Fahrzeit mit einem zeitlichen Abstand von unter 2 s bewegt hat. Anhand dieser Maßzahl kann also bestimmt werden, ob sich der Abstand im

Mittel erhöht oder verringert hat. Die Expositionsanteile von $\tau < 1,8 \text{ s}$ und $\tau < 0,9 \text{ s}$ geben Auskunft über die Anteile der Fahrzeit, die sich das nachfolgende Fahrzeug unterhalb der empfohlenen bzw. gesetzlich zulässigen Grenze befunden hat. Daneben stellt ein hoher Anteil mit zeitlichen Abständen von weniger als $0,9 \text{ s}$ auch ein Sicherheitsrisiko dar. Im Falle einer abrupten und starken Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs kann das nachfolgende Fahrzeug unter Umständen nicht mehr rechtzeitig verzögern und es kommt zum Auffahrunfall. Eine weitere Maßzahl, die auch auf die Fahrsicherheit abzielt, ist das Minimum der Zeitlücke während einer Messung. Anhand der minimalen Zeitlücke lässt sich feststellen, wie weit der nachfolgende Fahrer bereit ist, seinen zeitlichen Abstand zu verringern und stellt somit den kritischsten Wert einer Messung dar. Mithilfe der minimalen TTC soll analysiert werden, ob sich auch das Annäherungsverhalten bei Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien ändert. Das heißt, ob sich der nachfolgende Fahrer mit hohen Relativgeschwindigkeiten annähert und es zu sicherheitskritischen Situationen kommt.

Ablauf der Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgt nach einer ähnlichen Vorgehensweise wie bei der Eco-ACC Studie. Zunächst werden die Messdaten nach Matlab importiert und die benötigten Signale extrahiert. Danach kommt der Algorithmus zur Objektauswahl aus Abschnitt 4.1.3 zum Einsatz, um das relevante Objekt hinter dem Ego-Fahrzeug zu bestimmen. Auf Basis der Objektinformationen wie Abstand und Relativgeschwindigkeit können dann die Bewertungsgrößen Zeitlücke und TTC berechnet werden. In Abbildung 4.8 ist eine beispielhafte Messung für die Verzögerungsstrategie Segeln von Bebenhausen nach Tübingen dargestellt. Das obere Diagramm zeigt die zulässige Höchstgeschwindigkeit (rot) sowie den Verlauf der Geschwindigkeit des Ego Fahrzeugs (grün) und des nachfolgenden Fahrzeugs (blau).

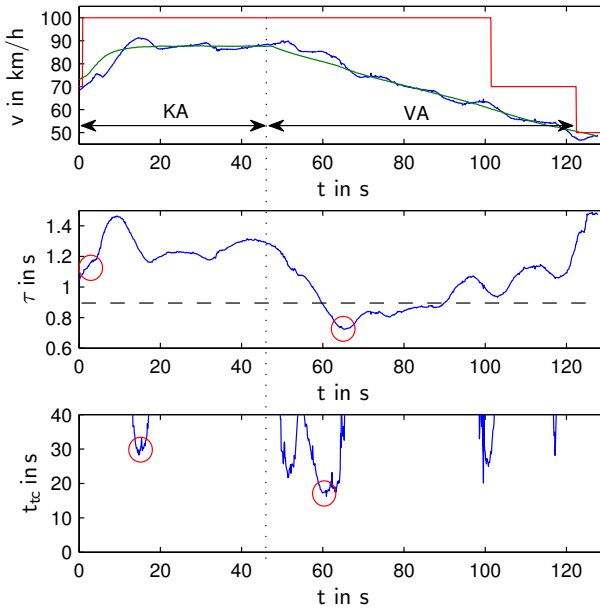


Bild 4.8: Beispielhafte Messung, bei der das Ego-Fahrzeug die Verzögerungsstrategie Segeln anwendet. Das obere Diagramm zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit für das Ego-Fahrzeug (grün) und nachfolgende Fahrzeug (blau) sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit (rot). Im mittleren Diagramm ist die Zeitlücke (τ) zwischen nachfolgendem und Ego-Fahrzeug dargestellt. Das untere Diagramm zeigt die TTC (t_{tc}).

Die resultierende Zeitlücke und TTC sind in den darunterliegenden Diagrammen abgebildet.

Im nächsten Schritt der Auswertung werden die Maßzahlen für jede einzelne Messfahrt bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass die Maßzahlen nicht für die gesamte Strecke, sondern jeweils für den Konstantfahrt- und Verzögerungsabschnitt berechnet werden. In Abbildung 4.8 sind jeweils die minimale Zeitlücke und minimale Time to Collision für den Konstantfahrabschnitt (KA) und Verzögerungsabschnitt (VA) mit einem roten Kreis markiert. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Anteil von Zeitlücken unterhalb von 1,8 s in beiden Abschnitten bei 100 % liegt. Die gestrichelte Linie markiert die

Schwelle von 0,9 s. Im KA wird diese Grenze nicht unterschritten. Der Anteil liegt hier folglich bei 0 %. Im VZ sinkt die Zeitlücke ungefähr zwischen 60 s und 90 s unter die Schwelle von 0,9 s. Bezogen auf die Fahrzeit innerhalb dieses Abschnittes ist das ein Anteil von ca. 39 %.

Nach Berechnung der oben beschriebenen Maßzahlen für alle Messfahrten werden für jede Strategie und jedem Streckenabschnitt die zugehörigen Maßzahlen-Verteilungen gebildet. Ähnlich wie bei der Eco-ACC Studie können dann anhand der Lage des Medians der Verteilungen Aussagen über die Veränderung des Fahrverhaltens und der Sicherheit getroffen werden. Für die Bestimmung der statistischen Signifikanz kommen auch in dieser Studie wieder ausschließlich nicht parametrische Tests zum Einsatz, da die ermittelten Daten überwiegend nicht einer Normalverteilung unterliegen und zudem keine Varianzhomogenität aufweisen.

Für den Vergleich von verschiedenen Fahrstrategien, z.B. Bremsen, Schub und Segeln, kommt zunächst ein Test zur Anwendung, der auf signifikante Unterschiede zwischen allen 3 Strategien testet. Das Testergebnis trifft eine Aussage darüber, ob mindestens zwischen 2 Strategien ein signifikanter Unterschied besteht. Jedoch nicht, zwischen welchen Strategien genau ein signifikanter Unterschied vorhanden ist. Für den sog. unverbunden globalen Test kommen verschiedene Testverfahren infrage. Ein weit verbreitetes nicht-parametrisches Testverfahren ist der Kruskal-Wallis-Test [78, 166]. Er ist das Pendant zum parametrischen Testverfahren der Varianzanalyse (ANOVA⁶) [239]. Allerdings reagiert dieses Verfahren nicht nur auf Unterschiede der Lage, sondern auch auf voneinander abweichende Formen der Verteilung [166, 298]. Da die Verteilungen der Maßzahlen nicht immer gleiche Formen der Verteilung aufweisen, wird zur Absicherung neben dem Kruskal-Wallis-Test auch der Median-Test für den Vergleich von mehr als zwei Stichproben angewendet. Im Vergleich zum Kruskal-Wallis-Test setzt der Median-Test nur eine Ordinalskalierung der Zufallsvariablen

⁶ ANOVA - Analysis of Variance

voraus. Dagegen handelt es sich beim Median-Test um ein konservativeres Verfahren, das eine geringere Teststärke hat [78].

Weisen die Ergebnisse beider Testverfahren auf einen signifikanten Unterschied der Lage zwischen den Verteilungen hin, wird ein Test für den paarweisen Vergleich angewendet. Auch für den paarweisen Vergleich von unverbundenen Stichproben kommen wieder verschiedene Testverfahren in Betracht. Aufgrund der häufig unterschiedlichen Varianz und Form der Verteilungen wird anstatt des U-Tests⁷ der Median-Test für den Vergleich von zwei Verteilungen verwendet [83, 298, 240].

Dabei ist zu beachten, dass das mehrfache Testen zu einer Kumulierung des Fehlers erster Art führt. Werden wie in dieser Studie $m = 3$ paarweise Hypothesentests zu einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ durchgeführt, erhöht sich der Fehler erster Art auf $1 - (1 - \alpha)^m = 14,26\%$ [307]. Zur Berücksichtigung des α -Fehlers wird nachfolgend die Bonferroni-Korrektur angewendet [146, 240, 307]. Bei der Bonferroni-Korrektur erfolgt entsprechend der Anzahl von Tests (m) eine Anpassung des Signifikanzniveau nach Gleichung 4.4.

$$\alpha' = \alpha/m \quad (4.4)$$

Für den paarweisen Vergleich von verbundenen Daten, also ob sich beispielsweise das Abstandsverhalten eines nachfolgenden Fahrers innerhalb des Verzögerungsabschnittes im Vergleich zum Konstantfahrabschnitt ändert, wird wie bei der Eco-ACC Studie der Vorzeichentest angewendet. Wie bereits erläutert, hat der Vorzeichentest den Vorteil, dass im Vergleich zum Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest keine Symmetrie der Differenzverteilung um den Median erforderlich ist (s. Abschnitt 4.1.3).

⁷ U-Test auch bekannt unter Mann-Whitney-U-Test oder Mann-Whitney-Test

4.2.4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der Studie vorgestellt und diskutiert. Um eine Aussage über die Auswirkungen von energieeffizienten Fahrstrategien auf die Fahrsicherheit treffen zu können, werden für die beiden Situationen "Verzögerung vor Tempolimits" und "Vermindertes Hochbeschleunigen" die Maßzahlen der verschiedenen Strategien innerhalb eines definierten Abschnittes verglichen. Durch diesen Vergleich kann zum Beispiel untersucht werden, inwieweit sich das Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers beim Segeln im Vergleich zum Bremsen unterscheidet. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den verschiedenen Strategien um unverbundene Stichproben handelt. Die nachfolgenden Fahrer wurden bei jeder Strategie zufällig ausgewählt und deshalb nicht allen Strategien des Ego-Fahrzeugs ausgesetzt. Aufgrund einer nicht vergleichbaren Zusammensetzung der Stichproben kann es deshalb vorkommen, dass sich beispielsweise die verschiedenen Gruppen aus unterschiedlichen Fahrertypen zusammensetzen und folglich zu einem anderen Fahrverhalten führen. Aus diesem Grund wird daneben auch das Fahrverhalten eines jeden Fahrers auf dem Abschnitt vor der energieeffizienten Strategie mit dem Abschnitt, in dem die energieeffiziente Strategie angewendet wird, verglichen. Dadurch kann festgestellt werden, ob sich das Fahrverhalten eines jeden nachfolgenden Fahrers und folglich die Sicherheit verändert.

Verzögerung vor Tempolimits

Zur Untersuchung der Auswirkungen von energieeffizienten Verzögerungsstrategien auf das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern wurden auf der Strecke zwischen Bebenhausen und Tübingen insgesamt 174 Messfahrten durchgeführt [217] (s. Tabelle 4.7).

Kategorie	Bremsen	Schub	Segeln	Summe
Objekt erfasst	31	33	28	92
Objekt verloren	17	22	15	54
Überholt im VA	0	1	2	3
Überholt im KA	1	3	2	6
Ungültig	11	2	6	19
Summe	60	61	53	174

Tabelle 4.7: Aufteilung der durchgeführten Messfahrten zwischen Bebenhausen und Tübingen

Bei 92 Messungen folgten die nachfolgenden Fahrzeuge dem Ego-Fahrzeug innerhalb der Reichweite der Heckradarsensoren. Im Gegensatz dazu reichte bei 54 Messfahrten die Sensorreichweite nicht aus und die nachfolgenden Fahrzeuge konnten für einen längeren Zeitraum nicht erfasst werden. Hinsichtlich der Anzahl von Überholmanövern im Konstantfahrt (KA) und Verzögerungsabschnitt (VA) lässt sich zwischen den verschiedenen Strategien Bremsen, Schub und Segeln kein signifikanter Unterschied erkennen. Insgesamt 19 Messungen wurden aufgrund von Abweichungen vom definierten Geschwindigkeitsverlauf, z.B. wegen Fahrfehlern oder Einbremsen durch langsamere vorausfahrende Fahrzeuge, als ungültig erklärt.

Wie bereits erläutert, werden für die weitere Analyse jeweils nur die Messfahrten berücksichtigt, bei denen das nachfolgende Fahrzeug während der gesamten Zeit vom Heckradar erfasst wurde (s. Tabelle 4.7, Objekt erfasst).

Vergleich der Verzögerungsstrategien Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass im Konstantfahrabschnitt (KA) die Mediane der Maßzahlenverteilungen zwar voneinander abweichen, jedoch zeigen der Kruskal-Wallis und Median-Test keine signifikanten Unterschiede an. Die p -Werte (p_{KW} und p_M) liegen hier immer über dem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ (s. Tabelle 4.8 oben). Innerhalb des Konstantfahrabschnittes (KA), in dem sich die verschiedenen Fahrstrategien in ihrem Geschwindigkeits-

	Maßzahl	Einheit	Bremsen	Schub	Segeln	PKW	PM
KA	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,48	1,32	1,65	0,15	0,13
	$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	1,10	1,01	1,09	0,39	0,55
	$\tilde{q}_{\tau < 1.8s}$	[1]	0,76	1,00 ₍₁₈₎	0,62	0,22	0,25
	$\tilde{q}_{\tau < 0.9s}$	[1]	0,00 ₍₂₃₎	0,00 ₍₂₁₎	0,00 ₍₂₂₎	0,32	0,41
	$\tilde{t}_{c,min}$	[s]	34,80	27,98	33,25	0,58	0,30
VA	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,66	1,37	1,01***	< 0,01	< 0,01
	$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	1,17	0,76**	0,74***	< 0,01	< 0,01
	$\tilde{q}_{\tau < 1.8s}$	[1]	0,67	1,00 ₍₁₈₎	0,94	0,05	0,14
	$\tilde{q}_{\tau < 0.9s}$	[1]	0,00 ₍₂₄₎	0,17***	0,25***	< 0,01	< 0,01
	$\tilde{t}_{c,min}$	[s]	15,47	13,21	13,61	0,35	0,54

Tabelle 4.8: Maßzahlen im Konstantfahrt- (KA) und Verzögerungsabschnitt (VA) zwischen Bebenhausen und Tübingen. (**) $p < 0,05$ oder (***) $p < 0,01$ für paarweisen Median-Test mit $H0: \bar{x}_{Bremsen} = \bar{x}_{Schub}$ oder $H0: \bar{x}_{Bremsen} = \bar{x}_{Segeln}$. Liegt der Median eines Anteils am Rand ($q = 0$ oder $q = 1$), wird hinter dem Median in Klammern die Anzahl der Bindungen des Medians angegeben [123].

verlauf nicht unterscheiden, scheinen die verschiedenen Fahrer also ein vergleichbares Fahrverhalten zu wählen.

Der Median des Zeitlückenmedians $\tilde{\tau}_{0,5}$ liegt bei den verschiedenen Verzögerungsstrategien im Bereich von 1,3 s bis 1,6 s. Das bedeutet, dass 50 % der nachfolgenden Fahrer 50 % der Fahrzeit einen zeitlichen Abstand von weniger bzw. mehr als 1,3 s bis 1,6 s zum Ego-Fahrzeug hatten. Die Mediane der minimalen Zeitlücken ($\tilde{\tau}_{min}$) liegen mit ungefähr 1,0 s bis 1,1 s sehr nahe beieinander. Zwar zeigen die Mediane der Expositionsanteile ($\tilde{q}_{\tau < 1.8s}$), dass die empfohlene Grenze von 1,8 s im Mittel zwischen 70 % und 100 % der Fahrzeit unterschritten wird, jedoch wird die Grenze von 0,9 s, unterhalb der es zu Bußgeldern kommt, im Mittel nicht verletzt. Der Median liegt hier bei allen Strategien bei 0 %. Aufgrund einer großen Anzahl von Anteilen von 0 %, sogenannten Bindungen innerhalb der Stichproben, gilt hier nicht die allgemeine Definition des Medians. In diesem Fall ist der Anteil, der größer als der Median ist, kleiner als 50 %. Zum Beispiel haben beim Schubtrieb im Konstantfahrabschnitt 21 von 33 Fahrern einen Expositionsanteil

von 0 %. Das heißt, bei nur 12 Fahrern ist der Anteil größer als 0 % bzw. fahren mit einem zeitlichen Abstand von weniger als 0,9 s. Liegt der Median eines Expositionsanteil am Rand seines Definitionsbereiches, so sind in den Ergebnistabellen in tiefgestellten Klammern die Anzahl der jeweiligen Randwerte angegeben. Die Mediane der minimalen TTC ($\tilde{t}_{tc,min}$) liegen im KA mit ungefähr 28 s bis 35 s auf einem erwartungsgemäß hohen Niveau. Auch hier zeigen der Kruskal-Wallis und Median-Test keinen signifikanten Unterschied an.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für den Verzögerungsabschnitt (VA) fällt hingegen auf, dass sich in Abhängigkeit der Verzögerungsstrategie die Mediane der Maßzahlenverteilungen signifikant unterscheiden (s. Tabelle 4.8 unten). Der Median der Zeitlückenmediane sinkt bei der Strategie Segeln um 39 % im Vergleich zum Bremsen ab. Der paarweise Median-Test lehnt hier die Nullhypothese $\tilde{t}_{0,5,Segeln} = \tilde{t}_{0,5,Bremsen}$ zu einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ ab. Nachfolgende Fahrer, die dem Ego-Fahrzeug mit der Strategie Segeln folgten, fuhren also im Mittel mit einer deutlich geringeren Zeitlücke. Auch im Schubbetrieb liegt der Median der Zeitlückenmediane unterhalb der Strategie Bremsen, jedoch kommt der paarweise Median-Test nicht zu einem signifikanten Ergebnis. Neben dem Zeitlückenmedian liegt auch der Median der minimalen Zeitlücken bei Anwendung der Schub- und Segelstrategie mit -35 % deutlich unterhalb der Strategie Bremsen. Die paarweisen Median-Tests zeigen für Schub und Segeln im Vergleich zum Bremsen einen signifikanten Unterschied zum Niveau 0,05 und 0,01. Bei den Medianen der Expositionsanteile unterhalb von 1,8 s ist eine Zunahme beim Schub auf 1,00 und Segeln auf 0,94 im Vergleich zum Bremsen mit 0,67 zu beobachten. Jedoch kommen die globalen Tests, bei denen alle drei Strategien auf signifikante Unterschiede getestet werden, zu keinem signifikanten Ergebnis. Im Gegensatz dazu ist beim Expositionsanteil unterhalb von 0,9 s bei Anwendung des Schub- und Segelbetriebes ein signifikanter Unterschied zu erkennen ($p < 0,01$). Die zeitlichen Anteile steigen hier während der Strategien Schub und Segeln auf 0,17 und 0,25. Das bedeu-

tet, dass 50 % der nachfolgenden Fahrer 17 % bis 25 % der Fahrzeit im Verzögerungsabschnitt eine Zeitlücke von weniger als 0,9 s hatten. Im Fall Bremsen wird von mehr als 50 % der Fahrer die Schwelle von 0,9 s überhaupt nicht unterschritten. Bei Anwendung der Strategie Schub und Segeln wird also von einer großen Anzahl der nachfolgenden Fahrer der kritische Abstand von 0,9 s deutlich für längere Zeit unterschritten. Hinsichtlich der minimalen TTC liegen die Mediane beim Schub und Segeln unterhalb der Strategie Bremsen. Allerdings zeigen hier der globale Kruskal-Wallis und Median-Test keinen signifikanten Unterschied.

Auf Basis der Ergebnisse lässt sich also schlussfolgern, dass die nachfolgenden Fahrer auf energieeffiziente Verzögerungsstrategien wie Schub- und Segelbetrieb mit einer deutlich über einen längeren Zeitraum verringerten Zeitlücke reagieren. Dagegen verändert sich aber offenbar das Annäherungsverhalten, welches die minimale TTC beschreibt, nicht signifikant.

Um neben der abschnittweisen Betrachtung auch Erkenntnisse über den Verlauf des zeitlichen Abstandsverhaltens zu erhalten, wird im nächsten Schritt für die verschiedenen Strategien der Median der Zeitlücke entlang der gesamten Strecke gebildet. Dafür wird vom Referenzpunkt aus mit einer Schrittweite von 10 m für alle Messfahrten die Zeitlücke berechnet. Danach erfolgt an jeder Stützstelle die Bildung des Medians für die zugehörige Strategie (s. Abbildung 4.9 Mitte).

Zusätzlich zum Median der Zeitlücke wird an jeder Stützstelle auch ein Hypothesentest durchgeführt. Mithilfe des Hypothesentests kann dann beurteilt werden, ob und in welchem Bereich zwischen den Medianen der Zeitlücke ein signifikanter Unterschied besteht. Neben einem globalen Kruskal-Wallis und Median-Test werden auch paarweise Median-Tests mit Bonferroni-Korrektur angewendet, um signifikante Unterschiede zwischen den Strategien anzuzeigen (s. Abbildung 4.9 unten). Für die Hypothesentests wird ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ gewählt.

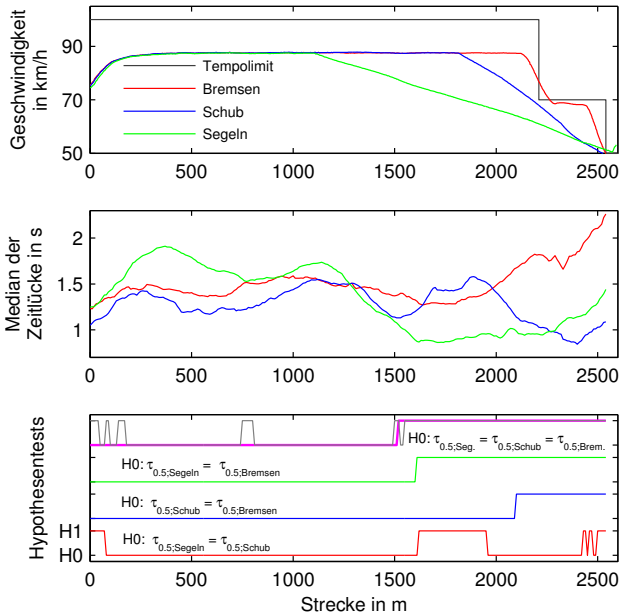


Bild 4.9: Verlauf des Medians der Zeitlücke zwischen Bebenhausen und Tübingen (Mitte). Geschwindigkeitsverlauf der Fahrstrategien (oben) und Ergebnisse der Hypothesentests (unten) mit KW-Test (magenta) und alle anderen mit Median-Test (grau, grün, blau, rot). © 2013 IEEE. Nachdruck mit Genehmigung von [123].

Innerhalb des Konstantfahrabschnittes (KA) liegen die Verläufe der Zeitlückenmediane überwiegend nahe beieinander. Lediglich im ersten Teil des KA halten die Fahrer der Gruppe Segeln im Mittel einen größeren zeitlichen Abstand. Jedoch zeigen trotz der augenscheinlichen Abweichungen der Mediane die zugehörigen statistischen Tests innerhalb des gesamten Konstantfahrabschnittes keinen signifikanten Unterschied. Die Nullhypothese gleicher Mediane werden vom globalen Kruskal-Wallis sowie Median-Test nicht abgelehnt (s. Abbildung 4.9 unten). Die abschnittswisen Betrachtungen (s. Tabelle 4.8) werden somit bestätigt.

Im Verzögerungsabschnitt ist zu erkennen, dass sich mit dem Beginn der Verzögerung im Segelbetrieb auch der Median der Zeitlücke erheblich verringert, wohingegen die zeitlichen Abstände der Strategien Schub und Bremsen auf einem höheren Niveau verharren. Erst mit dem Start der Verzögerung im Schubbetrieb sinkt auch hier der zugehörige Median der Zeitlücke ab. Ferner kommen der KW- und Median-Test zu dem Ergebnis, dass nach Beginn der Verzögerung im Segelbetrieb ein signifikanter Unterschied zwischen den Medianen der Zeitlücke besteht. Bei Betrachtung der Ergebnisse für die paarweisen Tests wird zunächst ein signifikanter Unterschied zwischen den Strategien Segeln und Bremsen sowie Segeln und Schub angezeigt. Erst nach Beginn der Verzögerung im Schubbetrieb kommt auch der paarweise Test zwischen den Strategien Bremsen und Schub zu einem signifikanten Ergebnis. Bei Anwendung des Schubbetriebes gleicht sich im weiteren Verlauf der zugehörige Median der Zeitlücke mit dem Median für die Strategie Segeln an. In diesem Bereich wird auch die Nullhypothese gleicher Mediane nicht mehr abgelehnt. Generell kann beobachtet werden, dass es nach Beginn der Verzögerung eine gewisse Zeit bzw. einen gewissen Weg dauert, bis die Unterschiede der Zeitlückenmediane signifikant werden. Im Vergleich zum Schubbetrieb mit ca. 280 m ist beim Segelbetrieb die zurückgelegte Strecke mit ca. 500 m deutlich länger bis der Unterschied der Zeitlücke signifikant wird. Dieses Verhalten ist dadurch zu erklären, dass im Segelbetrieb die Verzögerung geringer als im Schubbetrieb ist und dadurch die Annäherung des nachfolgenden Fahrzeugs eine längere Distanz in Anspruch nimmt. Weiterhin ist bei allen Verzögerungsstrategien ersichtlich, dass gegen Ende der Median der Zeitlücke wieder ansteigt. Für dieses Verhalten der nachfolgenden Fahrer lassen sich mehrere Vermutungen anstellen. Bei der Strategie Bremsen ist schon vor der Verzögerung des Ego-Fahrzeugs eine Erhöhung des Medians der Zeitlücke zu beobachten. Vermutlich kann deshalb die Erhöhung der Zeitlücke nicht als Reaktion auf das Aufleuchten des Bremslichtes gesehen werden, sondern ist vielmehr auf die Entscheidung der nachfolgenden Fahrer, früher als das Ego-Fahrzeug mit

der Verzögerung zu beginnen, zurückzuführen. Hinsichtlich der Strategien Schub und Segeln kann der Anstieg vermutlich mit einer gewissen Anpassung an die Fahrweise oder Akzeptanz der Fahrweise des vorausfahrenden Ego-Fahrzeugs erklärt werden. Aus eigener Erfahrung ist es beispielsweise vorstellbar, dass der nachfolgende Fahrer zur Einsicht kommt sowie keine Möglichkeit zum Überholen sieht und folglich den Abstand wieder vergrößert.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Auswertung des Zeitlückenmedians entlang der gesamten Strecke in guter Übereinstimmung steht mit den Ergebnissen der abschnittswisen Betrachtung. Beide Vorgehensweisen kommen zu dem Ergebnis, dass die Anwendung des Segel- und Schubetriebes zu einer signifikanten und zeitweise auch sicherheitskritischen Reduzierung des zeitlichen Abstandes führen. Hinsichtlich des Annäherungsverhaltens, das durch die TTC abgebildet wird, können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Vergleich Konstantfahrt- und Verzögerungsabschnitt Neben der Fragestellung inwieweit eine energieeffiziente Verzögerungsstrategie zu einer Veränderung des Abstandsverhaltens führt, soll in diesem Abschnitt auch der Frage nachgegangen werden, ob zwischen dem Fahrverhalten im Konstantfahrtabschnitt und im Verzögerungsabschnitt ein Zusammenhang besteht. Das heißt, ob beispielsweise bei einem großen zeitlichen Abstand innerhalb des Konstantfahrtabschnittes auch mit einem vergleichsweise größeren Abstand während der Verzögerung gerechnet werden kann. Dazu wird im Folgenden der Streckenabschnitt zwischen Bebenhausen und Tübingen in Abhängigkeit der jeweiligen Verzögerungsstrategie in einen Konstantfahrt- und Verzögerungsabschnitt unterteilt. Das bedeutet, der jeweilige Verzögerungsabschnitt beginnt dort, wo beispielsweise auch die Verzögerung im Schubbetrieb beginnt (s. Abbildung 4.10).

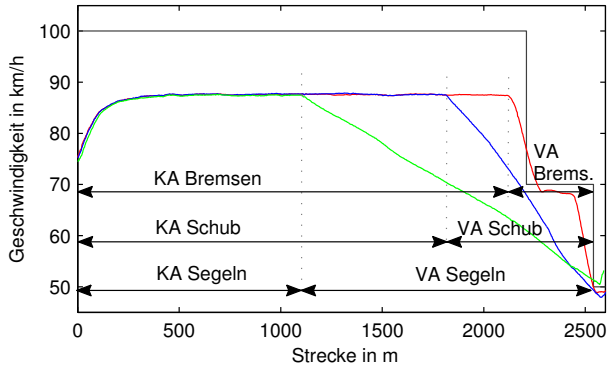


Bild 4.10: Aufteilung der Konstantfahrt- (KA) und Verzögerungsabschnitte (VA) für die Strategien Bremsen (rot), Schub (blau) und Segeln (grün). © 2013 IEEE. Nachdruck mit Genehmigung von [123].

Für die Mediane der Zeitlücke ($\tau_{0,5}$) sind die Ergebnisse dieser abschnittweisen Gegenüberstellung in einem Streudiagramm⁸ dargestellt (s. Abbildung 4.11). Hier wird deutlich, dass bei allen Verzögerungsstrategien ein positiver Zusammenhang zwischen dem Konstantfahrt (KA) und Verzögerungsabschnitt besteht (VA). Ein größerer zeitlicher Abstand im KA führt auch im VA zu einem größeren Abstand. Jedoch scheint die Verstärkung in Abhängigkeit der Strategie abzunehmen. Wird die Strategie Bremsen angewendet, so befinden sich die Datenpunkte überwiegend oberhalb der gestrichelten Linie. Die entsprechende Ausgleichsgerade mit einer Steigung von 0,93 verläuft nahezu parallel und ist um 0,43 s nach oben verschoben. Die Anwendung der Strategie Bremsen hat in diesem Versuch offenbar einen Anstieg des Zeitlückenmedians während der Verzögerung zur Folge.

Im Gegensatz dazu liegen die Datenpunkte für die Verzögerungsstrategie Schub zum größeren Teil unterhalb der gestrichelten Linie. Außerdem beträgt hier die Steigung der zugehörigen Ausgleichsgerade nur noch 0,51.

⁸ Der Begriff Streudiagramm ist auch unter Punktwolke oder Scatterplot bekannt.

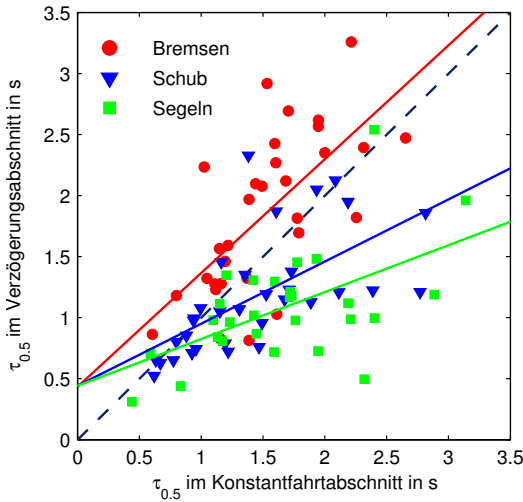


Bild 4.11: Abhängigkeit der Zeitlückenmediane zwischen Konstantfahrabschnitt (KA) und Verzögerungsabschnitt (VA) mit zugehöriger Ausgleichsgerade in gleicher Farbe auf der Strecke zwischen Bebenhausen und Tübingen. Die blaue gestrichelte Linie zeigt die Schwelle, bei der der Zeitlückenmedian im KA und VA übereinstimmen. © 2013 IEEE. Nachdruck mit Genehmigung von [123].

Das bedeutet, ein größerer Zeitlückenmedian im KA führt nicht mehr zu einer gleichen absoluten Zunahme im Verzögerungsabschnitt wie es beim der Strategie Bremsen nahezu der Fall ist. Noch deutlicher ist dieser Effekt bei der Strategie Segeln zu beobachten. Hier liegen nur noch 3 Datenpunkte leicht oberhalb der gestrichelten Linie. Die entsprechende Ausgleichsgerade hat eine Steigung von 0,38.

Die Werte des Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten ρ zeigen für alle Strategien einen positiven Wert zu einem Signifikanzniveau von $\alpha < 0,01$. Dabei besteht insbesondere für die Strategien Bremsen mit 0,68 und Schubbetrieb mit 0,77 zwischen KA und VA eine recht hohe Korrelation. Bei Anwendung der Strategie Segeln liegt der Korrelationskoeffizient zwischen den Zeitlückenmedien des KA und VA bei 0,48.

Maßzahl	Einheit	Bremsen			Schub			Segeln		
		KA	VA	p <	KA	VA	p <	KA	VA	p <
$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,49	1,82	0,01	1,35	1,08	0,04	1,65	1,01	0,01
$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	1,03	1,48	0,01	1,00	0,76	0,17	1,09	0,74	0,01
$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	0,75	0,40	0,01	1,00 ₍₁₇₎	1,00 ₍₂₀₎	0,34	0,62	0,94	0,01
$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,00 ₍₂₁₎	0,00 ₍₂₇₎	0,11	0,00 ₍₂₁₎	0,29	0,05	0,00 ₍₂₂₎	0,25	0,01
$\tilde{t}_{c,min}$	[s]	25,92	15,83	0,01	23,45	13,21	0,01	33,25	13,61	0,01

Tabelle 4.9: Vergleich der Maßzahlen im jeweiligen Konstantfahrt- (KA) und Verzögerungsabschnitt (VA) zwischen Bebenhausen und Tübingen. p-Wert für Vorzeichentest mit $H_0: \bar{x}_{KA} = \bar{x}_{VA}$. In tiefgestellten Klammern sind jeweils die Bindungen des Medians am Rand eines Definitionsbereichs aufgeführt [123].

Insgesamt lässt sich also festhalten, dass beim Zeitlückenmedian zwischen KA und VA ein positiver Zusammenhang besteht. Eine Zunahme im KA führt auch häufig zu einer Zunahme im VA. Allerdings wirkt sich bei einer Verzögerung im Schub- oder Segelbetrieb eine Erhöhung im KA weniger stark im VA aus.

Neben dem Zeitlückenmedian werden im Folgenden auch die übrigen Maßzahlen verglichen (s. Tabelle 4.9). Auch hier wird noch mal deutlich, dass bei den Strategien Schub und Segeln der zeitliche Abstand im zugehörigen VA signifikant reduziert wird. Beispielsweise erhöht sich der Expositionsanteil unterhalb von 0,9 s von 0 auf 29 % und 25 %. Im Gegensatz zur Zeitlücke ist bei der minimalen TTC für alle Strategien zwischen KA und VA eine signifikante Abnahme zu verzeichnen. Jedoch bewegt sich hier der Median der minimalen TTC ($\tilde{t}_{c,min}$) mit 13 s bis 15 s nicht in einem sicherheitskritischen Bereich.

Vermindertes Hochbeschleunigen

Im nachfolgenden Abschnitt wird nun auf die Ergebnisse für die Strategie des verminderten Hochbeschleunigens eingegangen. Insgesamt wurden auf der dafür ausgewählten Strecke zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen 118 Messfahrten durchgeführt [217].

Kategorie	HB80	HB70	SN	Summe
Objekt erfasst	31	32	30	93
Objekt verloren	8	0	0	8
Überholt BA	0	2	10	12
Überholt KA	0	0	1	1
Fehlerhaft	1	0	3	4
Summe	40	34	44	118

Tabelle 4.10: Aufteilung der durchgeführten Messfahrten zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen

Im Vergleich zu den Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von energieeffizienten Verzögerungen war bei dieser Versuchsreihe der Anteil von Objektverlusten wesentlich geringer. Dagegen konnte hier bei der Strategie Segeln im Vergleich zum Hochbeschleunigen auf 80 km/h ein Anstieg der Überholvorgänge von nachfolgenden Fahrern beobachtet werden. Im Beschleunigungsabschnitt wurde das Ego-Fahrzeug bei Anwendung der Strategie Segeln von 10 nachfolgenden Fahrern überholt (s. Tabelle 4.10). Der Chi-Quadrat-Test auf Unabhängigkeit [78] bestätigt hier die Vermutung, dass die Anzahl der Überholvorgänge nicht unabhängig von der Art der angewendeten Fahrstrategie ist ($\alpha = 0,01$). Die Strategie Segeln führt also dazu, dass sich die Anzahl der Überholvorgänge erhöht und folglich negativ auf die Fahrsicherheit auswirkt. Für die nun anschließende Auswertung werden wie in der ersten Versuchsreihe nur die Messungen berücksichtigt, bei denen während der gesamten Fahrzeit das nachfolgende Fahrzeug erfasst wurde.

Vergleich der Strategien zum Hochbeschleunigen Im Konstantfahrtabschnitt (KA) treten trotz des gleichen Geschwindigkeitsverlaufes signifikante Unterschiede bei den Medianen der Maßzahlenverteilungen auf (s. Tabelle 4.11). Insbesondere bei den Fahrten der Strategie Hochbeschleunigen auf 80 km/h und anschließendes Bremsen (HB80) sind erhebliche Abweichungen zu den anderen beiden Strategien zu beobachten. Der Grund

	Maßzahl	Einheit	HB80	HB70	SN	PKW	PM
KA	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,33	2,09	1,87***	0,01	0,01
	$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	1,08	1,43**	1,44**	0,01	0,05
	$\tilde{q}_{\tau < 1.8s}$	[1]	1,00 ₍₁₉₎	0,18	0,45**	< 0,01	0,01
	$\tilde{q}_{\tau < 0.9s}$	[1]	0,00 ₍₁₉₎	0,00** ₍₂₉₎	0,00** ₍₂₇₎	< 0,01	< 0,01
	$\tilde{t}_{c,min}$	[s]	19,72	23,42	23,70	0,03	0,33
BA	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,67	1,40	1,18*	0,04	0,02
	$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	1,01	0,77	0,86	0,13	0,23
	$\tilde{q}_{\tau < 1.8s}$	[1]	0,62	0,72	1,00 ₍₁₈₎	0,02	0,07
	$\tilde{q}_{\tau < 0.9s}$	[1]	0,00 ₍₁₈₎	0,08	0,02	0,20	0,16
	$\tilde{t}_{c,min}$	[s]	8,05	9,83***	9,09	0,02	0,01

Tabelle 4.11: Maßzahlen im Konstantfahrt- (KA) und Beschleunigungsabschnitt (BA) zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen. (**) $p < 0,05$ oder (***) $p < 0,01$ für paarweisen Median-Test mit $H0: \bar{x}_{HB80} = \bar{x}_{HB70}$ oder $H0: \bar{x}_{HB80} = \bar{x}_{SN}$. Liegt der Median eines Anteils am Rand ($q = 0$ oder $q = 1$), wird hinter dem Median in Klammern die Anzahl der Bindungen des Medians angegeben.

dafür ist vermutlich auf einen abweichenden Startabstand zurückzuführen. Zudem ist der Konstantfahrtabschnitt im Vergleich zur Strecke zwischen Bebenhausen und Tübingen verhältnismäßig kurz und bietet folglich wenig Zeit, um etwaige Unterschiede im Startabstand auszugleichen. Eine weitere Begründung für die signifikanten Unterschiede im Abstandsverhalten können verschiedene Fahrertypen sein. Das würde bedeuten, dass in der Gruppe der Referenzstrategie mehr Fahrer enthalten sind, die grundsätzlich dichter auffahren.

Innerhalb des Beschleunigungsabschnittes (BA) liegen die Mediane der Zeitlückenmediane für die Strategien Hochbeschleunigen auf 70 km/h mit anschließendem Schubbetrieb (HB70) und Segeln mit nachgelagertem Schubbetrieb (SN) unterhalb der Referenzstrategie (HB80). Obwohl im Konstantfahrtabschnitt (KA) die nachfolgenden Fahrer der Referenzstrategie einen geringeren mittleren zeitlichen Abstand hielten, scheint sich das Verhältnis im Beschleunigungsabschnitt (BA) umzukehren. Jedoch ist der Unterschied des Medians von $\tau_{0,5}$ zwischen der Referenzstrategie (HB80) und Segeln

mit anschließendem Schubbetrieb (SN) nur marginal signifikant. Bei den anderen Maßzahlen, die das Abstandsverhalten beschreiben, ist auch eine Verringerung bzw. Erhöhung des Anteils unterhalb von 0,9 s ($\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$) und 1,8 s ($\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$) zu beobachten, allerdings weisen die Unterschiede keine statistische Signifikanz auf oder deuten nur auf einen Trend hin ($p > 0,1$).

Ein dennoch sehr signifikanter Unterschied zeigt sich im Annäherungsverhalten bzw. dem Median der minimalen TTC ($\tilde{t}_{tc,min}$). Der Median der minimalen TTC der Referenzstrategie (HB80) liegt mit 8,05 s unter der Strategie HB70 mit 9,83 s. Der Unterschied ist hoch signifikant zum Niveau $\alpha = 0,01$. Bei einem Median der minimalen TTC von 8 s liegt im Mittel noch kein sicherheitskritischer Zustand vor. Dennoch wird die Tendenz sichtbar, dass ein Bremsvorgang nicht die sicherste Art und Weise sein muss, um vor einem Tempolimit zu verzögern. Insbesondere wenn die nachfolgenden Fahrer eine Bremsung nicht erwarten.

Zusätzlich zur abschnittswisen Betrachtung wird auch für die Strategien des verringerten Hochbeschleunigens der Verlauf des Medians der Zeitlücke bestimmt (s. Abbildung 4.12).

Die Berechnung des Zeitlückenmedians erfolgt nach der gleichen Vorgehensweise wie bei den Strategien für die Verzögerung (s. Seite 128). Anhand dieser Darstellung kann die zu Beginn dieses Abschnitts gestellte These, dass sich die Maßzahlen bezüglich des Abstandsverhaltens aufgrund eines unterschiedlichen Startabstandes unterscheiden, gestützt werden. Im entsprechenden Diagramm liegt der Median der Zeitlücken für die Referenzstrategie (HB80) schon zu Beginn klar unterhalb der beiden Strategien des verringerten Hochbeschleunigens (HB70 und SN). Im weiteren Verlauf nähern sich die Mediane der Zeitlücken aneinander an und haben am Anfang des Beschleunigungsabschnittes einen vergleichbaren Wert. Das Verhalten spricht wiederum dafür, dass zwischen den Gruppen kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Fahrertypen besteht. Ungeachtet des anfänglich abweichenden Startabstandes nähern sie sich auf ein vergleichbares Niveau an. Dies wird durch den globalen Kruskal-Wallis und Median-Test gestützt,

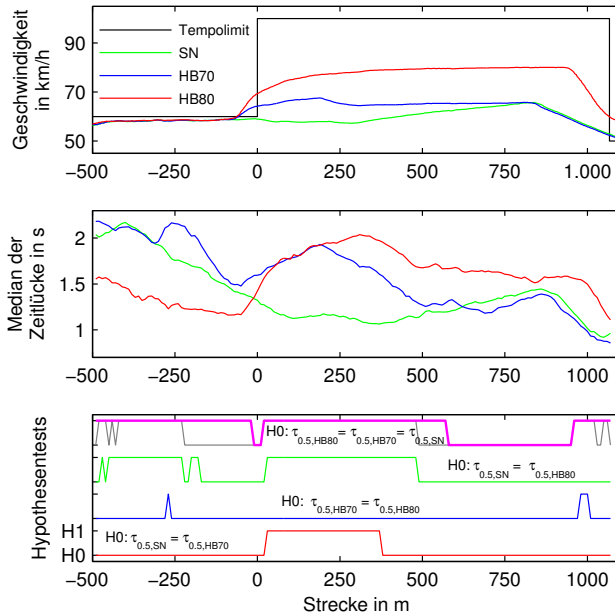


Bild 4.12: Verlauf des Medians der Zeitlücke zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen (Mitte). Geschwindigkeitsverlauf der Fahrstrategien (oben) und Ergebnisse der Hypothesentests (unten) mit KW-Test (magenta) und alle anderen mit Median-Test (grau, grün, blau, rot).

die in diesem Bereich die Nullhypothese gleicher Mediane nicht verwerfen. Dagegen unverständlich erscheint die Tatsache, dass der paarweise Median-Test zwischen der Referenzstrategie HB80 und der Strategie HB70 bis auf einen kurzen Bereich keine signifikanten Unterschiede anzeigt. Bei einer Analyse der Testergebnisse hat sich jedoch herausgestellt, dass hier der p-Wert des Median-Test mit 0,04 dem Bonferroni-korrigierten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,017$ sehr nahe kommt und daher eine Ablehnung nur knapp verfehlt.

Im Beschleunigungsabschnitt nähern sich die nachfolgenden Fahrer, die mit der Strategie Segeln (SN) konfrontiert werden weiter dem Ego-Fahrzeug an

und fahren über eine Distanz von ungefähr 400 m im Mittel mit einer Zeitlücke von 1 s, wohingegen sich der zeitliche Abstand bei der Referenzstrategie HB80 und der Strategie HB70 wieder im Mittel auf circa 2 s erhöht. In diesem Bereich zeigen auch der globale Kruskal-Wallis und Median-Test eine signifikante Abweichung. Im paarweisen Vergleich mithilfe des Median-Tests liegen im ersten Teil des Beschleunigungsabschnitts signifikante Unterschiede zwischen der Referenzstrategie (HB80) und SN sowie zwischen HB70 und SN vor.

Die im weiteren Verlauf entstehende Differenz zwischen Referenz (HB80) und HB70 ist nicht signifikant. Der zweite Teil des Beschleunigungsabschnittes ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Mediane der Zeitlücke immer weiter annähern und einen Wert von 1,4 s erreichen. Auch die statistischen Tests behalten hier die Nullhypothese gleicher Zeitlückenmediane bei.

Im Gegensatz zu den Messfahrten in Tübingen (s. Abbildung 4.9) verringert sich bei allen Strategien der zeitliche Abstand während der anschließenden Verzögerungsphase wieder. Wie bereits beim abschnittswisen Vergleich (s. Tabelle 4.11) vermutet, kommt die Verzögerung des Ego-Fahrzeugs für die nachfolgenden Fahrer unerwartet und bewegt die Fahrer dazu, dichter aufzufahren. Dieses Verhalten kann auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden. Eine mögliche Begründung ist die schlechte Einsehbarkeit der Kurve, in der das Schild der Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50 km/h platziert ist. Die Herabsetzung kommt also für die nachfolgenden Fahrer möglicherweise überraschend.

Eine andere Begründung für das dichte Auffahren ist die vergleichsweise kurze Verringerung der zulässigen Geschwindigkeit. In Abbildung 4.7 ist zu erkennen, dass schon nach wenigen Metern die Geschwindigkeit wieder auf 70 km/h hochgesetzt wird. Gestützt wird die Vermutung durch den ermittelten Verlauf, der auf dieser Strecke gefahrenen mittleren Geschwindigkeit (s. Abbildung 4.7). Die Fahrer verringerten vor der Begrenzung auf

50 km/h nur geringfügig die Geschwindigkeit und peilten vielmehr die darauffolgende Begrenzung auf 70 km/h an.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass auch bei den Strategien des verminderten Hochbeschleunigens der zeitliche Abstand verringert wird. Insbesondere im ersten Teil des Beschleunigungsabschnittes fahren die nachfolgenden Fahrer sehr dicht auf, wenn wie bei der Strategie SN die Beschleunigung zunächst ausbleibt und erst verspätet stattfindet. Die nur kurze Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit scheint dazu zu führen, dass die nachfolgenden Fahrer die Verzögerung des Ego-Fahrzeugs nicht erwarten und den zeitlichen Abstand wieder deutlich verringern. Dadurch ist bei der minimalen TTC dagegen ein umgekehrter Effekt zu erkennen. Bei Anwendung der Strategien des verringerten Hochbeschleunigens ist die TTC bei der Referenzstrategie signifikant niedriger als bei den energieeffizienten Strategien. Durch die Bremsung im Vergleich zur Verzögerung im Schub haben hier die nachfolgenden Fahrer weniger Zeit, um zu reagieren und erzielen folglich eine geringere minimale TTC.

Vergleich vor und während der Beschleunigung Wie bei den Strategien zur energieeffizienten Verzögerung soll auch hier der Frage nachgegangen werden, ob zwischen dem Abstandsverhalten im Konstantfahrt- und Beschleunigungsabschnitt ein Zusammenhang besteht. Dazu werden wieder die Mediane der Zeitlücken für den KA und BA in einem Streudiagramm aufgetragen (s. Abbildung 4.13).

Bei der Referenzstrategie (HB80) liegt ein großer Teil der Datenpunkte oberhalb der gestrichelten Linie, die gleiche Zeitlücken in KA und BA kennzeichnet. Der Spearmans Rangkorrelationskoeffizient ρ hat einen Wert von 0,44 und ist größer Null zu einem Niveau von $\alpha = 0,01$. Die entsprechende Ausgleichsgerade hat eine Steigung von 0,38 und einen Offset von 1,1 s. Wird die Strategie HB70 angewendet, liegen die Datenpunkte überwiegend unterhalb der Äquivalenzlinie. Der Zeitlückenmedian im KA und BA korrelieren auch hier mit $\rho = 0,55$ zu einem Niveau von $\alpha = 0,01$ größer Null.

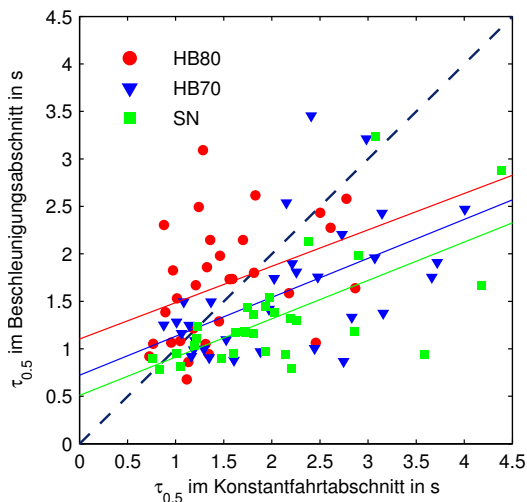


Bild 4.13: Abhängigkeit der Zeitlückenmediane zwischen Konstantfahrtabschnitt (KA) und Beschleunigungsabschnitt (BA) mit zugehöriger Ausgleichsgerade in gleicher Farbe auf der Strecke zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen. Die blaue gestrichelte Linie zeigt die Schwelle, bei der der Zeitlückenmedian im KA und VA übereinstimmen.

Im Vergleich zur Referenzstrategie sinkt der Offset der Ausgleichsgeraden auf 0,72 s.

Die Anwendung der Strategie SN führt dazu, dass fast alle Datenpunkte unterhalb der Linie gleicher Zeitlücken liegen. Der zugehörige Rangkorrelationskoeffizient hat einen Wert von $\rho = 0,6$ und ist zum Niveau $\alpha = 0,01$ größer Null. Der Offset der Ausgleichsgeraden verringert sich mit 0,51 s auf den niedrigsten Wert.

Insgesamt ist auch hier ein positiver Zusammenhang zwischen KA und BA zu beobachten. Ein Fahrer, der im KA mit einem größeren Abstand fährt, hält tendenziell auch im BA einen größeren Abstand. Allerdings im Gegensatz zu den Verzögerungsstrategien verlaufen hier alle zugehörigen Aus-

gleichsgeraden nahezu parallel und sind um einen Offset zueinander verschoben.

Hinsichtlich der Mediane der Maßzahlenverteilungen, die das Abstandsverhalten beschreiben, kann beobachtet werden, dass für die Referenzstrategie Hochbeschleunigen auf 80 km/h (HB80) keine signifikanten Unterschiede zwischen Konstantfahrt- und Beschleunigungsabschnitt auftreten (s. Tabelle 4.12). Die p-Werte für den Median des Zeitlückenmedians ($\tilde{\tau}_{0,5}$), der minimalen Zeitlücke ($\tilde{\tau}_{min}$) und der Expositionsanteile unterhalb von 0,9 s und 1,8 s ($\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$), liegen alle über dem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$. Aufgrund der Bremsverzögerung am Ende des Beschleunigungsabschnittes ist dagegen beim Annäherungsverhalten bzw. der minimalen TTC ($\tilde{t}_{tc,min}$) ein signifikanter Unterschied zwischen KA und BA zu erkennen.

Nachfolgende Fahrer, die mit den energieeffizienten Strategien Hochbeschleunigen auf 70 (HB70) sowie Segeln (SN) konfrontiert werden, reagieren alle im Beschleunigungsabschnitt mit einer Verringerung ihres zeitlichen Abstandes. Die Mediane der Zeitlückenmediane, der minimalen Zeitlücken und der Expositionsanteile weisen alle einen signifikanten Unterschied zum Niveau $\alpha = 0,05$ auf. In den überwiegenden Fällen unterscheiden sich die Mediane sogar zu einem Niveau von $\alpha = 0,01$.

Maßzahl	Einheit	HB80			HB70			SN		
		KA	BA	p <	KA	BA	p <	KA	BA	p <
$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,33	1,67	0,28	2,09	1,40	0,03	1,87	1,18	0,01
$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	1,08	1,01	0,07	1,43	0,77	0,01	1,44	0,86	0,01
$\tilde{q}_{\tau < 1,8s}$	[1]	1,00 ₍₁₉₎	0,62	0,21	0,18	0,72	0,02	0,45	1,00 ₍₁₈₎	0,01
$\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$	[1]	0,00 ₍₁₉₎	0,00 ₍₁₈₎	0,42	0,00 ₍₂₉₎	0,08	0,01	0,00 ₍₂₇₎	0,02	0,01
$\tilde{t}_{tc,min}$	[s]	19,72	8,05	0,01	23,42	9,83	0,01	23,70	9,09	0,01

Tabelle 4.12: Vergleich der Maßzahlen im Konstantfahrt- (KA) und Beschleunigungsabschnitt (BA) zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen. p-Wert für Vorzeichentest mit $H_0: \tilde{x}_{KA} = \tilde{x}_{BA}$. In tiefgestellten Klammern sind jeweils die Bindungen des Medians am Rand eines Definitionsbereichs aufgeführt.

4.3 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Beeinflussung der Fahrsicherheit zeigen, dass sich bei Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern verändert. Beim Einsatz von Eco-ACC, das im Wesentlichen während der Folgefahrt die Energieeffizienz optimiert, ist eine Abnahme des mittleren zeitlichen Abstandes zu beobachten. Insbesondere innerorts und bezogen auf die gesamte Fahrt reduziert sich der Median des Zeitlückenmedians signifikant um 10 % bis 20 %. Auch bei den Anteilen von Zeitlücken unterhalb von 1,8 s ist eine signifikante Erhöhung im Vergleich zur manuellen Fahrweise zu beobachten. Daneben treten auch beim Median des TTC-Medians signifikante Unterschiede auf. Jedoch sind für die sicherheitskritischen Bereiche von 0,9 s für die Zeitlücke und 5 s bei der TTC keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Dadurch lässt sich vermuten, dass das untersuchte Eco-ACC zwar zu einer Veränderung des Fahrverhaltens von nachfolgenden Fahrern führt, aber dieses nicht zu einem signifikant größeren Anteil von sicherheitskritischen Situationen führt.

Werden dagegen energieeffiziente Strategien für die Verzögerung angewendet, die sich einer größeren Vorausschau bedienen, verringert sich der mittlere zeitliche Abstand um bis zu 39 %. Zudem ist hier auch eine signifikante Veränderung bei den Maßzahlen, die sicherheitskritische Änderungen im Abstandsverhalten beschreiben, zu erkennen. Zum einen verringert sich der Median der minimalen Zeitlücke um bis zu 37 % auf unter 0,9 s. Und zum anderen erhöht sich der Median des Expositionsanteil von Zeitlücken unterhalb von 0,9 s von 0 auf bis 25 % bei der Verzögerung im Segelbetrieb. Bei den Strategien des verringerten Hochbeschleunigens ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten. Wenn auch im direkten Vergleich innerhalb des Beschleunigungsabschnittes (BA) nur selten signifikante Unterschiede auftreten, sind aber beim Vergleich des Konstantfahrt- und Beschleunigungsabschnittes (vorher/nachher) signifikante Unterschiede im zeitlichen Abstandsverhalten zu erkennen.

Hinsichtlich der TTC wird deutlich, dass in Abhängigkeit der Streckeneigenschaften eine energieeffiziente Verzögerung im Schub- oder Segelbetrieb sicherer als eine Bremsverzögerung sein kann. Wird die Verzögerung vom nachfolgenden Fahrer nicht erwartet, so bleibt bei einer schwachen Verzögerung im Schub oder Segelbetrieb mehr Zeit, um zu reagieren. Eine vergleichsweise späte und starke Bremsverzögerung führt zwar zunächst zu einer Verbesserung im Abstandsverhalten, aber gegen Ende zu einer Verschlechterung bezüglich der TTC. Auf der Strecke zwischen Bebenhausen und Tübingen treten beim Median der minimalen TTC keine signifikanten Unterschiede auf. Hier lässt sich vermuten, dass für die nachfolgenden Fahrer die Verzögerung des Ego-Fahrzeugs nachvollziehbar ist. Im Gegensatz dazu ist auf der Strecke zwischen Stuttgart-Vaihingen und Böblingen, die nur schlecht eingesehen werden kann und auf der nur kurzzeitig die zulässige Höchstgeschwindigkeit abgesenkt wird, eine signifikante Verringerung bzw. Verschlechterung der TTC bei Anwendung der Referenzstrategie im Vergleich zum Schubbetrieb zu beobachten.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Fahrversuche zeigen, dass energieeffiziente Fahrstrategien zu einer Verschlechterung der Fahrsicherheit führen. Insbesondere bei einer großen Abweichung von der üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeit wird über eine längere Dauer mit einem geringen und sicherheitskritischen zeitlichen Abstand gefahren. Daneben treten auch signifikante Unterschiede im Überholverhalten auf, die je nach Streckeneigenschaften zur Entstehung einer sicherheitskritischen Situation beitragen können.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse stellt sich die Frage, wie bei der Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien dennoch eine ausreichende Fahrsicherheit erlangt werden kann. Im nächsten Kapitel werden dazu verschiedene Lösungsansätze vorgestellt und eine Auswahl simulations-technisch untersucht.

5 Entwurf von Strategien zur Erhöhung der Fahrsicherheit

Ein Hauptziel von Fahrerassistenzsystemen ist die Erhöhung oder zumindest eine nicht negative Beeinflussung der Fahrsicherheit. Die durchgeführten Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass sich bei Fahrerassistenzsystemen zur Steigerung der Energieeffizienz in bestimmten Situationen die Fahrsicherheit durch vermehrt zu dicht auffahrende oder überholende Fahrzeuge deutlich verringert. Das folgende Kapitel beschäftigt sich daher mit der Konzeption und der Untersuchung von Strategien, die den Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Sicherheit optimieren und somit den Einsatz von Eco-Assistenzsystemen sicherer machen. Dazu werden im ersten Schritt verschiedene Lösungsansätze vorgestellt und diskutiert sowie das Konzept mit dem höchsten zu erwartenden Nutzen ausgewählt (s. Abschnitt 5.1). Für die Realisierung und spätere simulationstechnische Bewertung ist die Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens ein weiterer wichtiger Bestandteil. In Abschnitt 5.2 wird zunächst ein Überblick über verschiedene Fahrzeugfolgemodelle gegeben und für die weiteren Untersuchungen anhand von Bewertungskriterien ein passender Ansatz ausgewählt. Thema des Abschnittes 5.3 ist die Entwicklung von Algorithmen, die das Verhalten des ausgewählten Konzeptes zur Erhöhung der Fahrsicherheit von nachfolgenden Fahrern umsetzen. Mithilfe einer simulationstechnischen Untersuchung wird ein ausgewählter Algorithmus unter verschiedenen Bedingungen getestet (s. Abschnitt 5.4). Abschließend werden die neuen Erkenntnisse dieses Kapitels zusammengefasst (s. Abschnitt 5.5).

5.1 Lösungsansätze und deren Auswahl

Zur Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Energieeffizienz und Sicherheit werden im folgenden Abschnitt verschiedene Ansätze vorgeschlagen und erläutert [124]. Basierend auf den Vor- und Nachteilen wird ein Lösungsansatz ausgewählt, der im weiteren Verlauf der Arbeit tiefergehend untersucht wird.

5.1.1 Information

Ein möglicher Ansatz um die Beeinträchtigung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Fahrzeuge zu verringern, ist das Konzept der Information. Bei der Anwendung von energieeffizienten Fahrstrategien kann davon ausgegangen werden, dass nachfolgende Fahrer dichter auffahren, da sie die veränderte Fahrweise erst später bemerken oder nicht nachvollziehen können.

Um diese Informationslücke zu schließen, ist es daher sinnvoll, die nachfolgenden Verkehrsteilnehmer über die veränderte Fahrweise zu informieren. Die Information kann dabei entweder dauerhaft oder situativ erfolgen. Bei der dauerhaften Information wird zum Beispiel am Heck des Ego-Fahrzeugs ein Hinweisschild angebracht. Das Hinweisschild trägt dann die Information, dass es sich um ein Fahrzeug handelt, welches Eco-Fahrstrategien anwendet. Daneben kann das zu erwartende Fahrverhalten auch über Beschreibungen wie „Frühe und langsame Verzögerung“ genauer spezifiziert werden. Durch eine genauere Beschreibung werden auch Verkehrsteilnehmer sensibilisiert, die keine Vorstellung über die Bedeutung des Begriffes „Eco-Fahrstrategien“ haben. Jedoch deuten die Ergebnisse einer Studie aus Japan (s. Abschnitt 2.4) drauf hin, dass ein dauerhaft angebrachtes Hinweisschild eher zu einem entgegengesetzten Verhalten führt und die nachfolgenden Fahrer dadurch häufiger das Ego-Fahrzeug überholen.

Im Gegensatz zum dauerhaften Hinweis erhält bei der situativen Information der nachfolgende Fahrer nur einen Hinweis, wenn es die aktuelle Situa-

tion oder Fahrstrategie erfordert. Beim dauerhaft angebrachten Schild besteht die Möglichkeit, dass der nachfolgende Verkehrsteilnehmer nach einer gewissen Zeit den Hinweis nicht mehr für wichtig erhält und genauso un aufmerksam ist wie ohne Hinweisschild. Aus diesem Grund erscheint die situative Information zielführender zu sein. Ein typisches Beispiel für die situative Information von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern ist die Aktivierung des Bremslichtes bei einer Verzögerung. Schon in der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von Konzepten vorgeschlagen, um das herkömmliche Bremslicht zu verbessern und zu erweitern [173]. Dazu gehört beispielsweise die Helligkeit des Bremslichtes in Abhängigkeit der Intensität der Verzögerung einzustellen. Im Falle einer Verzögerung im Segel- oder Schubbetrieb würde das Bremslicht dann nur mit einer reduzierten Helligkeit aufleuchten. Daneben besteht natürlich auch die Möglichkeit, noch weitere Hinweislampen anzubringen. Jedoch ist davon auszugehen, dass es dadurch zu Fehlinterpretationen oder Verwechslungen kommen könnte. Daher erscheint es sinnvoller, Leuchtschriftzeichen zu verwenden, die den Fahrer nicht nur warnen, sondern auch mit Textinformation über die Ausprägung und den Grund für die energieeffiziente Fahrweise informieren. Am Beispiel der Verzögerung könnte der Hinweis beispielsweise lauten: „50 km/h in 400 m. Ausrollen lassen“. Langfristig ist davon auszugehen, dass Neufahrzeuge mit einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikations-einrichtung (s. Abschnitt 2.2.4) ausgestattet sein werden. Hinsichtlich der Information der nachfolgenden Verkehrsteilnehmer ergeben sich dadurch weiterführende Möglichkeiten. Mit Car-to-Car wäre es möglich, Informationen über die Fahrweise des Ego-Fahrzeugs an alle in der Nähe befindlichen Fahrzeuge weiterzuleiten. Nachfolgende Fahrer könnten so über das Kombiinstrument oder die Head Unit über die Fahrweise und den Grund informiert werden. Im Gegensatz zum Informieren mit Leuchtschriftzeichen wirkt sich hier vorteilhaft aus, dass nicht nur der Fahrer direkt hinter dem Ego-Fahrzeug, sondern alle in der Kolonne befindlichen Fahrer informiert werden können.

5.1.2 Kooperation

Neben der Information von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern ist die sogenannte Kooperation ein weiterer Lösungsansatz zur Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Energieeffizienz und Fahrsicherheit. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die verschiedenen Verkehrsteilnehmer kooperieren und hinsichtlich Energieeffizienz und Sicherheit ein gemeinsames Ziel verfolgen. Bei der Verzögerung vor einer Geschwindigkeitsbegrenzung würden die nachfolgenden Fahrzeuge vom vorausfahrenden Fahrzeug die Information über die Art der Verzögerung erhalten und in gleicher Weise verzögern, ohne einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu gefährden. Gleiches gilt beispielsweise für die Konstantfahrt auf der Autobahn. Auch hier werden vom vorausfahrenden Fahrzeug relevante Daten wie die aktuelle Geschwindigkeit und Position an die nachfolgenden Fahrzeuge kommuniziert, die entsprechend ihre Geschwindigkeit einregeln. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 erläutert, kann durch die Übermittlung der aktuellen Fahrzeugdaten der Sicherheitsabstand in einer Kolonne erheblich verringert und folglich der Energiebedarf reduziert werden.

Daneben ist es auch vorstellbar, dass nicht nur die nachfolgenden Fahrzeuge ihre Fahrweise an das vorausfahrende Fahrzeug anpassen, sondern unter allen Fahrzeugen ein Kompromiss bzw. eine global optimale Fahrweise bestimmt wird. Die energieoptimale Fahrweise bzw. deren Verlauf weicht häufig aufgrund von Unterschieden im Hinblick auf Karosseriedesign, Masse und Antriebsstrang voneinander ab. Zum Beispiel kann eine Erhöhung der Masse bei gleichbleibendem Luftwiderstand dazu führen, dass die Verzögerung im Segelbetrieb flacher verläuft und folglich eine größere Strecke zurückgelegt werden kann. Führt in einer Kolonne das Fahrzeug mit dem flacheren Verzögerungsverhalten voraus, so müssen auch die nachfolgenden Fahrzeuge mit der Verzögerung beginnen, obwohl aus ihrer Sicht eine Verzögerung zu einem späteren Zeitpunkt günstiger wäre. In diesem Beispiel kann es also sinnvoll sein, dass der Startpunkt der Verzögerung des vor-

ausfahrenden Fahrzeugs an die nachfolgenden Fahrzeuge angepasst wird. Ähnliches gilt für die Konstantfahrt. Aufgrund der bereits erläuterten Unterschiede bei Fahrwiderstand und Antriebsstrang weichen die jeweiligen Geschwindigkeiten mit optimaler Energieeffizienz voneinander ab. Aus diesem Grund kann es auch hier zielführend sein, die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs an die nachfolgenden Fahrzeuge oder umgekehrt anzupassen.

Unabhängig vom angewendeten Konzept der Kooperation sind für derartige Fahrstrategien einige Grundvoraussetzungen erforderlich. Aufgrund des Austauschs von Fahrzeugdaten müssen die Fahrzeuge zwingend über eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation verfügen. Weiterhin benötigen die Fahrzeuge eine automatisierte Längsführung, damit kooperative Fahrstrategien überhaupt umgesetzt werden können. Darüber hinaus hängt der Nutzen von kooperativen Strategien entscheidend von der Ausstattungsrate ab. Ohne eine ausreichende Anzahl von Fahrzeugen, die die Grundvoraussetzungen erfüllen, können kooperative Strategien nur selten oder überhaupt nicht angewendet werden, wodurch der Nutzen praktisch gegen Null geht.

5.1.3 Adaption

Ein weiterer Lösungsansatz zur Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Energieeffizienz und Fahrsicherheit stellt die Adaption des Ego-Fahrverhaltens dar. Die Grundidee, die sich hinter diesem Lösungsansatz verbirgt, ist die Anpassung des Ego-Fahrverhaltens an die aktuelle Verkehrssituation hinter dem Ego-Fahrzeug. Das bedeutet, dass eine energieeffiziente Fahrweise, die zu einer großen Abweichung von der üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeit führt, nur angewendet wird, wenn es die aktuelle Verkehrssituation erlaubt [122, 124]. Durch diese Adaption des Ego-Fahrverhaltens sollen nachfolgende Verkehrsteilnehmer so wenig wie möglich beeinträchtigt werden und somit nicht zu einem sicherheitskritischen Fahrverhalten verleitet werden. Die Anpassung des Fahrverhaltens bzw. die Intensität des

energieeffizienten Fahrens kann dabei an verschiedene Kriterien geknüpft werden. Zum Beispiel kann im einfachen Fall die Anwendung einer energieeffizienten Fahrstrategie nur davon abhängig gemacht werden, ob ein nachfolgendes Fahrzeug vorhanden ist oder nicht. Im komplexeren Fall wird dagegen die Intensität der Fahrstrategie in Abhängigkeit des Fahrverhaltens von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern angepasst. Abbildung 5.1 zeigt exemplarisch für einige Situationen, wie eine Anpassung des Fahrverhaltens aussehen kann. Für das Beispiel (a) Verzögerung vor einer Geschwindigkeitsbegrenzung wird in Abhängigkeit des Abstandes und der Relativgeschwindigkeit (1 bis 3) der Zeitpunkt verschoben, ab dem das Ego-Fahrzeug im Schub- oder Segelbetrieb verzögert.

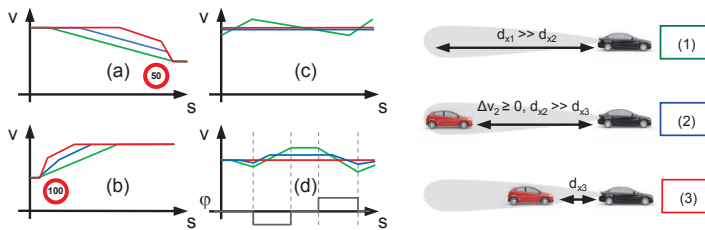


Bild 5.1: Adaption verschiedener Fahrstrategien (a bis d) bei jeweils unterschiedlichen Verkehrssituationen hinter dem Ego-Fahrzeug (1 bis 3). Nachdruck mit Genehmigung von Springer Nature: [124] © 2013

Im Fall 1 ist kein Fahrzeug vorhanden oder es ist außerhalb der Sensorreichweite. Deshalb kann hier die Verzögerung mit maximaler Energieeffizienz gewählt werden. Bei Fall 2 wird zwar ein nachfolgendes Fahrzeug detektiert, jedoch hat es einen vergleichsweise großen Abstand und die Relativgeschwindigkeit ist positiv bzw. das Fahrzeug nähert sich nicht weiter an. In diesem Fall wird der Beginn der Verzögerung ein Stück weiter Richtung Tempolimit verlagert, damit das nachfolgende Fahrzeug während der Verzögerung einen ausreichenden Abstand behält und sich nicht direkt annähert. Im Fall 3 hat das nachfolgende Fahrzeug nur noch einen geringen

Abstand. Aus diesem Grund wird hier die Verzögerung im Segelbetrieb erheblich verkürzt, um die nachfolgenden Fahrer so wenig wie möglich zu beeinträchtigen.

Beispiel (b) betrifft die Beschleunigung aufgrund einer Anhebung der Geschwindigkeitsbegrenzung. Auch hier wird in Abhängigkeit des Abstandes und der Relativgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs die Intensität der Beschleunigung gewählt (1-3). Jedoch werden in dieser Situation abhängig von den Randbedingungen die Geschwindigkeitsverläufe zwischen einer zügigen bzw. akzeptablen Beschleunigung und einer energieeffizienten Beschleunigung nicht weit auseinander liegen (s. Abschnitt 2.1). Eine weitere Möglichkeit, die Beschleunigung zu adaptieren, ist die verzögerte Beschleunigung (s. Abschnitt 2.1) oder das Hochbeschleunigen auf eine geringere Geschwindigkeit, wenn zum Beispiel aufgrund einer nahen Kurve die Geschwindigkeit schon nach kurzer Zeit wieder verringert werden muss (s. Abschnitt 4.2).

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, existieren auch für die Konstantfahrt verschiedene Möglichkeiten, um eine Erhöhung der Energieeffizienz herbeizuführen. Abhängig von der Verkehrssituation (1-3) hinter dem Ego-Fahrzeug wird in Beispiel (c) die Sägezahnfahrweise angewendet. Beispiel (d) zeigt wie die Informationen über nachfolgende Fahrzeuge für die Anpassung der Fahrstrategie, die auf einer Ausnutzung der topografischen Verhältnisse basiert, eingesetzt werden können.

Für die Adaption der Fahrstrategie ist keine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikationseinrichtung erforderlich. Die Detektierung von nachfolgenden Fahrzeugen sowie die Messung von Abstand und Relativgeschwindigkeit kann mithilfe eines geeigneten Sensors, der am Heck des Ego-Fahrzeugs angebracht ist, erfolgen. Das hat den Vorteil, dass die Funktion nicht wie bei der Kooperation von der Ausstattungsrate anderer Fahrzeuge abhängig ist.

5.1.4 Auswahl des Lösungsansatzes

Der Erfolg des Lösungsansatzes der Information hängt maßgeblich von der Akzeptanz von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern ab. Bisherige Untersuchungen deuten darauf hin, dass eine statische Information vermutlich zu einer Verschlechterung der Fahrsicherheit aufgrund vermehrter Überholmanöver führen kann. Untersuchungen zur situativen Information von nachfolgenden Fahrern sind bisher nicht bekannt. Es ist also unklar, ob eine situative Information von den nachfolgenden Verkehrsteilnehmern angenommen wird und somit zu einer Verbesserung der Fahrsicherheit führt. Im Gegensatz zum kooperativen Ansatz wird bei diesem Lösungsansatz keine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation benötigt. Des Weiteren ist nicht zwingend eine automatisierte Längsführung erforderlich. Das Konzept der Information eignet sich folglich auch für Eco-Fahrerassistenzsysteme, die den Ego-Fahrer nur durch Hinweise unterstützen.

Der Lösungsansatz der Kooperation verspricht hinsichtlich der Erhöhung der Fahrsicherheit bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Energieeffizienz den höchsten Nutzen. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades der Längsführung ist bei diesem Konzept eine hohe Fahrsicherheit faktisch systemimmanent. Größter Nachteil jedoch ist, dass für diesen Lösungsansatz eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation und eine automatisierte Längsführung vorausgesetzt wird, die zudem beide auch einen hohen Verbreitungsgrad aufweisen müssen. Auf lange Sicht ist die Kooperation sicher der favorisierte Lösungsansatz, wenn Fahrzeuge über derartige Systeme in einer ausreichenden Anzahl verfügen. Fraglich ist bei diesem Ansatz jedoch, ob eine ausreichende Anzahl von Verkehrsteilnehmern die automatisierte Längsführung überhaupt einsetzen möchte oder vorzugsweise selbst diese Aufgabe übernehmen möchte.

Im Gegensatz zum Konzept der Kooperation wird beim Ansatz der Adaptation keine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation benötigt. Des Weiteren ist auch nicht zwingend eine automatisierte Längsführung erforderlich. Die-

ser Lösungsansatz kann auch bei hinweisgebenden Eco-Assistenzsystemen angewendet werden. Zum Beispiel wird dann im Falle eines Ausrollvorganges der Ego-Fahrer abhängig vom Abstand und der Relativgeschwindigkeit nachfolgender Fahrzeuge erst später oder überhaupt nicht informiert. Das bedeutet, dass der Käufer eines solchen Systems direkt von der höheren Fahrsicherheit profitiert, unabhängig davon, ob auch andere Fahrzeuge über ein solches System verfügen. Im Vergleich zum Ansatz der Information ist der Ego-Fahrer auch nicht auf den guten Willen bzw. die Akzeptanz der nachfolgenden Fahrer angewiesen. Mithilfe dieses Lösungsansatzes können durch die Anpassung der Fahrweise kritische Situationen vermieden werden. Des Weiteren wirkt sich dadurch positiv aus, dass der Ego-Fahrer von nachfolgenden Fahrern weniger unter Druck gesetzt wird.

Basierend auf den zuvor erläuterten Vor- und Nachteilen eines jeden Lösungsansatzes wird im Folgenden das Konzept der Adaption der Fahrstrategie weiterverfolgt. Zwar wurde auch der Lösungsansatz der Information bisher nicht tiefergehend untersucht, jedoch ist die Wirksamkeit wegen fehlender Akzeptanz anderer Verkehrsteilnehmer fraglich. Dieser Ansatz wird deshalb innerhalb dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Kooperative Fahrstrategien sind dagegen schon sehr gut erforscht und Bestandteil aktueller Forschungsprojekte (s. Abschnitt 2.3.2). Im Gegensatz dazu sind zum Lösungsansatz der Adaption von energieeffizienten Fahrstrategien in Abhängigkeit des Fahrverhaltens von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern noch keine Untersuchungen bekannt. Als weiterer großer Vorteil wird hier die Unabhängigkeit des Systems gesehen, wodurch für den Endkunden direkt und ohne einen hohen Verbreitungsgrad eine Verbesserung hinsichtlich der Fahrsicherheit erlebbar wird.

5.2 Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens

Eine wichtige Voraussetzung für die Adaption des Ego-Fahrverhaltens ist die Kenntnis darüber, wie sich der Fahrer hinter dem Ego-Fahrzeug in Zukunft ungefähr verhalten wird. Des Weiteren ist auch für die späteren simulationstechnischen Betrachtungen zur Evaluation der adaptierten Fahrstrategien im Vergleich zu Fahrstrategien ohne Adaption ein Modell erforderlich, welches das Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers abbildet. Modelle, die dieses Verhalten abbilden, sind in der Literatur unter dem Begriff Fahrzeugfolgemodelle¹ bekannt. Fahrzeugfolgemodelle gehören zum Bereich der mikroskopischen Verkehrssimulation, da sie die Interaktion zwischen einzelnen Fahrzeugen abbilden. Die überwiegende Anzahl der Fahrzeugfolgemodelle hat gemeinsam, dass sie auf Basis des Geschwindigkeits- und Abstandsverlaufes des vorausfahrenden Fahrzeugs den Geschwindigkeitsverlauf des nachfolgenden Fahrzeugs bestimmen.

Zur Beschreibung des Fahrzeugfolgeverhaltens wird dazu häufig die folgende Nomenklatur verwendet. Dabei folgt das Fahrzeug $(k+2)$ dem Fahrzeug $(k+1)$, welches wiederum dem k -ten Fahrzeug folgt (s. Abbildung 5.2).

$x_k(t)$ ist somit die zurückgelegte Strecke des k -ten Fahrzeugs. Aus der Differenz $x_k(t) - x_{k+1}(t)$ abzüglich der Fahrzeuglänge (l_k) ergibt sich der Abstand

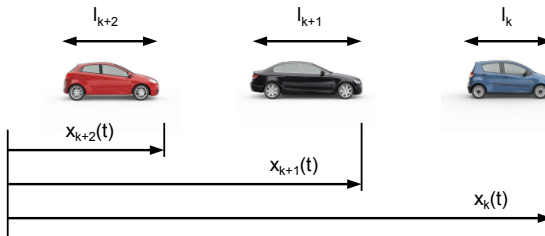


Bild 5.2: Nomenklatur zur Beschreibung des Folgeverhaltens

¹ Engl.: car-following models

zwischen den Fahrzeugen. Zu den ersten Fahrzeugfolgemodellen gehören nach [282] die Modelle von Reuschel [230] und Pipes [215], welche schon 1950 und 1953 entworfen wurden. Reuschel und Pipes gehen in ihrem Modellansatz davon aus, dass die Fahrer dem vorausfahrenden Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit folgen, die proportional zum Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen ist. Bei der Wahl des Abstandes bezieht sich Pipes auf den California Vehicle Code, der zu dieser Zeit einen Abstand von einer Fahrzeuglänge pro 10 Meilen/h Fahrzeuggeschwindigkeit vorschreibt [215]. Bei einer Fahrzeuglänge von 15 Fuß entspricht dies einer Zeitlücke von ungefähr $\tau = 1\text{ s}$. Reuschel schlägt hier den Tachometerabstand in Metern vor, der dem Wert des Tachos bzw. der Geschwindigkeit in km/h entspricht [230]. Im Fall von Reuschel liegt daher die Zeitlücke bei $\tau = 3,6\text{ s}$. Mit einem minimalen Abstand d_{Min} im Stillstand ergibt sich somit die Modellgleichung 5.1, die den zurückgelegten Weg des vorausfahrenden Fahrzeugs beschreibt.

$$x_k(t) = x_{k+1}(t) + v_{k+1}(t) \cdot \tau + d_{Min} + l_k \quad (5.1)$$

Newell verfolgt in seinem Modell den gleichen Ansatz wie Pipes und Reuschel. Jedoch verfügt das Modell zusätzlich über eine Totzeit (T), die das Reaktionsvermögen des Fahrers beschreiben soll [208].

Bis heute ist Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens ein aktives Forschungsgebiet. In der Zwischenzeit sind eine Vielzahl weiterer Fahrzeugfolgemodelle entstanden, die sich hauptsächlich in der Komplexität und in den berücksichtigten Effekten unterscheiden. In den nachfolgenden Abschnitten werden in einem kurzen Überblick die wesentlichen Modellansätze näher erläutert.

5.2.1 Stimulus-Response

Durch Differentiation und Umstellung der Modellgleichung von Pipes lässt sich die Beschleunigung $a_{k+1}(t)$ des (k+1)-Fahrzeugs berechnen (s. Gleichung 5.2).

$$a_{k+1}(t) = \frac{v_k(t) - v_{k+1}(t)}{\tau} \quad (5.2)$$

Auf dieser Art der Darstellung baut das Modell von Chandler [63] auf, welches auch als Stimulus-Response bezeichnet wird (s. Gleichung 5.3). Das heißt, der Fahrer reagiert auf eine Abweichung der Geschwindigkeit (stimulus) zwischen seinem und dem vorausfahrenden Fahrzeug mit einer positiven oder negativen Beschleunigung (response). Die Intensität der Reaktion wird dabei durch die Sensitivität² (λ) definiert, die in Gleichung 5.2 dem Kehrwert der Zeitlücke ($1/\tau$) entspricht.

$$response = sensitivity \cdot stimulus \quad (5.3)$$

$$a_{k+1}(t + T) = \lambda \cdot (v_k(t) - v_{k+1}(t)) \quad (5.4)$$

Wie das Modell von Newell verfügt auch der Ansatz von Chandler über eine Reaktionszeit T (s. Gleichung 5.4). Da es sich hier um eine konstante Sensitivität handelt, zählt das Modell von Chandler auch zu den linearen Fahrzeugfolgmodellen. Helly erweiterte das Modell von Chandler um weitere lineare Terme, die zudem den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie das Aufleuchten der Bremslichter der beiden nächsten vorausfahrenden Fahrzeuge berücksichtigen [120].

Auf Basis von Untersuchungen zur Gestaltung der Sensitivität erweiterte die Gruppe um Gazis das Modell von Chandler um ein Funktional, bei dem die Sensitivität neben der eigenen Fahrzeuggeschwindigkeit auch vom Ab-

² Engl: sensitivity

stand zum vorausfahrenden Fahrzeug abhängig ist [101]. Im Gegensatz zu den Modellen von Chandler und Helly gehört das GHR³-Modell von Gazis zur Gruppe der nichtlinearen Modelle. Daneben wurden von Gazis auch die Parameter m und l eingeführt, die in mehreren nachfolgenden Studien auf Basis von Fahrversuchen optimiert wurden (s. Gleichung 5.5). Eine Zusammenfassung mit weiterführenden Informationen zur Optimierung von m und l findet sich in [53].

$$a_{k+1}(t + T) = a \cdot \frac{v_{k+1}(t + T)^m}{[x_k(t) - x_{k+1}(t)]^l} \cdot [v_k(t) - v_{k+1}(t)] \quad (5.5)$$

Bexelius geht davon aus, dass der Fahrer des Ego-Fahrzeugs neben dem direkt vorausfahrenden Fahrzeug auch weiter vorausfahrende Fahrzeuge bei der Wahl der Beschleunigung berücksichtigt [39]. Dazu erweiterte er das lineare Modell von Chandler und das nicht lineare Modell von Gazis um $N-1$ weitere Terme (s. Gleichung 5.6)

$$a_k(t + T) = \sum_{i=1}^N \lambda \cdot (v_{k-i}(t) - v_k(t)) \quad (5.6)$$

Nachteile dieses Modellansatzes von Gazis und Bexelius sind zum einen die fehlende bzw. nur schwache Reaktion bei niedrigem Abstand und geringer Relativgeschwindigkeit. Zum anderen fehlt hier die Abbildung der freien Fahrt, wenn kein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden ist [281]. Das heißt, bei sehr großem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug beschleunigt das Fahrzeug nicht auf die gewünschte Geschwindigkeit.

Diese beiden Nachteile sind bei einem früheren Modell von Newell nicht vorhanden [207]. Im Gegensatz zu den vorherigen Modellansätzen wird hier die Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs durch eine Funktion bestimmt. Die Funktion $G(\Delta x(t))$ bildet dabei in Abhängigkeit des Abstandes die Fahrzeuggeschwindigkeit ab. Zu den Parametern gehören der Mindestabstand d_{min} im Stillstand, eine Sensitivität λ in $[1/s]$, eine Wunsch-

³ Die Abkürzung GHR steht für die Namen der Autoren

geschwindigkeit bzw. Maximalgeschwindigkeit v_0 sowie eine Reaktionszeit T (s. Gleichung 5.7).

$$v_{k+1}(t+T) = G(\Delta x(t)) = v_0 \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{\lambda}{v_0} \cdot (\Delta x - d_{min})\right)} \right) \quad (5.7)$$

Auf einen ähnlichen Ansatz basiert das Optimal Velocity Model (OVM) von Bando [24, 25]. Auch beim Optimal Velocity Model wird auf Basis des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug eine optimale Geschwindigkeit bestimmt. Jedoch wird hier durch die Bildung der Differenz zwischen optimaler Geschwindigkeit (V_{Opt}) und aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit sowie einer Sensitivität (a), die in diesem Ansatz als konstant angenommen wird, die Beschleunigung und nicht die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs gebildet (s. Gleichung 5.8).

$$a_{k+1}(t) = a \cdot [V_{Opt}(x_k(t) - x_{k+1}(t)) - v_{k+1}(t)] \quad (5.8)$$

Die Optimal Velocity Funktion muss dabei monoton ansteigend sein sowie für $\Delta x(t) \rightarrow \infty$ gegen eine maximale Geschwindigkeit v_{max} laufen. Mithilfe von Messdaten, die auf einer japanischen Autobahn aufgezeichnet wurden, ermittelte Bando eine optimale Geschwindigkeitsfunktion (s. Gleichung 5.9). In diesem Zusammenhang bestimmte Bando für die Sensitivität einen Wert von $a = 2 s^{-1}$ [28].

$$V_{Opt} = 16.8 \cdot [\tanh(0,0860 \cdot (\Delta x - 25)) + 0,913] \quad (5.9)$$

Vorteilhaft ist nach Bando auch, dass das Optimal Velocity Model im Vergleich zu den anderen Ansätzen ohne Verzögerungs- bzw. Reaktionszeit auskommt, da sie durch die Optimal Velocity Funktion bereits nachgebildet wird [26, 27]. Nachteile der Modelle von Newell und Bando sind in erster Linie die unrealistischen Beschleunigungen sowie Verzögerungen. Außerdem reagiert das Optimal Velocity Model auf geringfügige Parameterän-

derungen nicht genügend robust. Treiber führt die Nachteile auf die in der Modellgleichung nicht berücksichtigte Relativgeschwindigkeit zurück.

In der Vergangenheit haben sich daher einige Arbeiten mit der Verbesserung des OVM beschäftigt. Dazu gehört die Herleitung und Untersuchung anderer Optimal Velocity Funktionen. Ein guter Überblick zu diesem Thema findet sich beispielsweise in [33]. Andere Arbeiten versuchen durch Modellerweiterungen die Defizite zu beheben. Jiang schlägt zum Beispiel vor, das OVM durch einen zweiten Term ($\gamma \cdot \Delta v$), der die Relativgeschwindigkeit beinhaltet, zu ergänzen. Dieser Ansatz ist auch unter dem Namen „Full velocity difference model“ bekannt [132]. Daneben beschäftigen sich noch weitere Arbeiten mit der Optimierung und Erweiterung des Optimal Velocity Model [117, 133, 285].

Das Intelligent Driver Model (IDM) von Treiber [280, 281] ist auch ein Modell, das zur Klasse Stimulus-Response gehört [300]. Im Gegensatz zum Optimal Velocity Model führt das IDM zu realistischen Beschleunigungswerten und zu einem plausiblen Beschleunigungsverhalten. Zudem ist das Intelligent Driver Model unfallfrei und die Modellparameter haben eine physikalische Bedeutung sowie beschreiben möglichst immer nur einen Aspekt des Fahrverhaltens [281, 284]. Die Modellgleichung 5.10 des IDM besteht im Wesentlichen aus zwei Termen. Mithilfe des ersten Terms wird das Beschleunigungsverhalten $a_{k+1}(t)$ bei freier Fahrt beschrieben ($d_{k+1}(t) \rightarrow \infty$). Dabei wird solange beschleunigt oder verzögert bis die Wunschgeschwindigkeit (v_0) erreicht ist. Eine Erhöhung des Exponenten δ führt dazu, dass die Beschleunigung erst später reduziert wird. Der zweite Term beschreibt dagegen das Fahrverhalten während der Folgefahrt. In diesem Fall wird das Beschleunigungsverhalten durch den Wunschabstand $d^*(t)$ und Istabstand $d_{k+1}(t)$ bestimmt. Insgesamt ist die Intensität der Beschleunigung durch den Parameter a definiert.

$$a_{k+1}(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_{k+1}(t)}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{d^*(t)}{d_{k+1}(t)} \right)^2 \right] \quad (5.10)$$

$$\text{mit } d_{k+1}(t) = x_k(t) - x_{k+1}(t) - l_k$$

Bei stationärer Folgefahrt bzw. geringer Relativgeschwindigkeit $\Delta v_{k+1}(t)$ berechnet sich der Wunschabstand aus dem Mindestabstand (d_{min}) im Stillstand und der gewünschten Zeitlücke τ (s. Gleichung 5.11). Im Falle einer Annäherung mit hoher Relativgeschwindigkeit bewirkt der Term der intelligenten Bremsstrategie ($v_{k+1}(t) \cdot \Delta v_{k+1}(t) / 2\sqrt{a \cdot b}$) eine verstärkte Verzögerung. Die Bremsstrategie ist dabei so ausgelegt, dass im Normalfall die komfortable Verzögerung nicht überschritten wird.

$$d^*(t) = d_{min} + v_{k+1}(t) \cdot \tau + \frac{v_{k+1}(t) \cdot \Delta v_{k+1}(t)}{2\sqrt{a \cdot b}} \quad (5.11)$$

$$\text{mit } \Delta v_{k+1}(t) = v_{k+1}(t) - v_k(t)$$

Liegt die aktuelle Geschwindigkeit oberhalb der Wunschgeschwindigkeit, wie zum Beispiel bei einer Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, führt das IDM zu einem unrealistischen Verzögerungsverhalten. Des Weiteren wird die Wunschgeschwindigkeit nur bei sehr großen Abständen zum vorausfahrenden Fahrzeug erreicht ($d_{k+1}(t) \rightarrow \infty$). Treiber ergänzt daher das IDM um eine verbesserte Beschleunigungsfunktion [284]. Liegt die Geschwindigkeit oberhalb der Wunschgeschwindigkeit v_0 , wird die Verzögerung auf $-b$ begrenzt (s. Gleichung 5.12).

$$a_{free}(v_{k+1}) = \begin{cases} a \left[1 - \left(\frac{v_{k+1}(t)}{v_0} \right)^\delta \right] & \text{für } v_{k+1}(t) \leq v_0 \\ -b \left[1 - \left(\frac{v_0}{v_{k+1}(t)} \right)^{a\delta/b} \right] & \text{für } v_{k+1}(t) > v_0 \end{cases} \quad (5.12)$$

Damit der Wunschabstand $d^*(t)$ bei $v_{k+1}(t) \leq v_0$ erreicht wird, unterscheidet Treiber in seinem verbesserten Modell außerdem nach dem Verhältnis von Wunsch- zu Istabstand $z = d^*(t)/d_{k+1}(t)$ (s. Gleichung 5.13 und 5.14).

$$a_{k+1}(t)|_{v_{k+1} \leq v_0} = \begin{cases} a(1-z^2) & \text{für } z \geq 1 \\ a_{free} \left(1 - z^{(2a)/a_{free}}\right) & \text{für } z < 1 \end{cases} \quad (5.13)$$

$$a_{k+1}(t)|_{v_{k+1} > v_0} = \begin{cases} a_{free} + a(1-z^2) & \text{für } z \geq 1 \\ a_{free} & \text{für } z < 1 \end{cases} \quad (5.14)$$

Das verbesserte IDM hat die gleiche Anzahl von Parametern wie das Standard-IDM. Auch das Verhalten beider Modelle unterscheidet sich nur, wenn die aktuelle Geschwindigkeit größer als die Wunschgeschwindigkeit ist oder dem vorausfahrenden Fahrzeug nahe der Wunschgeschwindigkeit gefolgt wird [284].

5.2.2 Safety-Distance

Bei der Klasse der Safety-Distance-Modelle wird davon ausgegangen, dass der Fahrer immer einen ausreichenden Sicherheitsabstand hält, um auf unvorhersehbare Verzögerungen des vorausfahrenden Fahrzeugs reagieren zu können. Dieser Ansatz lässt sich nach Wageningen-Kessels [300] auf die Modelle von Pipes [215] sowie Kometani und Sasaki zurückführen. Das Modell von Gipps ist ein wichtiger Vertreter dieser Klasse. Auch Gipps setzte sich zum Ziel, ein Modell zu entwickeln, bei dem die Parameter über eine physikalische Bedeutung verfügen und das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten realistisch abgebildet wird [104].

Das Modell von Gipps besteht aus zwei Gleichungen, von denen das Minimum gebildet wird (s. Gleichung 5.15). Die erste Gleichung der Min-Funktion beschreibt das Fahrverhalten bei freier Fahrt oder großem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Der Parameter V_{k+1} definiert dabei

die gewünschte Geschwindigkeit und a_{k+1} die maximale Beschleunigung des Fahrers.

$$v_{k+1}(t+T) = \min \left\{ v_{k+1}(t) + 2.5a_{k+1}T \left(1 - \frac{v_{k+1}(t)}{V_{k+1}} \right) \sqrt{0.025 + \frac{v_{k+1}(t)}{V_{k+1}}}, \right. \\ \left. b_{k+1}T + \sqrt{b_{k+1}^2 T^2 - b_{k+1} \left(2[x_k(t) - l_k - x_{k+1}(t)] - v_{k+1}(t)T - \frac{v_k(t)^2}{\hat{b}} \right)} \right\} \quad (5.15)$$

Mithilfe des zweiten Terms wird dagegen die Geschwindigkeit während der Folgefahrt bestimmt. Zu den Parametern gehört hier die maximale Verzögerung b_{k+1} , die der Fahrer bereit ist anzuwenden. Des Weiteren geht Gipps in seinem Modell davon aus, dass der Fahrer die maximale Verzögerung \hat{b} des vorausfahrenden Fahrers abschätzen kann. Außerdem berücksichtigt Gipps mit T die Reaktionszeit des Fahrers.

Im Vergleich zu anderen Modellen wirkt sich beim Gipps-Modell vorteilhaft auf die Rechenzeit aus, dass keine Differenzialgleichung gelöst werden muss. Das Gipps-Modell berechnet direkt die Geschwindigkeit des nächsten Zeitschrittes. Dafür wird die Schrittweite für die Berechnung der nächsten Geschwindigkeit mit der Reaktionszeit gleichgesetzt. Ein ähnliches Modell wurde von Krauß entworfen, das wie das Modell von Gipps auf dem Safety-Distance Ansatz basiert [165].

5.2.3 Action-Point

Im Vergleich zu den bisher vorgestellten Stimulus-Response- und Safety-Distance-Modellen gehen Action-Point-Modelle (AP) davon aus, dass der Fahrer nicht auf geringe Änderungen der Relativgeschwindigkeit oder des Abstandes reagiert. Erst wenn die Änderung oberhalb einer gewissen Wahrnehmungsschwelle liegt, reagiert der Fahrer mit einer Beschleunigung bzw.

Verzögerung. Diese Modellklasse wird im Deutschen auch als Psychophysisch bezeichnet. Zu den ersten Modellen, die auf dem Action-Point-Ansatz beruhen, gehört das Modell von Wiedemann [314]. Ein weiterer Vertreter ist das Modell von Fritsche [97]. Mit diesem Ansatz lassen sich Aspekte des menschlichen Fahrverhaltens nachbilden. Dazu gehört beispielsweise das typische Schwingen von Relativgeschwindigkeit und Abstand während der Annäherung bzw. Folgefahrt [73]. Jedoch muss für vier Fahrzustände jeweils eine Beschleunigungsfunktion gebildet werden, die von Geschwindigkeit, Abstand und Relativgeschwindigkeit abhängt [286]. Folglich ist die Kalibrierung des Wiedemann-Modells mit einem hohen Aufwand verbunden. Daneben ist im Vergleich zu den bereits vorgestellten Fahrzeugfolgemodellen auch der Berechnungsaufwand vergleichsweise hoch [68].

5.2.4 Fuzzy-Logic

Ein noch vergleichsweise neuer Ansatz zur Modellierung des Folgeverhaltens ist die Fuzzy-Logik⁴. Die Theorie der Fuzzy-Logik geht auf Zadeh [328] zurück und wurde von Kikuchi 1992 [151] erstmals zur Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens eingesetzt. Im Laufe der Jahre beschäftigen sich noch weitere Arbeiten mit dieser Thematik [61, 149, 193, 228, 322]. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen erlaubt die Fuzzy-Logik die Beschreibung des Fahrverhaltens mithilfe von Expertenwissen. Fuzzy-Logik wird häufig bei komplexen und nicht-linearen Systemen eingesetzt, die sich sonst gar nicht oder nur mit großem Aufwand mathematisch beschreiben lassen. Im Gegensatz zur klassischen Mengenlehre basiert die Fuzzy-Logik auf der Theorie der unscharfen Mengen und erlaubt eine nur anteilige Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Menge. Im Fall der Modellierung des Folgeverhaltens wird zum Beispiel der Abstand in die drei Mengen großer, mittlerer und kleiner Abstände aufgeteilt (s. Abbildung 5.3).

⁴ „Unschärfe“-Logik

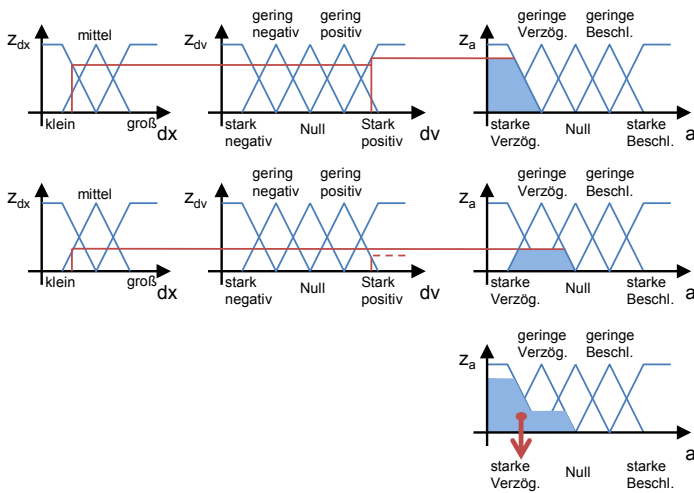


Bild 5.3: Beispiel eines Fahrzeugfolgemedells auf Basis der Fuzzy-Logik mit Abstand (d_x) und Relativgeschwindigkeit (Δv) als Eingang sowie Wunschbeschleunigung (a) als Ausgang

Über sogenannte Zugehörigkeitsfunktionen erfolgt die Definition der Zugehörigkeit des Abstandes zur jeweiligen Menge. Ein Abstand von 15 m gehört dann zum Beispiel zu 70 % zur Menge kleiner Abstand, 30 % zur Menge mittlerer Abstand und 0 % zur Menge großer Abstand. Dieser Schritt wird auch als Fuzzifizierung bezeichnet. Im nächsten Schritt wird durch eine sogenannte Regelbasis in Form von Wenn-Dann-Beziehungen das Ausgangsverhalten beschrieben. Für das Beispiel Fahrermodell könnte eine Regel zum Beispiel lauten: „Wenn der Abstand klein ist und die Relativgeschwindigkeit hoch, verzögere stark“.

Bei diesem Beispiel wird die Zugehörigkeit des Abstandes zur Menge „klein“ und die Zugehörigkeit der Relativgeschwindigkeit zur Menge „hoch“ bestimmt. Aufgrund der logischen Und-Verknüpfung wird das Minimum beider Zugehörigkeiten der Menge „starke Verzögerung“ zugewiesen. Existieren daneben noch weitere Regeln, werden die Zugehörigkeiten akkumu-

liert bzw. das Maximum gebildet. Nach der Akkumulation erfolgt im nächsten Schritt die Defuzzifizierung. Durch diesen Schritt wird aus den unscharfen Mengenzugehörigkeiten wieder ein scharfer Ausgangswert bestimmt. Zur Defuzzifizierung kommt häufig die Flächenschwerpunktmethodemethode zum Einsatz.

Modelle auf Basis der Fuzzy-Logik können das Fahrzeugfolgeverhalten vergleichsweise gut abbilden [111]. Jedoch haben sie den großen Nachteil, dass die Kalibrierung im Vergleich zu den bisher vorgestellten Ansätzen mit einem hohen Aufwand verbunden ist [62, 111, 148]. Chakroborty (2003) und Harding (2007) nutzen daher ein neuronales Netz, um die Kalibrierung der Parameter des Fuzzy-Logik-Modells zu automatisieren [62, 111]. In [148] wird dagegen nur auf Basis eines neuronalen Netzes das Fahrzeugfolgeverhalten modelliert. Daneben existieren eine Reihe weiterer Arbeiten, die zur Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens die Fuzzy-Logik und neuronale Netze miteinander verknüpfen. Ein guter Überblick findet sich in [147].

5.2.5 Cellular Automata

Eine Besonderheit im Bereich der Fahrzeugfolgemodelle stellen die sogenannten Zellularautomaten⁵ dar. Bei dieser Art von Modellen wird neben der Zeit auch der Ort und die Geschwindigkeit diskretisiert. Eine Zelle hat dabei meist eine Länge von 7,5 m und ist entweder frei oder mit einem Fahrzeug belegt. Der Speicherbedarf für eine Zelle beträgt somit genau 1 Bit. Zu den ersten Fahrzeugfolgmodellen auf Basis von Zellularautomaten gehören die Modelle von Cremer, Schütt und Nagel [67, 251, 203]. Aufgrund der Diskretisierung und des unrealistischen Verhaltens bei der Annäherung an langsame Fahrzeuge sind Zellularautomaten nicht zur genauen Modellierung des Folgeverhaltens von einzelnen Fahrzeugen geeignet. Die Vorteile dieses Ansatzes liegen dagegen im geringen Berechnungs- und Speicheraufwand. Fahrzeugfolgmodelle auf Basis von Zellularautomaten eig-

⁵ Engl.: cellular automata

nen sich daher für die Simulation großer Netze. Beispielsweise werden sie in Nordrhein-Westfalen zur Vorhersage der Verkehrsdichte auf Autobahnen eingesetzt [283].

5.2.6 Zusammenfassung und Auswahl

Der Überblick der vorherigen Abschnitte zeigt, dass eine große Anzahl von verschiedenen Fahrzeugfolgmodellen existiert. Das Spektrum reicht von sehr einfachen Modellen bis hin zu komplexen Modellen, die auch Aspekte des menschlichen Fahrverhaltens abbilden. Die Stimulus-Response-Modelle von Gazis (GHR), Newell und Bando (OVM) gehören dabei zu den einfachen Modellansätzen. Sie zeichnen sich durch eine niedrige Rechenzeit und geringen Aufwand bei der Kalibrierung aus. Ein großer Nachteil besteht im teilweise nicht realistischen Beschleunigungsverhalten (s. Tabelle 5.1). Auch haben die Parameter zum Teil keine physikalische Bedeutung und müssen daher mithilfe von Messreihen bestimmt werden.

Mit Action-Point- und Fuzzy-Logik-Modellen lässt sich dagegen das Fahrverhalten sehr gut nachbilden. Allerdings ist der Aufwand für die Kalibrierung und Berechnung meist sehr groß. Modelle, die auf dem Ansatz Cellular Automata basieren, haben den Vorteil, dass nur ein geringer Berech-

Kategorie	Stimulus-Response				SD	AP	Fuzzy CA	
	GHR	NW	OVM	IDM	Gipps			
Realistische Beschleunigung	-	-	-	+	+	+	+	-
Abbildung freie Fahrt	+	+	+	+	+	+	+	+
Abbildung Folgefahrt	-	+	+	+	+	+	+	+
Menschliches Fahrverhalten	-	-	-	-	-	+	-	-
Parameter m. physik. Bedeutung	-	+	-	+	+	+	+	+
Rechenzeit	+	+	+	+	+	-	-	+
Aufwand bei Kalibrierung	+	+	+	+	+	-	-	+

Tabelle 5.1: Bewertung der verschiedenen Fahrzeugfolgmodelle. Mit Newell (NW), Safety Distance (SD), Action-Point (AP) und Cellular Automata (CA).

nungsaufwand erforderlich ist und sich somit große Netze simulieren lassen. Für die Modellierung einzelner Fahrzeugfolgevorgänge sind sie aber aufgrund der Diskretisierung von Geschwindigkeit und Weg sowie dem folglich nicht realistischen Beschleunigungsverhalten nicht geeignet. Ein guter Kompromiss stellen die Modelle von Gipps und Treiber (IDM) dar. Sie verfügen über ein realistisches Beschleunigungsverhalten und verursachen einen vergleichsweise geringen Aufwand bei der Kalibrierung und Berechnung. Auch die Modellparameter haben eine physikalische Bedeutung und können somit auch ohne aufwendige Messfahrten sinnvoll parametrisiert werden. Im Vergleich zum Modell von Gipps kann beim IDM direkt das Abstandsverhalten bzw. die Wunschzeitlücke parametrisiert werden. Dadurch lassen sich verschiedene Fahrertypen, wie beispielsweise vorausschauend oder aggressiv, einfach nachbilden. Für die weiteren Untersuchungen wird deshalb das IDM mit den von Treiber vorgeschlagenen Verbesserungen eingesetzt (s. Gleichung 5.12 bis 5.14).

5.3 Algorithmen zur Adaption von energieeffizienten Fahrstrategien

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Algorithmen vorgestellt, die eine Adaption der Ego-Fahrweise an das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern ermöglichen. Der erste Teil beschäftigt sich mit einem regelbasierten Ansatz. Bei diesem Konzept wird mit einem Satz von Regeln definiert, unter welchen Gegebenheiten eine energieeffiziente Fahrstrategie angewendet werden darf und wann darauf verzichtet werden sollte. Der zweite Teil zeigt mithilfe eines Optimierungsansatzes, wie die Fahrweise an die Situation hinter dem Ego-Fahrzeug angepasst werden kann.

5.3.1 Regelbasiert

Wie bereits erwähnt, wird beim regelbasierten Ansatz mit Regeln definiert, wann eine energieeffiziente Fahrweise anzuwenden oder zu unterbinden ist. Eine einfache Regel, die nur die momentane Situation berücksichtigt, könnte beispielsweise lauten: „Wenn ein nachfolgendes Fahrzeug vom Sensor detektiert wird, wende keine energieeffiziente Fahrweise an“. Abhängig von der Sensorreichweite ist diese Regel sehr restriktiv, da davon auszugehen ist, dass auf einer Strecke mit hoher Verkehrsdichte häufig ein nachfolgendes Fahrzeug erfasst wird. Bei einer hohen Sensorreichweite würde es daher vermutlich nur selten zu einem sicherheitskritischen Abstandsverhalten von nachfolgenden Fahrern aufgrund einer energieeffizienten Fahrweise kommen.

Auf der anderen Seite wird durch die starke Eingrenzung nur selten eine energieeffiziente Fahrweise zugelassen und der Energiebedarf nur geringfügig reduziert. Daher empfiehlt es sich, die Regel dahingehend zu erweitern, dass auch der Abstand und die Relativgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs in die Entscheidung mit einbezogen werden (s. Tabelle 5.2).

Wegen der alleinigen Anwesenheit eines nachfolgenden Fahrzeugs muss nicht unbedingt die energieeffiziente Fahrweise unterdrückt werden. Bei-

	Parameter	Symbol	Beispiel
Momentane Betrachtung	Abstand	d_x	„Fahre energieeffizient, wenn
	Relativgeschwindigkeit	Δv	$d_x > 50m$ und
	Zeitlücke TTC	τ t_{tc}	$\Delta v < 3m/s$ “
Vorausschauende Betrachtung	Median der Zeitlücke	$\tau_{0,5}$	„Fahre energieeffizient, wenn
	Expositionsanteil mit $\tau < 0,9s$	$q_{\tau < 0,9s}$	$\Delta t_{Wunsch} > 1.8s$ “
	Differenz zur gewünschten Fahrzeit	Δt_{Wunsch}	

Tabelle 5.2: Bewertungsgrößen zur regelbasierten Adaption von energieeffizienten Fahrstrategien

spielsweise kann bei einem Fahrzeug, das deutlich langsamer als das Ego-Fahrzeug fährt, durchaus die Eco-Strategie durchgeführt werden. Ähnliches gilt für den Fall, bei dem das nachfolgende Fahrzeug einen großen Abstand bei einer vergleichbaren Absolutgeschwindigkeit hat. In Abhängigkeit der Abweichung des Eco-Geschwindigkeitsprofils vom üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeitsverlauf reicht unter Umständen der Abstand aus, um zum Beispiel im Segelbetrieb zu verzögern und trotzdem einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu gewährleisten. Jedoch wird dadurch immer nur die momentane Situation bewertet.

Im Vergleich dazu hat eine vorausschauende Betrachtung den Vorteil, dass die Entscheidung nicht allein anhand der aktuellen Situation, sondern auch auf Basis der zukünftigen Entwicklung getroffen wird. Für die Bewertung ist nicht der aktuelle zeitliche Abstand entscheidend, sondern vielmehr wie sich der zeitliche Abstand zum nachfolgenden Fahrzeug entwickeln wird. Beispielsweise macht es einen großen Unterschied, ob das Ego-Fahrzeug nur kurzzeitig von der üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeit abweicht oder über einen längeren Zeitraum. Bei einer kurzzeitigen Abweichung wird bei gleicher Relativgeschwindigkeit ein geringerer zeitlicher Abstand benötigt als bei einer Abweichung über einen längeren Zeitraum. Zur Bewertung des Abstandes entlang einer definierten Strecke eignet sich zum Beispiel der Median oder Expositionsanteil einer Zeitlücke (s. Tabelle 5.2).

Für die Bestimmung des voraussichtlichen Zeitlückenverlaufes muss das Geschwindigkeitsprofil des Ego- und des nachfolgenden Fahrzeugs bekannt sein. Der Verlauf der Ego-Geschwindigkeit lässt sich dabei vergleichsweise genau bestimmen, da die beabsichtigte energieeffiziente Fahrstrategie im Vorfeld bekannt ist. Der Geschwindigkeitsverlauf des nachfolgenden Fahrzeugs kann dagegen mit einem Fahrzeugfolgemodell abgeschätzt werden (s. Tabelle 5.2). Durch eine numerische Integration beider Geschwindigkeitsprofile lässt sich der Abstand und die Zeitlücke zwischen Ego- sowie nachfolgendem Fahrzeug abschätzen und somit die zuvor genannten Maßzahlen Median und Expositionsanteil bestimmen. Mit dem Zeitlückenmedian kann

somit die Auswirkung der Fahrstrategie besser bei der Entscheidung für oder gegen eine energieeffiziente Fahrweise berücksichtigt werden.

Eine weitere Größe, die sich zur vorausschauenden Betrachtung eignet, ist die Bestimmung der Differenz der gewünschten Fahrzeit des nachfolgenden Fahrers zur benötigten Fahrzeit des Ego-Fahrzeugs (s. Tabelle 5.2). Liegt die gewünschte Fahrzeit des nachfolgenden Fahrers zum Beispiel bei 55 s und die benötigte Fahrzeit des vorausfahrenden Ego-Fahrzeugs bei 50 s, hat das Ego-Fahrzeug am Ende des Streckenabschnittes einen Vorsprung von 5 s. Das heißt, der nachfolgende Fahrer wird trotz energieeffizienter Fahrstrategie des Ego-Fahrzeugs nicht an seinem Wunschfahrverhalten gehindert.

Auch in diesem Beispiel lässt sich die Fahrzeit des Ego-Fahrzeugs aufgrund der bekannten Fahrstrategie bestimmen. Für die Berechnung der gewünschten Fahrzeit des nachfolgenden Fahrzeugs sind dagegen wieder Annahmen zu treffen, die einer gewissen Unsicherheit unterliegen. Die gewünschte Fahrzeit soll dabei die Zeit darstellen, innerhalb der der nachfolgende Fahrer den Streckenabschnitt ohne eine Beeinflussung von vorausfahrenden Fahrzeugen zurücklegen würde. Unter der Annahme, dass der nachfolgende Fahrer die zulässige Geschwindigkeit fahren möchte und mit einer konstanten Beschleunigung verzögert bzw. beschleunigt, lässt sich eine gewünschte Fahrzeit abschätzen. Neben der zulässigen Höchstgeschwindigkeit können für die Berechnung der gewünschten Fahrzeit auch die aktuelle Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs oder, wenn für diesen Streckenabschnitt vorhanden, die mittlere gefahrene Geschwindigkeit herangezogen werden.

Abbildung 5.4 zeigt für eine Annäherung an ein Tempolimit, wie eine Adaption der Fahrstrategie mit dem regelbasierten Ansatz aussehen kann. In diesem Beispiel wird auf Basis der Differenz zur gewünschten Fahrzeit des nachfolgenden Fahrers entschieden, ob es hinsichtlich der Fahrsicherheit sinnvoll ist, im Segelbetrieb zu verzögern oder die Geschwindigkeit weiter konstant zu halten.

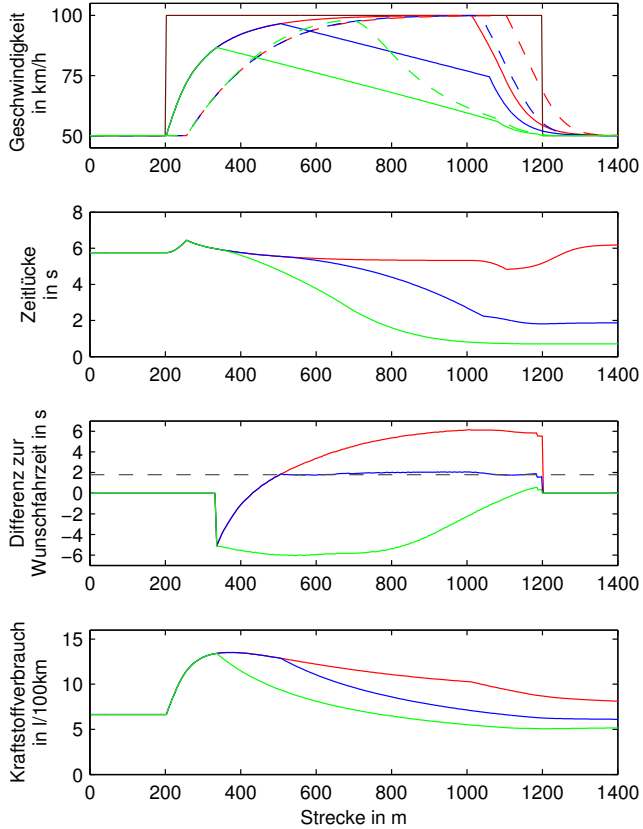


Bild 5.4: Beispielsimulation mit regelbasierter Adaption (blau) an das nachfolgende Fahrzeug sowie zum Vergleich die Strategien Segeln (grün) und Bremsen (rot) ohne Adaption. Der Geschwindigkeitsverlauf des nachfolgenden Fahrzeugs ist jeweils als gestrichelte Linie dargestellt.

Für die Berechnung der gewünschten Fahrzeit wird davon ausgegangen, dass der nachfolgende Fahrer mit der erlaubten Höchstgeschwindigkeit fahren und vor dem Tempolimit mit $a = 1 \text{ m/s}^2$ verzögern möchte. Zur Modellierung des realen Fahrverhaltens des nachfolgenden Fahrers kommt das verbesserte IDM Modell von Treiber zum Einsatz (s. Abschnitt 5.2.1). Hier wird angenommen, dass es sich um einen Fahrer handelt, der sich an die Geschwindigkeitsbegrenzung $v_0 = 100 \text{ km/h}$ hält und eine Verzögerung von $b = 2 \text{ m/s}^2$ bevorzugt. Die übrigen Parameter des IDM werden wie folgt definiert: $a = 1,5 \text{ m/s}^2$, $\delta = 4$ und $T = 0,7 \text{ s}$. Der Parameter s_0 ist nicht relevant, da in diesem Szenario kein Anhalten erforderlich ist.

Für die Abbildung der freien Fahrt wird davon ausgegangen, dass der nachfolgende Fahrer die Wunschgeschwindigkeit v_0 derart anpasst, dass er das Tempolimit mit dem zulässigen Wert erreicht. Der Startabstand zum vorausfahrenden Ego-Fahrzeug beträgt 80 m. In Abbildung 5.4 ist oben der resultierende Geschwindigkeitsverlauf für das Ego-Fahrzeug und das nachfolgende Fahrzeug dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass bei Anwendung der Segelstrategie ohne Adaption das nachfolgende Fahrzeug früh mit der Verzögerung beginnen muss, um nicht auf das Ego-Fahrzeug aufzufahren. Im Vergleich dazu kann bei Anwendung der Adaption der Verzögerungsvorgang des nachfolgenden Fahrzeugs erheblich nach hinten verschoben werden. Der nachfolgende Fahrer wird folglich weniger in seiner Fahrweise behindert. Daneben hat die Adaption auch einen positiven Einfluss auf die Zeitlücke zwischen beiden Fahrzeugen. Bei Anwendung der Segelstrategie nähert sich das nachfolgende Fahrzeug bis auf 0,7 s an, wobei mit Adaption die minimale Zeitlücke bei 1,8 s liegt. Die Differenz zwischen prädictierter Wunschfahrzeit und Fahrzeit des Ego-Fahrzeugs zeigt, dass bei Anwendung der Segelstrategie der nachfolgende Fahrer ungefähr 6 s verliert bzw. langsamer ist im Vergleich zu seinem Wunsch. Wird der Segelvorgang nach hinten verschoben, steigt die Differenz an und nimmt ab ca. 430 m positive Werte an. Ab hier haben beide Fahrzeuge theoretisch die gleiche Restfahrzeit bis zum Tempolimit. Um einen Sicherheits-

abstand zu gewährleisten, wird bei der Fahrstrategie mit Adaption erst bei einer positiven Differenz von 1,8 s mit der Verzögerung im Segelbetrieb begonnen (siehe schwarze gestrichelte Linie in Abbildung 5.4). Die Differenz zur Wunschfahrzeit steigt auf über 6 s an, wenn das Ego-Fahrzeug weiter beschleunigt wird. Das bedeutet, dass der nachfolgende Fahrer schneller fahren und abzüglich eines Sicherheitsabstandes von 1 s bis zu 5 s früher am Schild sein könnte. Im Vergleich zum zeitlichen Abstand und der Differenz zur Wunschfahrzeit verhält sich dagegen der streckenspezifische Verbrauch genau umgekehrt. Das bedeutet, der Kraftstoffverbrauch sinkt, je früher mit dem Segelvorgang begonnen wird. Im Segelbetrieb kann in diesem Beispiel ein Verbrauch von 5,2 l/100km erreicht werden. Jedoch verringert sich im Gegenzug der zeitliche Abstand erheblich und sinkt mit 0,7 s in den sicherheitskritischen Bereich. Ein Kompromiss zwischen Sicherheit und Energieeffizienz bildet die adaptierte Fahrweise. Hier liegt der zeitliche Abstand am Ende des Streckenabschnittes mit 1,8 s in einem normalen Bereich. Der Kraftstoffverbrauch ist mit 6,2 l/100 km, im Vergleich zur Strategie Bremsen mit 8,1 l/100 km, immer noch niedrig.

Bei den Fahrzeiten des nachfolgenden Fahrzeugs fällt auf, dass zwischen den Strategien Bremsen und Adaption mit 70,4 s kein Unterschied besteht. Mit der Adaption der Fahrweise kann der Zeitverlust folglich auf 0 reduziert werden, wohingegen beim Segeln der nachfolgende Fahrer mit 77 s einen Zeitverlust von 6,6 s bzw. 9,4 % hinnehmen muss.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass mithilfe einer regelbasierten Adaption der Zeitverlust des nachfolgenden Fahrzeugs erheblich reduziert werden kann. Des Weiteren besteht durch die Adaption die Möglichkeit, den zeitlichen Abstand zu erhöhen und dadurch die Fahrsicherheit zu verbessern. Bei der adaptierten Fahrstrategie wird von der energieeffizienten Fahrweise nur so weit abgewichen, wie es die voraussichtliche Differenz zur Wunschfahrzeit des nachfolgenden Fahrers erfordert.

5.3.2 Optimierungsbasiert

Mit der Optimierung von Energieeffizienz und Fahrzeit haben sich in der Vergangenheit schon eine Vielzahl von Arbeiten beschäftigt (s. Abschnitt 2.3.2). Jedoch wurde bisher noch nicht untersucht, wie bei der Optimierung der Energieeffizienz nachfolgende Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden können, um die Fahrsicherheit zu erhöhen. Im Gegensatz zum regelbasierten Ansatz wird bei der Optimierung nicht für oder gegen eine energieeffiziente Fahrweise entschieden. Vielmehr besteht bei diesem Ansatz die Möglichkeit, den Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeugs im Hinblick auf Energieeffizienz und Sicherheit zu optimieren. Je nach Gewichtung der Kriterien können so Geschwindigkeitsprofile erzeugt werden, die zwischen einer rein sicheren und einer rein energieeffizienten Fahrweise liegen. Dazu werden die verschiedenen Kriterien als physikalische Größen wie Streckenverbrauch (b_s) und Zeitlücke (τ) beschrieben sowie in einer Funktion zunächst gewichtet und zu Kosten aufsummiert. Im nächsten Schritt wird mithilfe eines Optimierungsverfahrens der Geschwindigkeitsverlauf mit den niedrigsten Gesamtkosten innerhalb des betrachteten Streckenabschnittes bestimmt.

Eine wichtige Voraussetzung für die Optimierung ist die Modellbildung des Systems, welches optimiert werden soll. Das bedeutet, dass neben dem Ego-Fahrzeug auch das Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers in einem Modell abgebildet werden muss. Im folgenden Beispiel erfolgt die Bestimmung des Kraftstoffverbrauches auf Basis eines vereinfachten Fahrwiderstandsmodells sowie eines kennfeldbasierten Modells des Verbrennungsmotors. Zur Modellierung des Fahrverhaltens bzw. der Zeitlücke wird auch in diesem Beispiel das Intelligent Driver Model von Treiber herangezogen. Wie bereits angedeutet, setzen sich die Kosten aus dem Streckenverbrauch und der Zeitlücke zusammen. Mithilfe der Koeffizienten k_b und k_τ werden die verschiedenen physikalischen Größen normiert. Das bedeutet es werden jeweils Bezugsgrößen festgelegt, um die Kosten vergleichbar zu machen. Des

Weiteren können mit den Gewichtungsfaktoren k_e und k_s die Kosten für den Streckenverbrauch und die Zeitlücke unterschiedlich gewichtet werden (s. Gleichung 5.16). Dadurch kann die gewünschte Intensität von Energieeffizienz bzw. Sicherheit festgelegt werden. Neben Sicherheit und Energieeffizienz wird auch der Komfort berücksichtigt. Dazu werden bei jeder Änderung der Stellgröße (u), die hier der Sollbeschleunigung entspricht, zusätzliche Kosten (K_u) hinzu addiert (s. Gleichung 5.17). Dadurch können häufige Änderungen der Beschleunigung bestraft und für den Fahrer unkomfortable Rucke vermindert werden.

$$K_n = k_e \cdot k_b \cdot b_s + k_s \cdot k_\tau \cdot \frac{1}{\tau_n} + K_u \text{ mit } k_s = 1 - k_e \quad (5.16)$$

$$K_u = \begin{cases} k_u & \text{wenn } u_k \neq u_{k-1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.17)$$

Als Optimierungsverfahren kommt beispielhaft die bereits vorgestellte Dynamische Programmierung zum Einsatz (s. Abschnitt 2.3.2). Der Berechnungsaufwand und die Genauigkeit dieses Verfahrens werden im Wesentlichen durch die Auflösung und den Wertebereich der Zustandsvariablen, Steuergrößen und der Horizontlänge bzw. Wegstrecke bestimmt. Als Zustandsvariablen werden im folgenden Beispiel die Geschwindigkeit und die Gangstufe des Ego-Fahrzeugs verwendet. Als Steuergröße dient die Sollbeschleunigung, mit der die Betriebszustände Zug- und Schubtrieb abgedeckt werden. Der Betriebszustand Freilauf bzw. Leerlaufsegeln kann dagegen separat angewählt werden. Die für das nachfolgende Optimierungsbeispiel gewählten Auflösungen und Wertebereiche sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt (s. Tabelle 5.3).

Zur Veranschaulichung des optimierungsbasierten Ansatzes wird im folgenden Beispiel das gleiche Szenario wie bei der regelbasierten Adaption simuliert.

Variable	Einheit	Wertebereich	Auflösung
Horizontlänge	m	[0; 1400]	10
Geschwindigkeit	m/s	[10; 27,8]	0,05
Sollbeschleunigung	m/s^2	[-2; 2]	0,2

Tabelle 5.3: Wertebereich und Auflösung der Wegstrecke, Zustands- und Steuergrößen

Des Weiteren werden auch die gleichen Modellparameter für das Fahrer- und Fahrzeugmodell herangezogen, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Gewichtungen der Zeitlücke (k_s) und des Streckenverbrauches (k_e).

Bei einer Gewichtung von $k_e = 1$ und $k_s = 0$ geht in die Gesamtkosten nur der Streckenverbrauch ein. Das führt dazu, dass bei dieser Kombination der energieeffizienteste Geschwindigkeitsverlauf ohne Berücksichtigung des zeitlichen Abstandes zum nachfolgenden Fahrzeug bestimmt wird. Das Optimierungsverfahren wählt hier eine intermittierende Fahrweise. Zunächst wird im Segelbetrieb verzögert und wieder beschleunigt.

Nach der Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird die intermittierende Fahrweise auf einem höheren Geschwindigkeitsniveau fortgeführt. Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erläutert, kann im Vergleich zu einer konstanten Geschwindigkeit dadurch der Verbrennungsmotor in einem Bereich mit höherem Wirkungsgrad betrieben und folglich Kraftstoff eingespart werden. Mithilfe der intermittierenden Fahrweise wird in diesem Szenario ein minimaler Kraftstoffverbrauch von 4,2 l/100km erzielt. Jedoch sinkt auf der anderen Seite der zeitliche Abstand des nachfolgenden Fahrers über eine Strecke von 900 m unter die Grenze von 0,9 s.

Durch die Invertierung des Gewichtungsverhältnisses ($k_e = 0$ und $k_s = 1$) wird im Vergleich zum vorherigen Beispiel nur die Fahrsicherheit optimiert und die Energieeffizienz außer Acht gelassen. Die Optimierung ergibt nun das Geschwindigkeitsprofil, bei dem der zeitliche Abstand am größten ist. Innerhalb des gesamten Abschnittes fällt die Zeitlücke nicht unter den Startwert

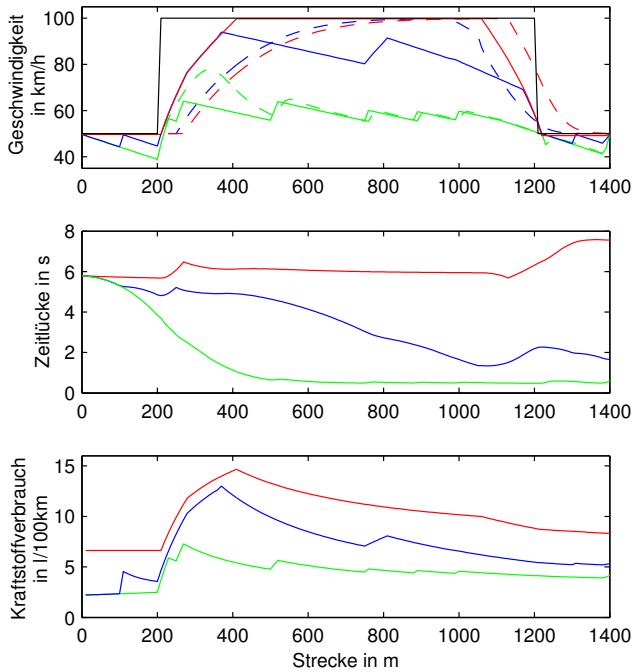


Bild 5.5: Beispielsimulation mit optimierungsbasierter Adaption an das nachfolgende Fahrzeug. Die Diagramme zeigen 3 Simulationen mit verschiedenen Gewichtungen der Sicherheit bzw. des zeitlichen Abstandes $k_s = 1$ (rot), $k_s = 0,7$ (blau) und $k_s = 0$ (grün). Die Geschwindigkeitsverläufe des nachfolgenden Fahrzeugs sind jeweils als gestrichelte Linie dargestellt.

von $\tau = 5,3$ s. Die alleinige Berücksichtigung des zeitlichen Abstandes führt zwar zum größtmöglichen Sicherheitsabstand, aber auf der anderen Seite auch zum höchsten Kraftstoffverbrauch von 8,3 l/100km.

Einen Kompromiss bildet dagegen die Gewichtung von $k_e = 0,3$ und $k_s = 0,7$. Im Vergleich zum ersten Beispiel führt sie dazu, dass das Geschwindigkeitsniveau der intermittierenden Fahrweise weiter angehoben wird. Dadurch wird auch der zeitliche Abstand zum nachfolgenden Fahrzeug erhöht und die Fahrsicherheit verbessert. Die Zeitlücke liegt während der gesam-

ten Fahrt oberhalb von 1,3 s und damit in einem ausreichenden Bereich. Des Weiteren steigt der Kraftstoffverbrauch nur geringfügig auf 5,3 l/100km an. Durch die Berücksichtigung beider Kriterien wird nur soweit wie notwendig von der energieeffizienten Fahrweise abgewichen und nicht ein unnötig großer zeitlicher Abstand auf Kosten des Kraftstoffverbrauches gehalten. Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse einer Variation der Gewichtungsfaktoren k_s und k_e zwischen 0 und 1. Gegenübergestellt werden der Median der Zeitlücke sowie der Kraftstoffverbrauch.

Hier fällt auf, dass schon mit einer geringen Erhöhung des Kraftstoffverbrauches eine Verbesserung im zeitlichen Abstand erzielt werden kann. Ist der zeitliche Abstand dagegen schon vergleichsweise hoch (4 s bis 5 s), muss für eine weitere Erhöhung mit einem wesentlich höheren Verbrauch gerechnet werden. Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass auch mithilfe der optimierungsbasierten Adaption die Fahrweise an das Fahrverhalten von nachfolgenden Fahrern angepasst werden kann.

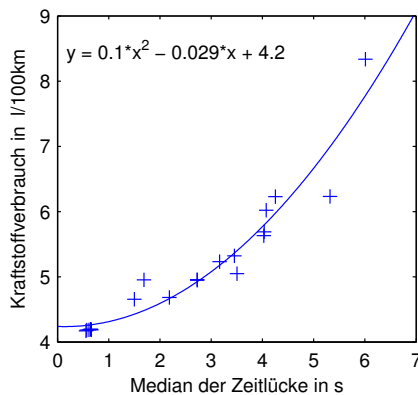


Bild 5.6: Simulationsergebnisse des Kraftstoffverbrauches und des Medians der Zeitlücke bei Variation der Gewichtungsfaktoren k_s und k_e zwischen 0 und 1

Im Vergleich zur regelbasierten Adaption können Freiheitsgrade wie zum Beispiel unterschiedliche Betriebszustände Leerlaufsegeln und Schubbetrieb sowie das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten einfacher berücksichtigt werden. Des Weiteren wird mithilfe des Verfahrens der Dynamischen Programmierung unter den gegebenen Randbedingungen und Annahmen eine global optimale Lösung garantiert. Ein großer Nachteil der optimierungsbasierten Adaption sind dagegen die hohen Rechen- und Speicherressourcen, die für die Dynamische Programmierung benötigt werden.

5.4 Parameterstudie zur regelbasierten Adaption

Im vorhergehenden Abschnitt wurden mit der regelbasierten und optimierungsbasierten Adaption zwei Methoden vorgestellt, um energieeffiziente Fahrstrategien an das Fahrverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern anzupassen. Im folgenden Abschnitt soll nun mit einer Parametervariation unter verschiedenen Bedingungen analysiert werden, inwieweit eine Adaption der Fahrstrategie zur Erhöhung der Fahrsicherheit beitragen kann und wo ihre Grenzen liegen. Daneben wird auch der Einfluss der Sensorreichweite untersucht. Im Vergleich zur regelbasierten erfordert die optimierungsbasierte Adaption auf Basis der Dynamischen Programmierung hohe Rechenzeit- sowie Speicherressourcen und eignet sich daher weniger für den Einsatz auf einem eingebetteten System bzw. automotiven Seriensteuergerät. Deshalb wird in den folgenden Untersuchungen der regelbasierte Ansatz weiterverfolgt. Daneben haben die Untersuchungen zur Beeinflussung der Fahrsicherheit durch nachfolgende Verkehrsteilnehmer (s. Kapitel 4) gezeigt, dass insbesondere Fahrstrategien zur energieeffizienten Verzögerung zu Einbußen in der Fahrsicherheit führen. Aus diesem Grund werden die nachfolgenden Untersuchungen auf die Adaption von energieeffizienten Verzögerungsstrategien fokussiert.

Der folgende Abschnitt erläutert zunächst das Simulationsmodell. Danach wird genauer auf die verschiedenen Testfälle eingegangen, anhand derer die

adaptive Verzögerungsstrategie in der Simulation untersucht wird. Abschließend werden die Ergebnisse der simulationstechnischen Untersuchungen vorgestellt und diskutiert.

5.4.1 Simulationsmodell

Das Simulationsmodell setzt sich im Wesentlichen aus den Modulen elektronischer Horizont, Fahrstrategie, Adaption, Fahrer- und Fahrzeugmodell zusammen (s. Abbildung 5.7). Im elektronischen Horizont wird das Profil der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (v_k) sowie die Topografie mithilfe eines Steigungsverlaufes über dem Weg definiert (α_k). Des Weiteren wird in diesem Modul auch die Position im Horizont bestimmt. Die Fahrstrategie berechnet ausgehend von der aktuellen Geschwindigkeit und dem Abstand zur nächsten Geschwindigkeitsbegrenzung, ob mit der Verzögerung im Schub- oder Segelbetrieb begonnen werden kann.

Auf Basis dieser Entscheidung wird die Sollbeschleunigung (a_{cv}) und die Neutralanforderung (γ_n) für das Getriebe berechnet. Das Fahrzeugmodell bildet stark vereinfacht über ein Verzögerungsglied die Längsdynamik des Fahrzeugs ab und berechnet auf Basis der Fahrzeuggeschwindigkeit die Fahrwiderstände sowie den Kraftstoffverbrauch (b_s) mithilfe eines kennfeldbasierten Modells des Verbrennungsmotors. Ausgehend von der Ge-

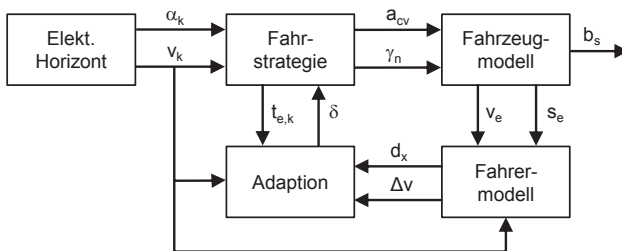


Bild 5.7: Übersicht des Simulationsmodells mit den wesentlichen Signalflüssen zwischen den einzelnen Teilmodellen

schwindigkeit (v_e) und dem zurückgelegten Weg des Ego-Fahrzeugs (s_e) wird im Fahrermodell das Folgeverhalten des nachfolgenden Fahrzeugs bestimmt. Wie bereits erwähnt, wird hierfür das Intelligent Driver Modell von Treiber eingesetzt. Zur Abbildung einer gewissen vorausschauenden Verzögerung vor den Geschwindigkeitsbegrenzungen (v_k) wird das IDM um eine prädiktive Anpassung der Wunschgeschwindigkeit erweitert. Auf Basis des sich ergebenden Abstandes (d_x) und der Relativgeschwindigkeit (Δv) zum nachfolgenden Fahrzeug sowie dem Abstand und der Fahrzeit ($t_{e,k}$) zu den vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzungen (v_k) wird im Modul der Adaption bestimmt, ob eine Anpassung der energieeffizienten Fahrweise erforderlich ist. In Abhängigkeit des Ergebnisses wird die Verzögerung im Segelbetrieb freigegeben, unterdrückt oder die aktuelle Geschwindigkeit aufgrund einer geänderten Situation gehalten (δ).

Fahrstrategie

Die Fahrstrategie besteht im Wesentlichen aus dem Modul der energieeffizienten Verzögerungsstrategie und dem Modul des Setzgeschwindigkeitsreglers. Beide Module werden hintereinander zyklisch aufgerufen und bestimmen eine Sollbeschleunigung. Darüber hinaus wird über eine Minimumsauswahl die Sollbeschleunigung für das Fahrzeugmodell bestimmt sowie welches der beiden Module gerade aktiv ist.

Energieeffiziente Verzögerungsstrategie Im Modul der energieeffizienten Verzögerungsstrategie wird zunächst mithilfe eines vereinfachten Fahrwiderstandsmodells bestimmt, ob mit dem Ausrollvorgang begonnen werden muss, damit das Ego-Fahrzeug das vorausliegende Tempolimit mit der richtigen Geschwindigkeit erreicht. Des Weiteren wird in diesem Schritt auch die Fahrzeit berechnet, die das Ego-Fahrzeug im Segelbetrieb bis zum Tempolimit benötigt. Bei der Berechnung der Fahrzeit wird auch die zusätzliche Zeit zum Bremsen berücksichtigt. Das ist insbesondere dann notwen-

dig, wenn die Geschwindigkeit im Segelbetrieb am Tempolimit wesentlich höher ist. Zur Berechnung der Ausrollkurve bzw. Fahrzeit werden zum einen die Fahrwiderstände bestehend aus Luft- ($c_w \cdot A$), Roll- (k_r), Steigungs- (α) und Beschleunigungswiderstand ($m \cdot \dot{v}$) berücksichtigt. Hinzu kommt eine Verlustkraft für den Antriebsstrang ($F_{Antrieb}$), die im Schubbetrieb zusätzlich das Schleppmoment des Verbrennungsmotors (M_{Motor}) beinhaltet (s. Gleichung 5.18).

$$\dot{v} = \frac{F_{Antrieb}}{m} - \frac{\rho A c_w}{2 \cdot m} \cdot v^2 - g k_r \cos(\alpha) - g \sin(\alpha) \quad (5.18)$$

Die Modellierung des Schleppmomentes erfolgt mit einer drehzahlabhängigen Kennlinie. Dazu wird die Drehzahl am Verbrennungsmotor aus der Fahrzeuggeschwindigkeit (v), den Getriebeübersetzungen ($i_{Getriebe}$ und i_{Achse}) und dem Radumfang (r_{Rad}) bestimmt (s. Gleichung 5.19). Im Schlepptrieb wird über eine für jeden Gang definierte Schaltdrehzahl, bei der das Getriebe eine Stufe herunterschaltet, immer die höchstmögliche Gangstufe ermittelt.

$$F_{Antrieb} = \frac{M_{Motor} i_{Achse} i_{Getriebe}}{r_{Rad}} \text{ mit } M_{Motor} = f(\omega) \quad (5.19)$$

Zur Lösung der Differenzialgleichung wird das Euler-Verfahren verwendet. Aufgrund dessen, dass die Abstände zu den Geschwindigkeitsbegrenzungen als Strecke vorliegen, werden auch die Ausrollkurven über dem Weg berechnet (s. Gleichung 5.20). Um einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungsaufwand zu finden, erfolgt die Lösung der Differenzialgleichung mit einer Schrittweite von $h = 20m$. Zur Berechnung der Ausrollzeit ($t_{Ausrollen}$) wird jeweils zwischen den benachbarten Schritten i und $i + 1$ der Mittelwert der Ausrollgeschwindigkeiten gebildet (s. Gleichung 5.21).

$$v_{i+1} = v_i + h \frac{\dot{v}}{v_i} \quad (5.20)$$

$$t_{i+1} = t_i + \frac{2 \cdot h}{v_i + v_{i+1}} \quad (5.21)$$

Mit der Ausrollkurve kann nun für jede vorausliegende Geschwindigkeitsbegrenzung überprüft werden, ob ein Schnittpunkt vorhanden ist. Ein Schnittpunkt zwischen Ausrollkurve und Geschwindigkeitsbegrenzung liegt vor, wenn an der Position des Verkehrsschildes die Geschwindigkeit der Ausrollkurve oberhalb des Tempolimits liegt. Existiert ein Schnittpunkt mit einer vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzung, wird der Ausrollvorgang über die entsprechende Sollbeschleunigung angefordert.

Um auch die zusätzliche Zeit zum Bremsen zu berücksichtigen, wird ausgehend von jedem Schritt der Ausrollkurve eine Bremskurve berechnet. Die Berechnung der Bremskurve basiert auf der Gleichung zur Bestimmung der Sollbeschleunigung (\dot{v}_{soll}) und vernachlässigt dabei das dynamische Verhalten des Ego-Fahrzeugs. Die Sollbeschleunigung v_{soll} berechnet sich aus der Differenzgeschwindigkeit zwischen v_{soll} und v_{ist} sowie der Zeitkonstante T_1 . Des Weiteren wird die Beschleunigung auf einen Maximal- (a_{max}) und Minimalwert (a_{min}) begrenzt (s. Gleichung 5.22).

$$\dot{v}_{soll} = \max \left(\min \left(\frac{v_{soll} - v_{ist}}{T_1}, a_{max} \right), a_{min} \right) \quad (5.22)$$

Auch die obige Differenzialgleichung kann mithilfe des Euler-Verfahrens über dem Weg gelöst werden. Die Berechnung der Bremszeit erfolgt wie bei der Ausrollkurve mit Gleichung 5.21. Aus der Summe von Ausrollzeit und Bremszeit ergibt sich die Gesamtfahrzeit bis zur Geschwindigkeitsbegrenzung ($t_{e,k}$).

Setzgeschwindigkeitsregler Der Setzgeschwindigkeitsregler sorgt dafür, dass die zulässige Geschwindigkeit eingeregelt und nicht überschritten wird. Dazu gehören beispielsweise die Anhebung und das Halten der zulässigen Geschwindigkeit, wenn keine energieeffiziente Verzögerung an-

gefordert wird. Des Weiteren wird vom Setzgeschwindigkeitsregler auch überprüft, ob aufgrund eines herannahenden Tempolimits eine Verzögerung erforderlich ist. Hierzu gehört auch der Fall, wenn die Verzögerung der energieeffizienten Verzögerungsstrategie nicht ausreicht. Deshalb wird immer ausgehend von der aktuellen Geschwindigkeit eine Bremskurve berechnet und überprüft, ob Schnittpunkte mit vorausliegenden Tempolimits vorliegen. Ist ein Schnittpunkt zwischen Bremskurve und Tempolimit vorhanden, wird eine Bremsung mit der entsprechenden Sollverzögerung angefordert. Die Berechnung der Bremskurve erfolgt auch hier auf Basis von Gleichung 5.22.

Adaption

Wie bereits erläutert, wird anhand der Differenz zwischen der geschätzten Wunschfahrzeit des nachfolgenden Fahrzeugs (s. Abschnitt 5.4.1) und der berechneten Fahrzeit des Ego-Fahrzeugs entschieden, ob eine Anpassung des Ego-Fahrverhaltens notwendig ist. In den vorangegangenen Beispielen zur regelbasierten und optimierungsbasierten Adaption erfolgte die Abschätzung der Wunschfahrzeit unter der Annahme, dass der nachfolgende Fahrer mit einer definierten Beschleunigung auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit beschleunigt und danach diese konstant hält. Nähert er sich einem niedrigeren Tempolimit, verringert er die Geschwindigkeit wieder mit einer konstanten Verzögerung, um das Tempolimit mit dem erlaubten Wert zu erreichen. Diese Annahme kann jedoch dazu führen, dass die Wunschgeschwindigkeit über- oder unterschätzt wird. Deshalb wird im weiteren Verlauf der Arbeit auch die aktuelle Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs berücksichtigt. Jedoch nur für die aktuell zulässige Geschwindigkeit, da für die vorausliegenden Tempolimits das Verhalten des nachfolgenden Fahrers schlecht abgeschätzt werden kann.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Schritte zur Berechnung der Wunschfahrzeit beschrieben. Im ersten Schritt werden dazu alle irrelevanten Ge-

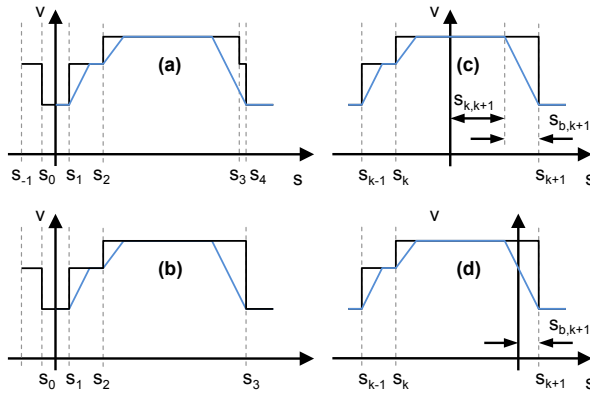


Bild 5.8: Beispiel zur Filterung nicht relevanter Geschwindigkeitsbegrenzungen (a)+(b) und Bestimmung der Fahrzeit des nachfolgenden Fahrzeugs (c)+(d)

geschwindigkeitsbegrenzungen herausgefiltert. Irrelevant sind alle Tempolimits, die aufgrund der Beschleunigung nicht erreicht werden. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn nacheinander zwei Anhebungen oder Herabsetzungen innerhalb eines kleinen Abstandes folgen (s_3 und s_4 in Abbildung 5.8, Teil a).

Ob ein Tempolimit relevant ist, lässt sich am Beschleunigungs- bzw. Bremsweg feststellen. Kann die Geschwindigkeit bis zum darauffolgenden Tempolimit nicht erreicht werden, dann ist dieses nicht relevant. Für die Bestimmung der Relevanz werden daher für alle vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzungen der Beschleunigungs- bzw. Bremsweg bestimmt (s. Gleichung 5.23 und 5.24).

$$t_{b,k+1} = \frac{v_{k+1} - v_k}{a_b} \quad (5.23)$$

$$s_{b,k+1} = \frac{v_{k+1} + v_k}{2} \cdot t_b \quad (5.24)$$

Nachdem alle irrelevanten Tempolimits gefiltert wurden (s. Abbildung 5.8, Teil b), kann als nächstes die Wunschfahrzeit für den gesamten Abschnitt bestimmt werden. Für jedes Tempolimit wird dafür neben der Zeit für die Beschleunigung bzw. Verzögerung auch eine Zeit für die Konstantfahrt bestimmt. Abhängig davon, ob es sich um eine Anhebung oder Herabsetzung handelt und wie die Tempolimits aufeinander folgen sowie welchen Abstand sie haben, setzt sich die jeweilige Zeit der Konstantfahrt unterschiedlich zusammen. Die Zeit der Konstantfahrt für das (k+1)-te Tempolimit bezieht sich immer auf den Abschnitt davor oder präziser gesagt zwischen dem (k+1)-ten und k-ten Tempolimit. Im Folgenden wird nun beispielhaft auf die Verzögerungssituation $v_k > v_{k+1}$ eingegangen (s. Abbildung 5.8, Teil c). Ist der Weg zur Verzögerung ($s_{b,k+1}$) kleiner als der Abstand zum Tempolimit (s_{k+1}), berechnet sich die Wunschfahrzeit aus der Summe der Fahrzeit mit konstanter Geschwindigkeit und der Zeit zur Verzögerung (s. Gleichung 5.25 und 5.26).

$$t_{k,k+1} = \frac{s_{k+1} - s_{b,k+1}}{v_k} \quad (5.25)$$

$$t_{w,k+1} = t_{k,k+1} + t_{b,k+1} \quad (5.26)$$

Ist dagegen der Weg zur Verzögerung ($s_{b,k+1}$) größer gleich als der Abstand zum Tempolimit (s_{k+1}), so berechnet sich die Wunschfahrzeit allein aus der verbleibenden Zeit zur Verzögerung (s. Abbildung 5.8, Teil d). In diesem Fall ist $t_{k,k+1} = 0$ und muss $t_{b,k+1}$ neu berechnet werden. Dazu wird zunächst mithilfe des Restabstandes zum Tempolimit die Startgeschwindigkeit (v_{Start}) berechnet (s. Gleichung 5.27). Danach kann in gewohnter Weise die Wunschfahrzeit bestimmt werden (s. Gleichung 5.28).

$$v_{Start} = \sqrt{v_{k+1}^2 - 2 \cdot a \cdot s_{k+1}} \quad (5.27)$$

$$t_{w,k+1} = t_{b,k+1} = \frac{v_{k+1} - v_{start}}{a} \quad (5.28)$$

Anhand der abgeschätzten Wunschfahrzeit des nachfolgenden Fahrers ($t_{w,k+1}$) ist es nun möglich, die Differenz Δt_{k+1} zur Fahrzeit des Ego-Fahrzeugs $t_{e,k+1}$ zu bilden (s. Gleichung 5.29).

$$\Delta t_{k+1} = t_{w,k+1} - t_{e,k+1} = \frac{v_{k+1} - v_{start}}{a} \quad (5.29)$$

Liegt die Differenz der Fahrzeiten unterhalb einer gewissen Schwelle, wird in der Fahrstrategie eine energieeffiziente Verzögerung verhindert und die Geschwindigkeit gehalten oder weiter beschleunigt.

Fahrermodell

Für eine realitätsnahe Nachbildung des Fahrverhaltens des nachfolgenden Fahrers wurde das von Weimer implementierte Intelligent Driver Model [309] (s. Abschnitt 5.2.1) um eine prädiktive Anpassung der Wunschgeschwindigkeit erweitert. Ohne diese Erweiterung würde das Modell des nachfolgenden Fahrers erst bei Erreichen des Tempolimits die Geschwindigkeit reduzieren. Jedoch zeigt die Erfahrung, dass im realen Verkehr der überwiegende Teil der Fahrer vorausschauend reagiert und früher mit der Verzögerung vor einem Tempolimit beginnt. Um dieses Verhalten nachzubilden, wird in jedem Berechnungsschritt der Simulation parallel zum eigentlichen Modell ein weiteres IDM berechnet. Bei diesem parallel laufenden Modell wird ähnlich wie bei der Berechnung der Bremskurve ausgehend von der aktuellen Geschwindigkeit die Strecke zum Beschleunigen bzw. Verzögern auf das vorausliegende Tempolimit bestimmt. Die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Ego-Fahrzeugs wird dabei für die Berechnung ausgehend vom aktuellen Wert als konstant angenommen. Ist im Falle einer Herabsetzung der durch das parallele IDM berechnete Bremsweg größer als der Abstand zum Tempolimit, wird die Wunschgeschwindigkeit des IDM auf den Wert

der vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzung herabgesetzt. Das IDM beginnt nun zu verzögern und bildet somit das vorausschauende Verhalten des nachfolgenden Fahrers ab. Durch diese Ergänzung kann auch das häufig zu beobachtende frühere Beschleunigen vor einer Anhebung der Geschwindigkeitsbegrenzung nachgebildet werden.

Fahrzeugmodell

Beim Fahrzeugmodell handelt es sich um ein sogenanntes rückwärts gerichtetes Modell. Das bedeutet, dass ausgehend vom Beschleunigungsverlauf, der von der Fahrstrategie vorgegeben wird, zunächst die Fahrwiderstände und Radmomente berechnet werden (s. Abbildung 5.9).

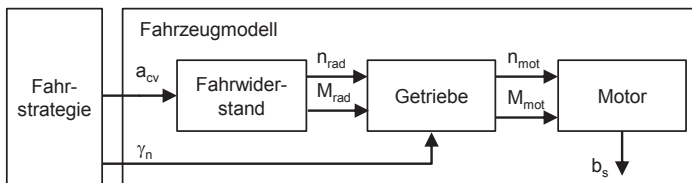


Bild 5.9: Aufbau des rückwärtsgerichteten Fahrzeugmodells

Das Fahrwiderstandsmodell berücksichtigt dabei die grundlegenden Effekte wie Luft-, Roll-, Steigungs- sowie Beschleunigungswiderstand. Im darauffolgenden Schritt erfolgt mit einem stark vereinfachten Getriebemodell die Umrechnung der Drehzahl und des Momentes von der Rad- auf die Motorebene. Dabei werden keine Schalt- und Kuppelvorgängen abgebildet, sondern nur in Abhängigkeit der Motordrehzahl zwischen den Gangstufen diskret sowie verlustfrei hin- und hergeschaltet. Verluste im Antriebsstrang, die beispielsweise durch Reibung hervorgerufen werden, können über ein Verlustmoment berücksichtigt werden. Auf Basis von Drehzahl und Moment wird im Modell des Verbrennungsmotors der Kraftstoffverbrauch bestimmt. Die Modellierung des Kraftstoffverbrauches erfolgt im Wesentlichen mit-

hilfe eines Kennfeldes, das in Abhängigkeit von Drehzahl und Moment den spezifischen Kraftstoffverbrauch abbildet [260].

5.4.2 Parameter

Wie bereits erwähnt, wird in der folgenden Parameterstudie das Szenario der Annäherung an eine Geschwindigkeitsbegrenzung untersucht. Das Ziel ist es einerseits, die verschiedenen Bedingungen aufzuzeigen, bei denen der Ansatz der regelbasierten Adaption zu einer Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Fahrsicherheit und Energieeffizienz beitragen kann und andererseits wo seine Grenzen liegen.

Dazu werden die verschiedenen Parameter vorgestellt, die einen Einfluss auf die Fahrsicherheit und Energieeffizienz vermuten lassen und in der nachfolgenden Simulation untersucht werden.

Startabstand

Ein wesentlicher Einflussfaktor ist der Startabstand des nachfolgenden Fahrzeugs. Ist der Abstand zu Beginn groß, kann frühzeitig mit der energieeffizienten Verzögerung begonnen werden. Hingegen sollte bei einem geringen Startabstand erst später verzögert werden. Hinsichtlich des Startabstands lässt sich vermuten, dass insbesondere bei mittleren Abständen ein Vorteil bei der Fahrsicherheit durch die regelbasierte Adaption erzielt werden kann. Beim folgenden Szenario wird der Startabstand zwischen 30 m und 250 m variiert.

Wunschgeschwindigkeit

Daneben spielt auch die Wunschgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrers eine entscheidende Rolle. Die Wunschgeschwindigkeit ist ein zentraler Parameter, der das Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers abbildet. Liegt die Wunschgeschwindigkeit oberhalb der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, wird sich der nachfolgende Fahrer bis auf seine für ihn tole-

rierbare Zeitlücke annähern. Beispielsweise ist zu erwarten, dass bei einer größeren Wunschgeschwindigkeit als die Ego-Geschwindigkeit die Adaption nur eine geringe Verbesserung bei der Fahrsicherheit erzielt. Jedoch besteht hier auch eine Abhängigkeit zum Startabstand. Ist der Startabstand vergleichsweise hoch, kann auch bei einer hohen Differenzgeschwindigkeit ein Nutzen erzielt werden. Die Wunschgeschwindigkeit bzw. Differenz zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird zwischen -20 km/h und +20 km/h variiert.

Beschleunigungsverhalten

Auch die Annahmen zum Beschleunigungsverhalten des nachfolgenden Fahrers können eine wichtige Rolle spielen. Das bedeutet zum Beispiel, dass der nachfolgende Fahrer entweder früher oder später mit der Verzögerung beginnt, als in der Abschätzung seiner Fahrzeit vorausgesetzt wird. Verhält sich der nachfolgende Fahrer also aggressiver und verzögert später, nähert er sich schneller an das Ego-Fahrzeug an als angenommen. Dadurch verringert sich der Nutzen hinsichtlich der Fahrsicherheit. Eine Überschätzung des Beschleunigungsverhaltens führt dagegen dazu, dass aus Sicht des Ego-Fahrzeugs zu spät mit der energieeffizienten Verzögerung begonnen wird und ein Teil der möglichen Kraftstoffeinsparung verschenkt wird. In der nachfolgenden Parametervariation wird der Fall der Unterschätzung des Beschleunigungsverhaltens untersucht.

Sensorreichweite

Ein weiterer Parameter, der einen erheblichen Einfluss auf den Nutzen vermuten lässt, ist die Sensorreichweite. Je früher ein herannahendes Fahrzeug erfasst wird, desto vorausschauender kann es bei der Wahl der Fahrstrategie berücksichtigt werden. Um den Effekt zu veranschaulichen, wird die Sensorreichweite zwischen 250 m und 80 m variiert.

Verzögerungsstrategie

Ähnlich wie bei der Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit hat vermutlich auch die Ausprägung der Verzögerungsstrategie einen Einfluss auf die Höhe des Nutzens. Die Dauer und die Abweichung von der üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeit sind im Segelbetrieb größer als im Schubbetrieb. Das bedeutet, dass bei einer ausreichenden Sensorreichweite, die Erhöhung des Nutzens bezüglich der Fahrsicherheit beim Segelbetrieb größer ist als im Vergleich zum Schubbetrieb.

Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit

Als weiterer Einflussfaktor soll die Größe der Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit untersucht werden. Hier lässt sich vermuten, dass sich der Nutzen mit abnehmender Differenz verringert. Bei einer energieeffizienten Verzögerung von 100 km/h auf 50 km/h ist die Abweichung von der üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeit wesentlich größer als bei einer Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h auf 50 km/h.

5.4.3 Bewertungsgrößen

Die Bewertung der Fahrsicherheit und Energieeffizienz erfolgt mithilfe der bereits bekannten Größen Streckenverbrauch (b_s) und Expositionsanteil. Für die Bestimmung des Expositionsanteils ($q_{\tau < 0,9s}$) werden wie bei den vorherigen Studien kritische Zeitlücken mit Werten kleiner als 0,9 s berücksichtigt. Um des Weiteren den Nutzen der regelbasierten Adaption zu verdeutlichen, werden die Größen in Bezug zu einer Referenzstrategie gesetzt. Für die Beurteilung der Fahrsicherheit wird als Referenz die Segelstrategie gewählt. Anhand der Differenz der Expositionsanteile für Segeln ($q_{\tau < 0,9s,S}$) und Adaption ($q_{\tau < 0,9s,A}$) lässt sich erkennen, ob die Adaption zu einer Erhöhung der Fahrsicherheit führt (s. Gleichung 5.30).

$$\Delta q_{\tau < 0,9s} = q_{\tau < 0,9s,S} - q_{\tau < 0,9s,A} \quad (5.30)$$

Für die Bewertung der Energieeffizienz dient dagegen die Strategie Bremsen als Referenz. Hier wird zur Bewertung der Anteil bestimmt, um den sich der Streckenverbrauch bei Anwendung der regelbasierten Adaption im Vergleich zum Bremsen verringert (s. Gleichung 5.31).

$$k_b = 1 - \frac{b_a}{b_b} \quad (5.31)$$

Die oben beschriebenen Bewertungsgrößen werden jeweils für den Verzögerungsabschnitt (VA) bestimmt (s. Abbildung 5.10). Der Verzögerungsabschnitt stellt die Strecke dar, die das Ego-Fahrzeug im Segelbetrieb zur Verzögerung von der aktuellen zulässigen Geschwindigkeit (v_1) auf das nächste Tempolimit (v_2) benötigt.

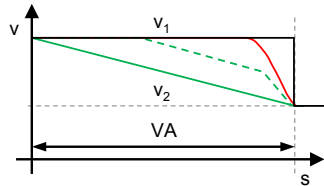


Bild 5.10: Zeigt qualitativ die Referenzstrategien Segeln (grün) und Bremsen (rot) sowie die Verzögerung im Segelbetrieb mit regelbasierter Adaption (grün gestrichelt)

5.4.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Parametervariation für eine Verzögerung von 100 km/h (v_1) auf 50 km/h (v_2) zeigen, dass bei Anwendung der regelbasierten Adaption mit Verzögerung im Segelbetrieb der Expositionsanteil ($q_{\tau < 0,9s}$) in Abhängigkeit des Startabstandes (d_{Start}) und der Wunschgeschwindigkeit

(v_{Wunsch}) des nachfolgenden Fahrers um bis zu 0,8 im Vergleich zur Referenzstrategie reduziert werden kann (s. Abbildung 5.11, Teil a).

Vergleichsweise hoch ist die Reduktion bei Startabständen unterhalb von 100 m und Wunschgeschwindigkeiten des nachfolgenden Fahrers im Bereich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Aber auch oberhalb eines Startabstandes von 100 m und Wunschgeschwindigkeiten größer der zulässigen Höchstgeschwindigkeit führt die Adaption zu einer Reduktion des Expositionsanteils von ungefähr 0,3 bis 0,4.

In den oben genannten Bereichen von Startabstand und Wunschgeschwindigkeit kann auch der Streckenverbrauch um 30 % bis 40 % im Vergleich zur Strategie Bremsen reduziert werden. Bei der Strategie Segeln ist mit 70 % im Vergleich zur Strategie Bremsen die Einsparung zwar deutlich höher, dafür werden aber auf der anderen Seite mit Adaption auch kritische Zeitlücken unterhalb von 0,9 s deutlich reduziert oder sogar vermieden. In diesem Bereich kann wie gewünscht mithilfe der regelbasierten Adaption ein Kompromiss zwischen Fahrsicherheit und Energieeffizienz gefunden werden.

Geringer bis gar kein Nutzen hinsichtlich der Fahrsicherheit werden dagegen bei Wunschgeschwindigkeiten erzielt, die größer ($v_{Wunsch} > 110 \text{ km/h}$) als die zulässige Höchstgeschwindigkeit sind und wo gleichzeitig der Startabstand kleiner als 100 m ist. Trotz Adaption kann hier der Expositionsanteil nicht verringert werden, da die Wunschgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrers zu hoch ist und er sich dadurch zu schnell annähert. In diesem Bereich liegt auch die Einsparung beim Kraftstoffverbrauch im Vergleich zur Strategie Bremsen nahe 0 %. Basierend auf den Bewertungsgrößen macht hier die Adaption wenig Sinn, aber dennoch wird durch die Annäherung hin zur Strategie Bremsen der nachfolgende Fahrer von einer für ihn noch störenderen Fahrweise verschont.

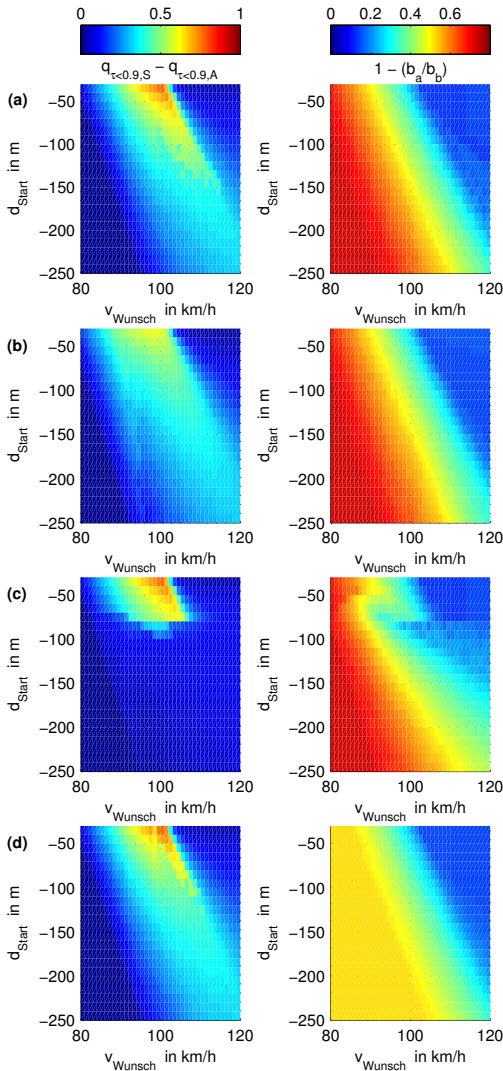


Bild 5.11: Ergebnisse der Parametervariation bei Verzögerung von 100 km/h auf 50 km/h; (a) Ausgangsszenario mit regelbasierter Adaption und Verzögerung im Segelbetrieb, (b) Unterschätzung des Verzögerungsverhaltens des nachfolgenden Fahrers, (c) Einschränkung der Sensorreichweite, (d) regelbasierte Adaption mit Verzögerung im Schubbetrieb

Bei Wunschgeschwindigkeiten unterhalb von 90 km/h wird ebenso keine Verbesserung des Expositionsanteils erzielt. Dafür aber wird durch die Adaption der Anteil des Segelbetriebes erhöht und folglich der Kraftstoffverbrauch im Vergleich zur Strategie Bremsen um bis zu 70 % deutlich verringert. Das bedeutet, dass sich in diesem Bereich die Fahrstrategie mit regelbasierter Adaption an die Strategie des Segelns angleicht.

Im Vergleich zu Teil (a) wurde in Teil (b) das Verzögerungsverhalten des nachfolgenden Fahrers, durch Erhöhung des IDM-Parameters b von 2 m/s^2 auf 4 m/s^2 , verstärkt (s. Abbildung 5.11). Das führt dazu, dass bei Berechnung der Wunschfahrzeit das Verzögerungsverhalten unterschätzt wird. Der nachfolgende Fahrer beginnt folglich erst später mit der Verzögerung und verzögert dafür stärker bei der Annäherung an das vorausliegende Ego-Fahrzeug und Tempolimit. Das hat zur Folge, dass im Vergleich zum Ausgangsszenario (a) die Reduktion des Expositionsanteils geringer ausfällt. Das Ego-Fahrzeug beginnt durch die Unterschätzung des Verzögerungsverhaltens zu früh mit der Verzögerung und das nachfolgende Fahrzeug nähert sich dadurch schneller an. Trotz der Unterschätzung wird in weiten Bereichen aber immer noch eine erhebliche Verbesserung der kritischen Zeitlücken unterhalb von 0,9 s erzielt.

Einen größeren Einfluss auf den Expositionsanteil und den Streckenverbrauch hat dagegen die Begrenzung der Sensorreichweite auf 80 m (s. Abbildung 5.11, Teil c). Im Vergleich zum Ausgangsszenario führt hier bei Startabständen oberhalb von 80 m die Adaption nur noch zu geringfügigen Verbesserungen des Expositionsanteils. Das liegt daran, dass der Sensor das nachfolgende Fahrzeug erst zu spät erfasst und die Fahrweise nicht mehr rechtzeitig angepasst werden kann.

Wird im Vergleich zum Ausgangsszenario bei der regelbasierten Adaption die energieeffiziente Verzögerung nicht im Segel-, sondern im Schubbetrieb durchgeführt, können beim Expositionsanteil nur geringfügige Veränderungen festgestellt werden (s. Abbildung 5.11, Teil d). Das ist darauf zurückzuführen, dass auch für den Schubbetrieb die Fahrzeit des Ego-Fahrzeugs

mit guter Genauigkeit bestimmt werden kann und sich somit der optimale Zeitpunkt zur Verzögerung gut abschätzen lässt. Dagegen lassen sich aufgrund der veränderten Verzögerungsstrategie deutliche Unterschiede beim Streckenverbrauch feststellen. Durch die höhere Verzögerung im Schubbetrieb, die durch das Verlustmoment im Verbrennungsmotor hervorgerufen wird, muss eine längere Strecke bei konstanter Geschwindigkeit zurückgelegt werden. Das führt folglich zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Im Vergleich zur Strategie Bremsen liegt die Einsparung maximal bei ungefähr 50 %.

Um die Auswirkungen einer geringeren Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu untersuchen, wurde die Parametervariation für das Szenario einer Verzögerung von $v_1 = 70\text{ km/h}$ auf $v_2 = 50\text{ km/h}$ wiederholt (s. Abbildung 5.12).

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass hier die regelbasierte Adaptation nur in einem vergleichsweise kleinen Bereich zu einer Verbesserung des Expositionsanteils führt. Bei Startabständen bis zu 100 m und Wunschgeschwindigkeiten oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit kann der Expositionsanteil von Zeitlücken kleiner als 0,9 s um 0,3 bis 0,4 reduziert werden.

In diesem Bereich liegt die Kraftstoffeinsparung im Vergleich zur Strategie Bremsen bei 20 % bis 30 %, wobei eine maximale Einsparung von bis zu 54 % erreicht wird (s. Abbildung 5.12, Teil a). Im Fall einer Unterschätzung des Annäherungsverhaltens sind nur geringfügige Unterschiede zum Ausgangsszenario bei Expositionsanteil und Kraftstoffeinsparung zu erkennen (s. Abbildung 5.12, Teil b). Gleiches gilt für die Einschränkung der Sensorreichweite auf 80 m (s. Abbildung 5.12, Teil c). Hier verschlechtert sich lediglich oberhalb von 80 m der Nutzen hinsichtlich der Fahrsicherheit im Vergleich zum Ausgangsszenario. Wird anstatt im Segel- im Schubbetrieb verzögert, hat dies nur Auswirkungen auf die maximal mögliche Kraftstoffeinsparung, die in diesem Fall bei ungefähr 35 % liegt (s. Abbildung 5.12, Teil d).

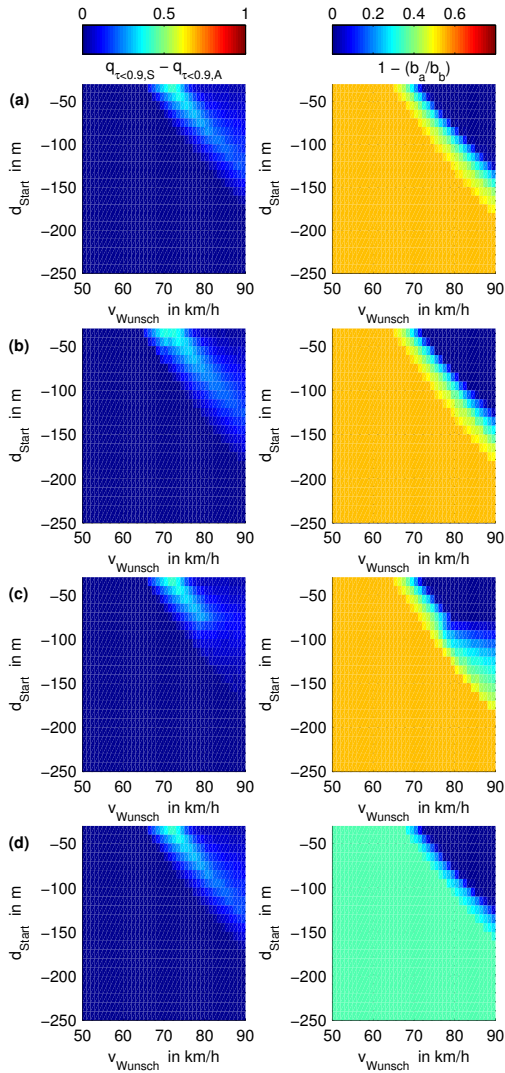


Bild 5.12: Ergebnisse der Parametervariation bei Verzögerung von 70 km/h auf 50 km/h: (a) Ausgangsszenario mit regelbasierter Adaption und Verzögerung im Segelbetrieb, (b) Unterschätzung des Verzögerungsverhaltens des nachfolgenden Fahrers, (c) Einschränkung der Sensorreichweite, (d) regelbasierte Adaption mit Verzögerung im Schubbetrieb

Insgesamt lässt sich festhalten, dass insbesondere bei großen Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, z.B. von 100 km/h auf 50 km/h, die regelbasierte Adaption zu einer Verbesserung der Fahrsicherheit im Vergleich zum reinen Segeln beitragen kann. Des Weiteren ermöglicht hier eine hohe Sensorreichweite, die Verzögerung rechtzeitig an die jeweilige Situation anzupassen. Eine Unterschätzung oder Verzögerung im Schub anstatt im Segelbetrieb scheinen geringere Auswirkungen auf den Nutzen zu haben. Bei kleineren Änderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, von 70 km/h auf 50 km/h, wird eine Verbesserung nur in einem wesentlich kleineren Bereich des Startabstandes und der Wunschgeschwindigkeit erzielt. Daneben haben hier Änderungen der Sensorreichweite oder die Unterschätzung des Verzögerungsverhaltens einen geringen bis keinen spürbaren Einfluss.

5.5 Zusammenfassung

Zur Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Fahrsicherheit und Energieeffizienz wurden in diesem Kapitel verschiedene Lösungsansätze vorgestellt. Die Lösungsansätze lassen sich den Kategorien Information, Kooperation und Adaption zuordnen. Der Ansatz der Information, bei dem nachfolgende Verkehrsteilnehmer über die Fahrweise und gegebenenfalls den Grund informiert werden, kann vergleichsweise einfach umgesetzt werden und trägt unmittelbar zu einer Erhöhung der Fahrsicherheit bei. Allerdings lassen erste Untersuchungen vermuten, dass Hinweise kontraproduktiv wirken und den nachfolgenden Fahrer provozieren. Auf den ersten Blick vielversprechender ist dagegen der Ansatz der Kooperation. Hier verfolgen alle Teilnehmer die gleiche Fahrstrategie, so dass es zu keiner negativen gegenseitigen Beeinträchtigung kommt. Aufgrund der noch nicht in ausreichender Anzahl verfügbaren Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ist dieser Lösungsansatz jedoch erst auf lange Sicht gesehen sinnvoll. Besser geeignet erscheint dagegen der Ansatz der Adaption.

Bei diesem Ansatz wird in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit und des Abstands zum nachfolgenden Fahrzeug die Ego-Fahrstrategie angepasst. Zur Umsetzung bedarf es im Vergleich zur Kooperation lediglich eines Sensors.

Daneben ist ein Fahrzeugfolgemedell erforderlich, um das zukünftige Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers abzuschätzen. Unter der Vielzahl von Fahrzeugfolgemedellen wurde das Intelligent Driver Model von Treiber ausgewählt, das die wesentlichen Effekte wie Frei- und Folgefahrt abbildet. Weitere Gründe für die Auswahl sind die geringe Anzahl und die mit physikalischer Bedeutung behafteten Parameter sowie das realistische Beschleunigungsverhalten.

Darüber hinaus wurden in diesem Kapitel zwei verschiedene Methoden zur Realisierung einer adaptierten Fahrstrategie vorgestellt. Bei der regelbasierten Adaption wird mithilfe einer Regel entschieden, ob zum Beispiel die aktuelle Geschwindigkeit gehalten oder im Segelbetrieb verzögert werden soll. Im Gegensatz dazu wird bei der optimierungsbasierten Adaption mit einem Optimierungsverfahren ein Geschwindigkeitsprofil bestimmt. Mithilfe von Gewichtungsfaktoren kann dabei entweder die Fahrsicherheit oder die Energieeffizienz höher gewichtet werden. Der optimierungsbasierte Ansatz bietet im Vergleich zum regelbasierten Ansatz mehr Freiheitsgrade. Dabei können relativ einfach verschiedene Fahrzustände wie Segel-, Schub- und Zugbetrieb oder die Rekuperation berücksichtigt werden. Als großer Nachteil erweisen sich jedoch die hohen Rechenressourcen, die für die Optimierung benötigt werden und auf automotiven Steuergeräten häufig nicht zur Verfügung stehen.

In der anschließenden Parameterstudie wurde deshalb das Verfahren der regelbasierten Adaption weiterverfolgt. Aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 4.2 lag der Fokus hierbei auf der Untersuchung von energieeffizienten Verzögerungsvorgängen. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere bei langen Verzögerungsphasen aus hoher Geschwindigkeit eine Verbesserung der Fahrsicherheit, das heißt des Expositionsanteils von Zeitlücken

$\tau < 0,9s$, herbeigeführt werden kann und dabei gleichzeitig so weit wie möglich Kraftstoff eingespart wird. Hinsichtlich einer Unterschätzung des Beschleunigungsverhaltens des nachfolgenden Fahrers zeigt sich das Verfahren vergleichsweise robust. Größeren Einfluss hat dagegen die Begrenzung der Sensorreichweite. Um auch Fahrzeuge, die einen größeren Abstand haben, frühzeitig bei der Wahl der Fahrweise berücksichtigen zu können, sind Reichweiten von 150 m wünschenswert. Für eine Geschwindigkeitsänderung von 70 km/h auf 50 km/h sind dagegen Reichweiten von 80 m ausreichend. Jedoch wird hier nur bei Wunschgeschwindigkeiten des nachfolgenden Fahrers, die höher als die zulässige Höchstgeschwindigkeit sind, eine Verbesserung durch die Adaption erzielt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch eine Adaption der Verzögerungsstrategie eine Verbesserung der Fahrsicherheit möglich ist und gleichzeitig der Kraftstoffverbrauch reduziert werden kann.

6 Validierung der regelbasierten Adaption im Fahrversuch

Die Ergebnisse der simulationstechnischen Untersuchungen zeigen, dass eine Adaption der Fahrstrategie an nachfolgende Fahrzeuge zu einer Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Energieeffizienz und Sicherheit beitragen kann. Ziel des folgenden Kapitels ist es, diese Ergebnisse mithilfe einer Messfahrtenstudie unter realen Bedingungen zu bestätigen. Dazu wurde in einem bestehenden Versuchsfahrzeug die Fahrstrategie zur energieeffizienten Verzögerung mit regelbasierter Adaption umgesetzt. Der Aufbau bzw. die Vernetzung der einzelnen Komponenten sowie die Ergänzungen am ACC werden in Abschnitt 6.1 erläutert. Danach wird genauer auf das Design der Studie eingegangen. Hierzu gehören unter anderem die Auswahl der Teststrecke sowie der Ablauf der Messfahrtenstudie. Im darauf folgenden Abschnitt erfolgt abschließend die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse.

6.1 Aufbau des Versuchsfahrzeugs

Als Versuchsfahrzeug kam wie in der vorangegangenen Studie der BMW 530d (E61) zum Einsatz (s. Anhang C). Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Aufbau des Fahrzeugs und das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten beschrieben. Danach folgen die Erläuterungen zur Umsetzung der energieeffizienten Verzögerungsstrategie in der bestehenden ACC Software.

6.1.1 Vernetzung der Komponenten

Das Versuchsfahrzeug ist wie in der vorherigen Studie mit zwei MRR rear Sensoren ausgerüstet, die hinter dem Stoßfänger verbaut sind und die Detektierung von nachfolgenden Fahrzeugen ermöglichen. Weiterhin verfügt das Fahrzeug über einen LRR3, der vorne unterhalb des Kühlergrills installiert ist (s. Abbildung 6.1). Der LRR3 dient zugleich als Steuergerät für die ACC Funktion und die Erweiterungen zur vorausschauenden Verzögerung vor Tempolimits.

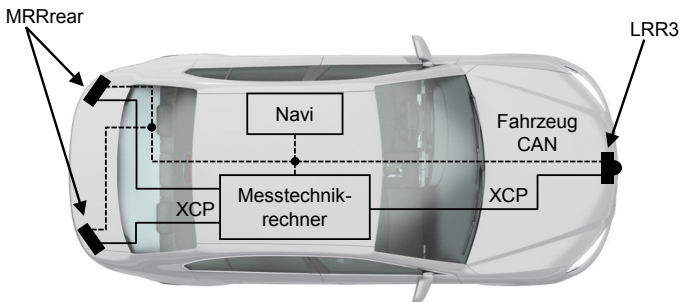


Bild 6.1: Vernetzung der Radarsensoren mit Navigationssystem und Messtechnikrechner

Abweichend davon ist der Algorithmus zur Adaption nicht auf dem Frontradar umgesetzt, da die Objektinformation der Hecksensoren nicht auf dem CAN zur Verfügung stehen. Stattdessen werden die erforderlichen Daten über ein sogenanntes Plug on Device (POD), welches über Ethernet bzw. dem Protokoll XCP¹ mit dem Messtechnikrechner verbunden ist, ausgelesen und auf dem Messtechnikrechner verfügbar gemacht. Als Messtechnik-Software kommt CANape von der Firma Vector Informatik zum Einsatz. Die Messtechnik-Software erlaubt mit geringem Aufwand, die als Matlab/Simulink Modelle vorliegende Objektauswahl und Adaption einzubinden. Das hat zudem den Vorteil, dass die bereits erstellten Modelle wieder

¹ XCP - Universal Measurement and Calibration Protocol

verwendet werden können. Das Ausgangssignal der Adaption wird dann auf gleiche Art und Weise über XCP auf den Frontradar (LRR3) übertragen und dort in der Fahrstrategie als Parameter zur Unterdrückung bzw. Freigabe der energieeffizienten Verzögerung eingelesen.

Darüber hinaus stellt das Navigationssystem den elektronischen Horizont zur Verfügung. Über den Fahrzeug-CAN werden mit dem bereits erwähnten ADASIS v2 Protokoll die vorausliegenden Geschwindigkeitsbegrenzungen und das Steigungsprofil an den Frontradar gesendet. Danach wird auf dem Frontradar mithilfe des Rekonstruktors der elektronische Horizont rekonstruiert und für die Fahrstrategie bereitgestellt. Auf Basis des aktuellen Horizontes entscheidet die Fahrstrategie, ob es beispielsweise sinnvoll ist, im Segelbetrieb zu verzögern und steuert entsprechend den Antriebsstrang an. Der linke Teil von Abbildung 6.2 zeigt den Kofferraum mit Messtechnikrechner und CAN Verteiler. Auf der rechten Seite sind aus Fahrersicht der Bildschirm des Messtechnikrechners mit HMI und das Navigationssystem dargestellt.

Im folgenden Abschnitt werden nun die notwendigen Ergänzungen des ACC Reglers erläutert. Eine weitere wichtige Ergänzung ist der Rekonstruktor. Jedoch wird hier nicht weiter auf die genaue Implementierung eingegangen, da sie nicht Inhalt dieser Arbeit ist. Der interessierte Leser wird an dieser Stelle auf das ADASIS Forum verwiesen (s. Abschnitt 2.2.5).



Bild 6.2: Abbildung links zeigt den Kofferraum mit Messtechnikrechner (links), Power Management (unten) und CAN Verteiler (rechts) [217]. Abbildung rechts zeigt aus Fahrersicht den Bildschirm des Messtechnikrechners mit HMI (mittig) und das Navigationssystem (rechts oben)[260]

6.1.2 Erweiterungen des ACC

Zur Einordnung und zum besseren Verständnis wird zunächst ein Überblick über die wesentlichen Komponenten der ACC Software gegeben. Danach wird genauer auf die Änderungen in der ACC Controller Function (ACF) eingegangen.

Subsysteme der Radarsoftware

Die Radarsoftware des LRR3 besteht aus mehreren Subsystemen (s. Abbildung 6.3). Ausgehend vom Subsystem Digital Signal Processing (DSP) wird die Radar Hardware (HW) angesteuert. Dazu gehört beispielsweise die Ansteuerung der Hochfrequenzschaltung zur Modulation der Frequenzrampen. Des Weiteren werden hier mithilfe einer Fourier Transformation die Frequenzspektren der empfangenden Signale berechnet, um im Ziel sogenannte Ortungen (engl.: locations) der im Sichtbereich liegenden Objekte zu bestimmen.

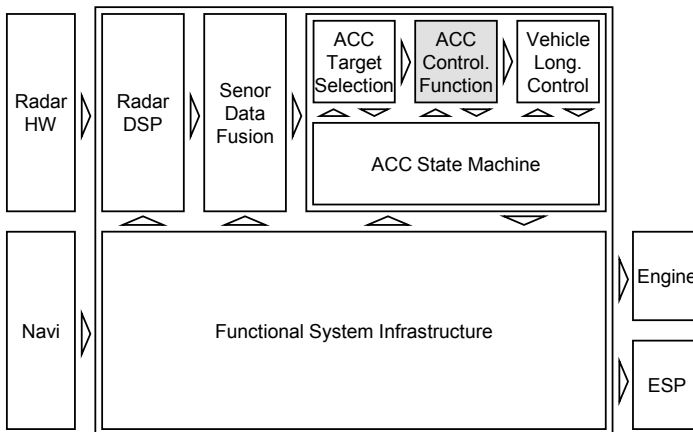


Bild 6.3: Subsysteme der Radarsoftware und deren Zusammenwirken

Im Subsystem Sensor Data Fusion (SDF) werden die Ortungen zu Objekten zusammengefasst. Neben dem Objektmodell, welches bis zu 32 Objekte detektiert, wird in diesem Subsystem auch ein Modell der Straße und des Ego-Fahrzeugs berechnet.

Auf Basis der 32 Objekte erfolgt im Subsystem ACC in der Komponente ACC Target Selection (ATS) die Auswahl des sogenannten ACC Zielobjektes. Die Komponente ACC Controller Function (ACF) bildet das eigentliche Regelungsverhalten ab und berechnet im Wesentlichen aus Abstand und Relativgeschwindigkeit des ACC Zielobjektes die Sollbeschleunigung. Wie bereits erwähnt, wurde in dieser Komponente auch die Fahrstrategie zur energieeffizienten Verzögerung umgesetzt. Der Fahrzeuglängsregler Vehicle Longitudinal Control (VLC) ist für die Ansteuerung von Motor und Bremse bzw. ESP² zuständig. Im VLC wird dazu auf Basis der Sollbeschleunigung des ACF das erforderliche Antriebsmoment und im Falle einer Bremsung die benötigte Bremsverzögerung bestimmt. Die Komponente ACC State-machine bestimmt den Zustand der ACC Funktion und bildet unter anderem das Ein- und Ausschaltverhalten ab. Beispielsweise wird hier bei Betätigung des Set-Buttons durch den Fahrer die ACC Funktion aktiviert und im Fall eines Fehlers diese wieder deaktiviert.

Für die Busanbindung (CAN) und Kommunikation mit Partnersteuergeräten wie ESP, Motor und Navigationsgerät ist das Subsystem Functional System Infrastructure (FSI) zuständig. Für die Nutzung des elektronischen Horizontes wurde hier auch der Rekonstruktor implementiert. Darüber hinaus ist das Subsystem FSI für die Themen Diagnose und Verwaltung von Systemressourcen, wie RAM³ und Rechenzeit, verantwortlich.

² ESP - Electronic Stability Control

³ RAM - Random Access Memory

ACC Controller Function

Die ACC Controller Function eines herkömmlichen ACC besteht aus 3 Reglerteilen (s. Abbildung 6.4). Dazu gehören der Folgeregler Follow Object Control (FOC), der Setzgeschwindigkeitsregler Set Speed Control (SSC) und der Kurvengeschwindigkeitsregler Curve Speed Control (CSC).

Basierend auf dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit des ATS Zielobjektes wird im FOC eine Sollbeschleunigung für die Folgefahrt und Annäherung bestimmt (a_{FOC}). Der SSC ist dagegen für die Regelung auf die Setzgeschwindigkeit zuständig. Die Sollbeschleunigung des SSC (a_{SSC}) bestimmt sich hauptsächlich aus der Differenz zwischen Ist- und Setzgeschwindigkeit. Der dritte Reglerteil, CSC, berechnet eine Sollbeschleunigung (a_{CSC}) zur Begrenzung der Querschleunigung bei Kurvenfahrt. Dadurch wird beispielsweise bei Verlust des Zielobjektes in einer engen Kurve eine Beschleunigung zurück auf die Setzgeschwindigkeit verhindert. Mithilfe des nachgelagerten Mixers wird aus den 3 Sollbeschleunigungen die relevante Sollbeschleunigung ausgewählt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um eine Minimumsauswahl. Das bedeutet, dass sich immer der Reg-

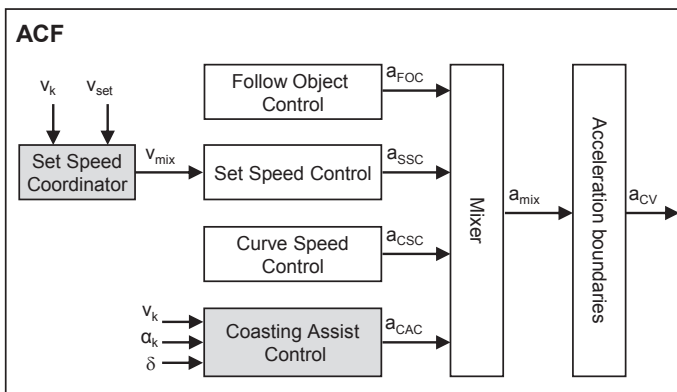


Bild 6.4: Aufbau der ACC Controller Function und hinzugefügte Module (grau)

ler mit der niedrigsten Beschleunigung durchsetzt. Fordert zum Beispiel der SSC $1,5\text{ m/s}^2$, um auf die Setzgeschwindigkeit zu beschleunigen, und der FOC -1 m/s^2 , um auf ein vorausfahrendes Fahrzeug zu verzögern, wird die Beschleunigung des FOC ausgewählt und der gewünschte Abstand eingeregelt. Im Modul Acceleration Boundaries (ABD) wird für gewisse Anwendungsfälle die ausgewählte Beschleunigung (a_{mix}) nochmals begrenzt und die Sollbeschleunigung (a_{cv}) für die Längsregelung (VLC) bestimmt. Für die Darstellung der Fahrstrategie zur energieeffizienten Verzögerung wurden zwei weitere Module hinzugefügt (siehe graue Module in Abbildung 6.4). Der Ausrollregler Coasting Assist Control (CAC) berechnet aus den Daten des elektronischen Horizontes, Verlauf der Geschwindigkeitsbegrenzungen (v_k) und Fahrbahnneigung (α_k), ob es erforderlich ist, im Schub- oder Segelbetrieb zu verzögern. Liegt ein Ausrollereignis vor, wird vom CAC die Ausrollbeschleunigung angefordert. Zur Realisierung der regelbasierten Adaption kann die energieeffiziente Verzögerung über das Signal δ unterdrückt werden. Daneben wurde mit dem Set Speed Coordinator (SSR) ein weiteres Modul hinzugefügt, das zum einen die Koordinierung zwischen Setzgeschwindigkeit vom Fahrer (v_{set}) und elektronischem Horizont (v_k) übernimmt. Zum anderen wird bei aktivierter automatisierter Längsführung vom SSR die Setzgeschwindigkeit prädiktiv erhöht oder verringert. Bei Annäherung an ein niedrigeres Tempolimit erhält der SSC somit rechtzeitig die neue Geschwindigkeit, um am Schild die erlaubte Geschwindigkeit zu erreichen. Ist das vorausliegende Tempolimit höher als das aktuelle Tempolimit, kann mithilfe des SSR auch ein früheres Hochbeschleunigen, welches beispielsweise häufig bei Ortsausgängen zu beobachten ist, realisiert werden.

6.2 Studiendesign

Das Design dieser Studie lehnt sich stark an die vorhergehende Studie aus Abschnitt 4.2 an, um eine gewisse Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Im Folgenden wird zunächst auf die Auswahl der Teststrecke und Fahrstrategien eingegangen. Danach wird genauer der Ablauf der Studie erläutert.

6.2.1 Teststrecke und Fahrstrategien

Aufgrund einer mehrwöchigen Vollsperrung von Juli bis September 2013 konnte zur Validierung der neuen Fahrstrategie mit regelbasierter Adaption die bereits bekannte Strecke zwischen Bebenhausen und Tübingen leider nicht herangezogen werden [3]. Stattdessen wurde nach einer Strecke gesucht, die vergleichbare Eigenschaften besitzt und den definierten Anforderungen aus Abschnitt 4.2.1 genügt [260, 309]. Nach einer Vorauswahl auf Basis von Kartendaten und einer Testfahrt stellte sich der Streckenabschnitt zwischen Weil der Stadt und Schafhausen (L1182) als geeignet heraus. Dieser Abschnitt hat eine Länge von ungefähr 2,7 km, wobei die maximal erlaubte Geschwindigkeit 100 km/h beträgt. Ähnlich wie vor Tübingen wird vor dem Ortseingang Schafhausen die erlaubte Höchstgeschwindigkeit in zwei Schritten auf 70 km/h und schließlich auf 50 km/h heruntergesetzt [260] (s. Abbildung 6.5).

Mit einem nahezu flachen Steigungsverlauf ähnelt die Strecke auch in diesem Punkt dem Abschnitt zwischen Bebenhausen und Tübingen. Erste Testfahrten zwischen Weil der Stadt und Schafhausen zeigten, dass auch hier die gefahrene Geschwindigkeit häufig unterhalb der erlaubten Höchstgeschwindigkeit liegt. Deshalb wurde zunächst wie in Tübingen (s. Abschnitt 4.2.1) innerhalb einer Vorstudie mithilfe mehrerer Messungen die mittlere gefahrene Geschwindigkeit für diesen Abschnitt ermittelt (s. Abbildung 6.5). Der Verlauf des Medians überschreitet im ersten Teil kurzzeitig die Geschwindigkeit von 95 km/h und nähert sich später auf 90 km/h an. Für den Kon-

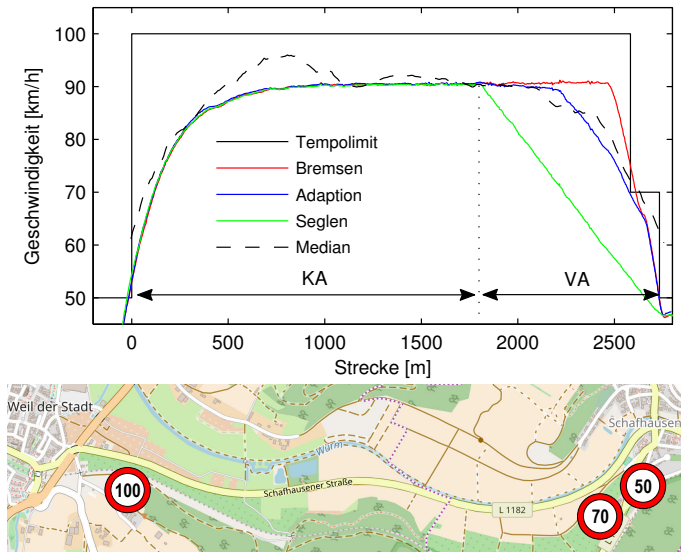


Bild 6.5: Die obere Abbildung zeigt den Verlauf der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zwischen Weil der Stadt und Schafhausen sowie den Verlauf der in der Vorstudie ermittelten mittleren Geschwindigkeit (Median). Außerdem wird der Geschwindigkeitsverlauf der Fahrstrategien dargestellt [260]. Die untere Abbildung zeigt den zugehörigen Kartenausschnitt mit Weil der Stadt (links) und Schafhausen (rechts) (Quelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende, <https://www.openstreetmap.org/copyright>, geändert am 19.01.2018).

stantfahrabschnitt (KA) wurde deshalb eine angezeigte Geschwindigkeit von 95 km/h gewählt [260].

Für den Verzögerungsabschnitt (VA) wurden als Referenz die Verzögerungsstrategien Segeln und Bremsen ausgewählt. Beide Strategien sollen bei der Analyse der Ergebnisse als Kontrollgruppen dienen. Die dritte und eigentlich zu evaluierende Verzögerungsstrategie ist die regelbasierte Adaption, bei der die energieeffiziente Verzögerung im Segelbetrieb erfolgt. Da im oben beschriebenen Versuchsfahrzeug der Segelbetrieb nur manuell durch den Gangwahlhebel erfolgen kann, wurde der Segelbetrieb simuliert.

Das bedeutet, dass die Fahrstrategie eine Beschleunigung an den Längsregler übermittelt, die einer Verzögerung im Segelbetrieb entspricht und die vom Längsregler eingeregelt wird. Bei der Auswertung des Kraftstoffverbrauches wird dieser Teil durch den Verbrauch im Leerlauf bzw. Segelbetrieb ersetzt, um einen realistischen Wert für die Energieeffizienz zu erhalten [260].

6.2.2 Ablauf

Der Ablauf ist stark an die Studie in Tübingen angelehnt. Auch hier wurden jeweils 30 gültige Fahrten pro Strategie durchgeführt. Damit die Bedingungen vergleichbar sind, wurden die Strategien, Bremsen, Adaption und Segeln, immer abwechselnd angewendet. Des Weiteren wurde wie bei der vorherigen Studie darauf geachtet, dass die Fahrten immer an regenfreien Tagen und bei Tageslicht erfolgten. Weiterhin wurden die Fahrten zur gleichen Tageszeit und nur an Werktagen durchgeführt [260]. Im Vergleich zur vorhergehenden Studie ist hier der Ego-Fahrer nicht für das Einleiten der Beschleunigung oder Verzögerung verantwortlich. Der Ego-Fahrer muss lediglich über die Messtechnik die entsprechende Fahrstrategie auswählen und das Abfahren erfolgt dann in Längsrichtung automatisch. Die Studie wurde im Zeitraum von August bis September 2013 im Rahmen der Diplomarbeit von Senyuez [260] und dem Praktikum von Weimer [309] durchgeführt.

6.3 Auswertung

Auch die Auswertung der Messergebnisse basiert auf der gleichen Methodik wie bei der vorhergehenden Studie (s. Abschnitt 4.2.3). Zunächst werden wieder die Bewertungsgrößen und Maßzahlen für alle Messungen bestimmt und die entsprechenden Verteilungen gebildet. Danach wird mithilfe von statistischen Test überprüft, ob sich die Lageparameter der Verteilungen signifikant unterscheiden. Zum Beispiel wird getestet, ob sich der Median

des Expositionsanteils ($q_{\tau < 0,9s}$) bei Anwendung der regelbasierten Adaption signifikant von den Fahrten mit Verzögerung im Segelbetrieb ohne Adaption unterscheidet. Da in den überwiegenden Fällen keine Normalverteilung vorliegt, kommen für die Auswertung der statistischen Signifikanz wieder nicht-parametrische Testverfahren zum Einsatz. Neben den Bewertungsgrößen zur Bestimmung der Fahrsicherheit wird in dieser Studie auch der Streckenverbrauch für jede Messung bestimmt. Das ist notwendig, da sich im Falle der Adaption die Fahrweise von Messung zu Messung unterscheidet.

6.4 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie vorgestellt und diskutiert. Um die Wirkungsweise der regelbasierten Adaption unter realen Bedingungen zu zeigen, wird zunächst auf die Ergebnisse einzelner Fahrten eingegangen (s. Abschnitt 6.4.1). Danach werden die Gesamtergebnisse hinsichtlich Fahrsicherheit und Energieeffizienz vorgestellt und erläutert (s. Abschnitt 6.4.2).

6.4.1 Einzelergebnisse

Die Ergebnisse in Abbildung 6.6 zeigen, dass sich bei Anwendung des Segelbetriebes ohne Adaption der nachfolgende Fahrer (grüne Linie) vergleichsweise schnell unter die kritische Schwelle von 0,9 s annähert. Dagegen kann bei Fahrten mit regelbasierter Adaption (magenta und blaue Linie) durch eine später eingeleitete Verzögerung der zeitliche Abstand (τ) über eine längere Strecke zwischen 2000 m und 2500 m gehalten oder sogar vergrößert werden. Als Schwelle für die Anwendung der Verzögerung im Segelbetrieb wurde eine Differenz zur Wunschfahrzeit (Δt_{Wunsch}) von 0,9 s definiert. Das bedeutet, wenn der geschätzte zeitliche Abstand des Ego-Fahrzeugs zum nachfolgenden Fahrzeug am Ende des Abschnittes größer als 0,9 s ist, wird die Verzögerung im Segelbetrieb eingeleitet.

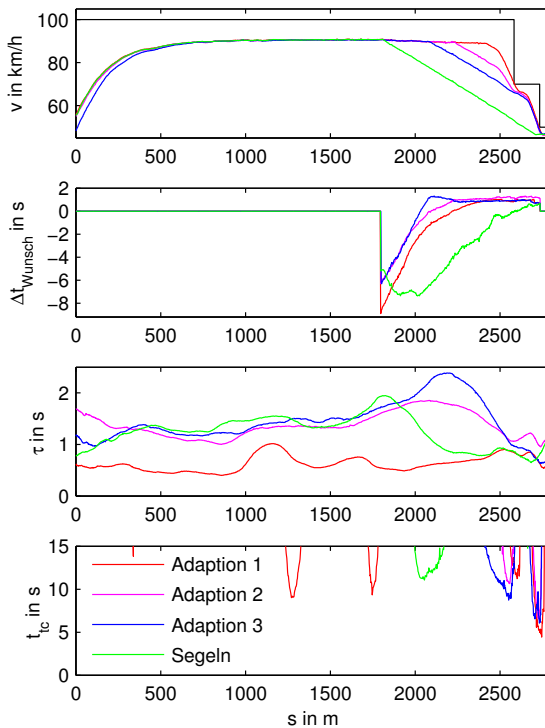


Bild 6.6: Beispielmessungen mit regelbasierter Adaption zwischen Weil der Stadt und Schafhausen

Im Fall der Messung Adaption 2 können Zeitlücken kleiner als 0,9 s während der gesamten Zeit vermieden werden. Dagegen wird bei der Fahrt Adaption 3 das Annäherungsverhalten bzw. Verzögerungsverhalten des nachfolgenden Fahrers offenbar unterschätzt (s. Abbildung 6.6). In diesem Fall nähert sich der nachfolgende Fahrer nach einer zunächst deutlichen Vergrößerung auf einen zeitlichen Abstand von unter 0,9 s an. Dieses Beispiel zeigt, dass bei Annahme eines immer gleichen Verzögerungsverhaltens in manchen Fällen kritische Zeitlücken nicht gänzlich vermieden werden kön-

nen. Dennoch ist durch die adaptierte Verzögerung eine Reduktion des Expositionsanteils mit kritischen Zeitlücken möglich. Fährt der nachfolgenden Fahrer wie im Beispiel Adaption 1 von Beginn an mit einer geringen Zeitlücke, wird durch die Adaption der Zeitpunkt der Verzögerung noch weiter nach hinten verschoben (s. Abbildung 6.6). Die Differenz zur Wunschfahrzeit zeigt, dass diese über einen längeren Zeitraum im negativen Bereich bleibt und sich nur langsam der Grenze von 0,9 s annähert. In diesem Beispiel kann mithilfe der Adaption die Zeitlücke nur geringfügig verbessert werden. Jedoch stellt sich die Frage, wie im Falle einer frühen Verzögerung im Segelbetrieb der nachfolgende Fahrer, der ja schon sehr dicht fährt, reagieren würde. Vermutlich würde der Fahrer noch dichter auffahren oder ein riskantes Überholmanöver starten. Deshalb ist davon auszugehen, dass sich hier zwar nicht die Bewertungsgrößen für die Fahrsicherheit verbessern, aber insgesamt doch die Fahrsicherheit erhöht wird, da eine provozierende Fahrweise vermieden wird. Bei Betrachtung der Time to Collision (t_{tc}) fällt auf, dass bei einer Verzögerung im Segelbetrieb nur vergleichsweise hohe Werte auftreten. Niedrigere Werte treten, wie auch schon bei der vorangegangenen Studie im Realverkehr zu beobachten war, bei Verzögerungen mit größeren Beschleunigungen auf. Hier kann es sinnvoll sein, die Verzögerung in mehrere Phasen aufzuteilen, um dem nachfolgenden Fahrer mehr Zeit zum Reagieren zu geben und niedrige TTC-Werte zu vermeiden. Die kritische Grenze von 5 s (s. Abschnitt 3.1) wird hier im Beispiel Adaption 1 erreicht. Inwieweit das auch für die anderen Messungen zutrifft, wird im nachfolgenden Abschnitt genauer untersucht.

6.4.2 Gesamtergebnis

Wie bereits erläutert, wurden für jede Fahrstrategie mindestens 30 gültige Messungen eingefahren. Die Gesamtzahl kann bei jeder Strategie leicht abweichen, da die endgültige Entscheidung, ob eine Messung gültig ist, erst bei der Auswertung möglich ist. Insgesamt fällt auf, dass bei einer vergleichsweise großen Anzahl die Messung ungültig ist (s. Tabelle 6.1).

Kategorie	Bremsen	Adaption	Segeln	Summe
Objekt erfasst	31	32	30	93
Objekt verloren	21	20	19	60
Überholt im VA	1	0	2	3
Überholt im KA	0	1	0	1
Ungültig	21	21	24	66
Summe	74	74	75	223

Tabelle 6.1: Aufteilung der durchgeführten Messfahrten zwischen Weil der Stadt und Schafhausen

Der Hauptgrund dafür ist die Behinderung durch langsamere vorausfahrende Fahrzeuge. Vom Startpunkt lässt sich die kurvige Strecke nicht einsehen und überprüfen, ob die Strecke frei ist oder sich ein langsames Fahrzeug darauf befindet. Die Anzahl der Überholvorgänge ist vergleichbar zum Fahrversuch bei Tübingen (s. Abschnitt 4.2) und kann vermutlich auch hier auf die schlechte Einsehbarkeit zurückgeführt werden.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für den Konstantfahrabschnitt (KA) fällt auf, dass die Maßzahlen keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Die p-Werte des Kruskal-Wallis und Median-Tests liegen immer oberhalb eines Signifikanzniveaus von 0,05. Das Fahrverhalten der nachfolgenden Fahrer scheint also grundsätzlich vergleichbar zu sein (s. Tabelle 6.2).

Im Verzögerungsabschnitt (VA) sind zwischen den verschiedenen Gruppen erwartungsgemäß deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei Anwendung der Strategie Segeln sinkt der Median des Zeitlückenmedians auf 0,77 s und

	Maßzahl	Einheit	Bremsen	Adaption	Segeln	PKW	PM
KA	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,29	1,27	1,35	0,87	0,87
	$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	0,83	0,97	0,78	0,58	0,08
	$\tilde{q}_{\tau < 1.8s}$	[1]	0,99	1,00 ₍₂₀₎	1,00 ₍₁₆₎	0,61	0,95
	$\tilde{q}_{\tau < 0.9s}$	[1]	0,10	0,00 ₍₂₁₎	0,04	0,17	0,11
	$\tilde{t}_{tc,min}$	[s]	19,32	27,22	26,40	0,14	0,06
	\tilde{b}_s	[l/100km]	8,61	8,57	8,59	0,91	0,93
VA	$\tilde{\tau}_{0,5}$	[s]	1,56	1,27***	0,77***	< 0,01	< 0,01
	$\tilde{\tau}_{min}$	[s]	1,04	0,73	0,51***	< 0,01	< 0,01
	$\tilde{q}_{\tau < 1.8s}$	[1]	0,79	1,00 ₍₂₂₎	1,00 ₍₂₁₎	< 0,01	0,95
	$\tilde{q}_{\tau < 0.9s}$	[1]	0,00 ₍₁₇₎	0,14***	0,67***	< 0,01	< 0,01
	$\tilde{t}_{tc,min}$	[s]	6,23	6,48***	9,25***	< 0,01	< 0,01
	\tilde{b}_s	[l/100km]	5,49***	4,10***	2,19***	< 0,01	< 0,01

Tabelle 6.2: Maßzahlen im Konstantfahrt- (KA) und Verzögerungsabschnitt (VA) zwischen Weil der Stadt und Schafhausen. (***) $p < 0,05$ oder (***) $p < 0,01$ für paarweisen Median-Test mit $H_0 : \tilde{x}_{Adaption} = \tilde{x}_{Segeln}$ oder $H_0 : \tilde{x}_{Segeln} = \tilde{x}_{Bremsen}$ oder $H_0 : \tilde{x}_{Bremsen} = \tilde{x}_{Adaption}$. Liegt der Median eines Anteils am Rand ($q = 0$ oder $q = 1$), wird hinter dem Median in Klammern die Anzahl der Bindungen des Medians angegeben.

liegt somit deutlich unter dem kritischen Wert von 0,9 s. Wird dagegen die Strategie mit regelbasierter Adaption angewendet, liegt der Median mit 1,27 s deutlich oberhalb dieser Grenze (s. Tabelle 6.2).

Dieser Unterschied ist auch bei den anderen Maßzahlen zu erkennen. Beispielsweise ist der Expositionsanteil $\tilde{q}_{\tau < 0,9s}$ im Mittel mit 0,14 wesentlich geringer im Vergleich zur Strategie Segeln mit 0,67. Bezüglich der Zeitlücke scheint die Anwendung der regelbasierten Adaption zu einer Erhöhung der Fahrsicherheit beizutragen, wohingegen sich das Verhältnis beim Median der minimalen Time to Collision umdreht. Hier liegt bei der Strategie Segeln mit 9,25 s im Vergleich zur regelbasierten Adaption mit 6,48 s und bei der Strategie Bremsen mit 6,23 s der Median deutlich darüber. Das bedeutet, dass sich die Time to Collision verschlechtert, wenn die Strategie Bremsen oder die regelbasierte Adaption angewendet wird. Jedoch stellt sich die Frage, inwieweit dadurch auch die Fahrsicherheit nennenswert beeinflusst wird.

Als sicherheitskritisch wird wie schon erläutert eine Time to Collision zwischen 3 s und 5 s gesehen (s. Abschnitt 3.1). Um der Frage nachzugehen, ob eine Abhängigkeit zwischen der angewendeten Strategie und dem Auftreten einer sicherheitskritischen Time to Collision besteht, wird für alle Strategien jeweils die Anzahl der Fahrten mit einer minimalen Time to Collision kleiner als 5 s und größer gleich 5 s ermittelt (s. Tabelle 6.3).

	Bremsen	Adaption	Segeln	Summe
$t_{tc,min} < 5s$	5	7	1	13
$t_{tc,min} \geq 5s$	26	25	29	80
Summe	31	32	30	93

Tabelle 6.3: Aufteilung der durchgeführten Messfahrten zwischen Weil der Stadt und Schafhausen nach Strategie und sicherheitskritischer Time to Collision ($t_{tc,min}$)

Die Ergebnisse der Kontingenztabelle 6.3 zeigen, dass bei der Strategie Bremsen und Adaption die kritische Grenze von 5 s bei 5 und 7 Fahrten unterschritten wird. Demgegenüber wird für den Fall der Verzögerung im Segelbetrieb nur bei einer Fahrt eine kritische Time to Collision erreicht. Der Chi-Quadrat-Test auf Unabhängigkeit kommt zu dem Ergebnis, dass bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ die Nullhypothese nicht abgelehnt wird und somit keine signifikante Abhängigkeit zwischen der gewählten Strategie und der Anzahl der kritischen Time to Collision besteht. Jedoch kann bei einem p-Wert von $p = 0,1$ von einer gewissen Tendenz ausgegangen werden. Die erhöhte Anzahl von kritischen Time to Collisions ist vermutlich auf die im Vergleich zur reinen Segelstrategie höhere Verzögerung kurz vor der Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auf 50 km/h zurückzuführen (s. Abbildung 6.6). Daraus lässt sich schließen, dass eine frühere Verzögerung empfehlenswert ist, um dem nachfolgenden Fahrer mehr Zeit für die Reaktion auf die Verzögerung zu verschaffen.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Energieeffizienz kann zusammengefasst werden, dass durch die Anwendung der regelbasierten Adaption der streckenspezifische Verbrauch im Mittel um 87 % im Vergleich zur Verzögerung im Segelbetrieb ansteigt. Im Vergleich zur Strategie Bremsen kann der Verbrauch im Mittel um 25 % gesenkt werden, wobei sich dabei die Fahrsicherheit nicht signifikant voneinander unterscheidet (s. Tabelle 6.2). Die Tests im Fahrzeug bestätigen die Ergebnisse der Simulation (s. Abschnitt 5.4), dass durch die Adaption der Fahrstrategie ein Kompromiss zwischen einer sicheren und energieeffizienten Fahrweise in Abhängigkeit des nachfolgenden Fahrers möglich ist. Abhängig vom Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers liegt der Verbrauch zwischen 3,16 l/100 km und 5,02 l/100 km (s. Abbildung 6.7).

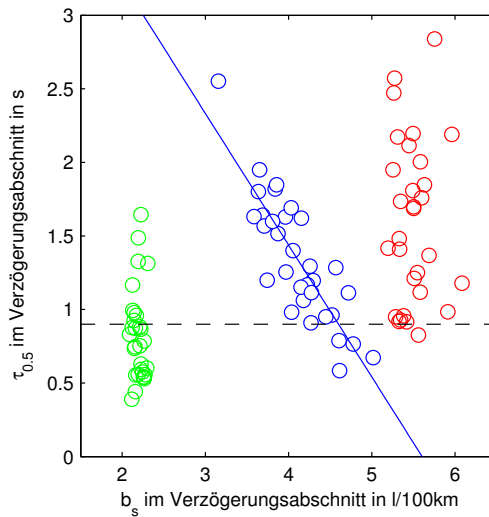


Bild 6.7: Gegenüberstellung des Kraftstoffverbrauches (b_s) und des Zeitlückenmedians ($\tau_{0,5}$) im Verzögerungsabschnitt (VA) für die Strategien Segeln (grün), Adaption (blau) und Bremsen (rot).

Des Weiteren ist in Abbildung 6.7 gut zu erkennen, dass mit regelbasierter Adaption der Kraftstoffverbrauch bei sinkender Zeitlücke ansteigt. Auch der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman kommt hier mit $\rho = -0,84$ zu einem negativen Ergebnis. Die Korrelation zwischen Kraftstoffverbrauch und Zeitlückenmedian ist dabei mit einem p-Wert von $p < 0,001$ hoch signifikant ($H_0 : \rho \geq 0$).

Wie auch schon in der vorangegangenen Studie wird neben der abschnittswweisen Betrachtung auch genauer auf den Verlauf der Zeitlücke eingegangen (s. Abschnitt 4.2.4). Dazu werden wieder alle Messungen in einem festen Raster abgetastet und zu jedem Abtastschritt der Median der Zeitlücke bestimmt (s. Abbildung 6.8).

Um eine Aussage über die statistische Signifikanz von Lageunterschieden bei den Zeitlückenverteilungen treffen zu können, wird des Weiteren wieder zu jedem Abtastschritt ein Signifikanztest durchgeführt. In Abbildung 6.8 wird oben der Verlauf der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs für die verschiedenen Strategien dargestellt.

Da sich bei der regelbasierten Adaption der Verlauf der Ego-Geschwindigkeit in Abhängigkeit des nachfolgenden Fahrers ändert und sich somit von Fahrt zu Fahrt unterscheidet, werden hier alle Messungen dargestellt. In der Mitte von Abbildung 6.8 sind die Verläufe der Zeitlückenmediane dargestellt. Hier fällt auf, dass im Konstantfahrabschnitt die Mediane nahe beieinander liegen. Dies wird auch durch die statistischen Tests bestätigt, die hier die Nullhypothese $H_0 : \tau_{0,5;Bremsen} = \tau_{0,5;Adaption} = \tau_{0,5;Segeln}$ nicht ablehnen. Erst im Verzögerungsabschnitt werden signifikante Unterschiede ersichtlich.

Wie erwartet sinkt zunächst die Zeitlücke bei Anwendung der Segelstrategie. Wenige Meter später lehnen der globale Kruskal-Wallis und der Median-Test die Nullhypothese ab. Fast gleichzeitig lehnt auch der zugehörige paarweise Test die Nullhypothese (H_0) ab. Die Zeitlücke sinkt dabei über eine lange Strecke unter die kritische Grenze von 0,9 s. Wenn dagegen die Strategie Adaption angewendet wird, verläuft die Zeitlücke auch im Verzöge-

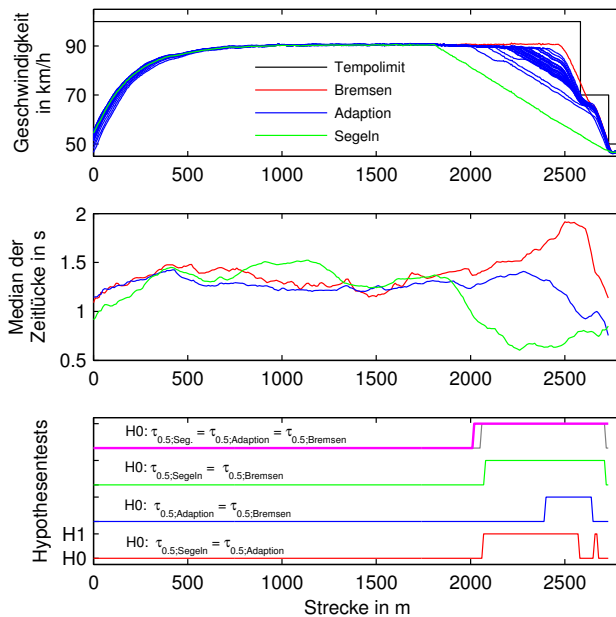


Bild 6.8: Verlauf des Medians der Zeitlücke zwischen Weil der Stadt und Schafhausen (Mitte). Geschwindigkeitsverlauf der Fahrstrategien [260] (oben) und Ergebnisse der Hypothesentests (unten) mit KW-Test (magenta) und alle anderen mit Median-Test (grau, grün, blau, rot).

rungsabschnitt auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Erst später, wenn verzögert werden muss, sinkt auch die Zeitlücke zum nachfolgenden Fahrzeug. Allerdings werden dauerhaft niedrige Zeitlücken wie bei Anwendung der reinen Segelstrategie vermieden.

Dies wird auch durch die paarweisen Median-Tests bestätigt. Der Test zwischen Segeln und Adaption lehnt annähernd gleichzeitig mit dem Test zwischen Segeln und Bremsen die Nullhypothese ab. Im Vergleich dazu lehnt der Test zwischen Adaption und Bremsen erst ungefähr 400 m später die Nullhypothese (H0) ab, wenn in den überwiegenden Fällen bei der regelbasierten Adaption die Verzögerung einsetzt. Im Vergleich zur Studie in

Tübingen fällt auf, dass gegen Ende des Streckenabschnittes die Zeitlückenmediane wieder aufeinander zulaufen. Offensichtlich bevorzugen die Fahrer hier eine andere Fahrweise. Beim Vergleich der jeweils in der Vorstudie ermittelten mittleren gefahrenen Geschwindigkeit fällt auf, dass am Schild (50 km/h) die Geschwindigkeit in Schafhausen höher ist als in Tübingen. Ähnlich wie auf der Strecke zwischen Stuttgart Vaihingen und Böblingen ist die Verzögerung auf die erlaubte Geschwindigkeit von 50 km/h anscheinend nicht nachvollziehbar bzw. kommt für viele nachfolgende Fahrer unerwartet.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Verläufe der Zeitlückenmediane die Ergebnisse für die abschnittweisen Betrachtungen bestätigen. Mithilfe der regelbasierten Adaption kann offensichtlich das Abstandsverhalten zum nachfolgenden Fahrer positiv beeinflusst werden.

6.5 Zusammenfassung

Um die Simulationsergebnisse der regelbasierten Adaption hinsichtlich der Fahrsicherheit zu bestätigen, wurde eine weitere Messfahrtenstudie im Realverkehr durchgeführt. Dazu wurde zunächst ein herkömmliches Serien-ACC System um eine vorausschauende energieeffiziente Verzögerungsstrategie erweitert. Die Umsetzung der regelbasierten Adaption erfolgte dagegen auf dem Messtechnikrechner des Versuchsfahrzeugs. Dadurch war es möglich, das Modell aus den vorangegangenen simulationstechnischen Untersuchungen ohne Änderungen einzubinden und den Implementierungsaufwand gering zu halten.

Aufgrund einer mehrwöchigen Streckensperrung konnte die Studie leider nicht auf dem Abschnitt zwischen Schafhausen und Tübingen durchgeführt werden. Daher wurde auf die Strecke zwischen Weil der Stadt und Schafhausen, die bezüglich ihrer Eigenschaften der Strecke in Tübingen ähnelt, zurückgegriffen. Neben der regelbasierten Adaption kamen als Referenzstrategien die Verzögerung im reinen Segel- und Bremsbetrieb zum Einsatz. Die

Ergebnisse der Studie zeigen, dass sich durch die Adaption der Fahrweise der zeitliche Abstand signifikant erhöht.

Beispielsweise liegt im Verzögerungsabschnitt der Expositionsanteil von Zeitlücken kleiner 0,9 s im Mittel mit 0,14 deutlich unter dem Wert für die Strategie Segeln mit 0,67. Auch der Median der Zeitlückenmediane ist beim Segeln mit 0,77 s deutlich kleiner als bei Fahrten mit regelbasierter Adaption, bei denen der Wert im Mittel bei 1,27 s liegt. Die angestrebte minimale Zeitlücke von 0,9 s kann dagegen im Mittel mit 0,77 s nicht ganz erreicht werden. Hier wird offensichtlich das Annäherungsverhalten des nachfolgenden Fahrers im Mittel etwas unterschätzt. Ein negativer Trend im Vergleich zum Segeln ist bei der minimalen Time to Collision zu erkennen. Hier liegt der Median mit 6,48 s unterhalb des Wertes für die Strategie Segeln mit 9,25 s.

Auch bei der Anzahl von Fahrten mit einer minimalen TTC kleiner als 5 s ist ein Unterschied zwischen den Strategien Segeln ($n = 7$) und regelbasierte Adaption ($n = 1$) zu erkennen. Allerdings kommt hier der Chi-Quadrat-Test zu dem Ergebnis, dass keine signifikante Abhängigkeit zwischen beiden Strategien und der Anzahl von minimalen TTC's kleiner als 5 s besteht. Dennoch kann bei diesem Ergebnis von einem gewissen Trend ausgegangen werden. Für diesen Trend wurden zwei mögliche Ursachen identifiziert. Vermutlich führt einerseits die vergleichsweise hohe Verzögerung dazu, dass der nachfolgende Fahrer weniger Zeit zum Reagieren hat und sich dadurch eine niedrige TTC aufbaut. Des Weiteren kommt hier anscheinend die rechtzeitige Einhaltung und dadurch erforderliche Verzögerung für den nachfolgenden Fahrer unerwartet. Hinweise dazu finden sich in der zuvor ermittelten mittleren gefahrenen Geschwindigkeit, die am Schild höher ist als die erlaubte Geschwindigkeit.

Der Kraftstoffverbrauch ist bei der regelbasierten Adaption abhängig vom Fahrverhalten des nachfolgenden Fahrers. Im Mittel liegt der Verbrauch im Verzögerungsabschnitt bei 4,1 l/100 km. Das bedeutet, dass sich der zeitliche Abstand im Vergleich zur Strategie Segeln erhöht und trotzdem ei-

ne Kraftstoffeinsparung im Vergleich zur Strategie Bremsen erzielt werden kann. Abschließend lässt sich also feststellen, dass bei der Verzögerung ein Kompromiss zwischen Fahrsicherheit und Energieeffizienz durch die regelbasierte Adaption möglich ist.

7 Zusammenfassung

Die Steigerung der Energieeffizienz und Verbesserung der Fahrsicherheit stellt die Automobilindustrie vor große Herausforderungen. Neben der Reduzierung der Fahrwiderstände und Optimierungen im Bereich des Antriebsstranges spielen Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung des Fahrers bei der Umsetzung einer vorausschauenden und energieeffizienten Fahrweise eine immer größere Rolle. Das Gleiche gilt für die Fahrsicherheit. Auch hier nimmt die Anzahl von Systemen der aktiven Sicherheit und insbesondere der Fahrerassistenz immer weiter zu. Bisherige Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine energieeffiziente Fahrweise in weiten Teilen auch zu einer Steigerung der Fahrsicherheit beiträgt. Gleiches gilt auch für Eco-Fahrerassistenzsysteme. Jedoch betrachten die Studien dabei überwiegend nur den Sicherheitsgewinn in Bezug zum vorausfahrenden und nicht hinsichtlich des nachfolgenden Fahrzeugs. Um dieser Frage weiter nachzugehen, wurde der Fokus dieser Arbeit auf die Untersuchung der Sicherheit bezüglich nachfolgender Fahrzeuge gelegt. Als weitere wissenschaftliche Fragestellung sollte untersucht werden, ob sich ein Konflikt zwischen einer energieeffizienten und einer sicheren Fahrweise durch geeignete Maßnahmen optimieren lässt.

Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden zunächst zwei Studien im Realverkehr durchgeführt. Die erste Studie hatte dabei zum Ziel, den Einfluss eines Eco-ACC Systems, welches im Wesentlichen eine energieoptimierte Fahrweise insbesondere im Folgebetrieb umsetzt, zu untersuchen. Neben einem Frontradarsensor für die Eco-ACC Funktion wurde ein nach hinten gerichteter Radarsensor für die Messung des Abstandes und der Re-

lativgeschwindigkeit zu nachfolgenden Fahrzeugen eingesetzt. Die Fahrten fanden auf einem dafür definierten Rundkurs statt. Zum anschließenden Vergleich fuhren die Probanden neben der Fahrt mit aktivierten Eco-ACC ein weiteres Mal den Rundkurs ohne Assistenzsystem sowie bei verschiedenen Verkehrszeiten. Fuhren die Probanden mit aktiviertem Eco-ACC, reduzierte sich der Median der mittleren Zeitlücke der nachfolgenden Fahrzeuge im Vergleich zur manuellen Fahrt um ungefähr 10 % bis 20 %. Durch die leichte Reduzierung der Zeitlücke kann von keiner nennenswerten Beeinträchtigung der Fahrsicherheit ausgegangen werden, jedoch ist ein gewisser Trend erkennbar.

Aus diesem Grund wurde eine weitere Studie durchgeführt, die zum Ziel hatte, den Einfluss auf die Fahrsicherheit von Fahrstrategien mit einem größeren Vorausschauhorizont zu untersuchen. Aufgrund der großen Abweichung von der üblicherweise gefahrenen Geschwindigkeit bei einer Verzögerung im Segel- und Schubbetrieb wurde der Einfluss der energieeffizienten Verzögerung vor einer Geschwindigkeitsbegrenzung untersucht. Als Referenz diente in dieser Studie die Verzögerung über die hydraulische Bremse. Im Vergleich zur vorhergehenden Studie ist bei der Anwendung des Segel- und Schubbetriebes ein signifikanter Unterschied beim Abstandsverhalten im Vergleich zur Referenzstrategie Bremsen zu erkennen. Beispielsweise steigt bei der Verzögerung im Segelbetrieb im Vergleich zur Referenz der Expositionsanteil von Zeitlücken kleiner als 0,9 s im Mittel von 0 % auf 25 %. Das bedeutet, dass bei einer Verzögerung im Segelbetrieb die nachfolgenden Fahrzeuge im Mittel 25 % der Fahrzeit unterhalb des kritischen zeitlichen Abstandes von 0,9 s fuhren. Bei der Time to Collision sind dagegen die Unterschiede nicht signifikant und in einem nicht kritischen Bereich. Das deutet daraufhin, dass keine akute Gefährdung der Fahrsicherheit vorliegt, aber dennoch die potenzielle Gefahr eines Auffahrunfalls durch die Reduzierung des Abstandes besteht. Eine energieeffiziente Verzögerung kann also folglich im Konflikt mit der Fahrsicherheit stehen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse beschäftigten sich die darauffolgenden Kapitel mit der Fragestellung, ob durch eine geeignete Maßnahme dieser Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Sicherheit entschärft werden kann. Dazu wurden zunächst drei verschiedene Lösungsansätze vorgestellt und bewertet. Zu den Lösungsansätzen gehören die Information, Kooperation und Adaption. Das Konzept der Information sieht vor, den nachfolgenden Fahrer über die Ego-Fahrweise zu informieren. Hier sind vielfältige Möglichkeiten von einem einfachen Schild, über Hinweislampen ähnlich wie das Bremslicht bis hin zur Übertragung von Hinweisen über eine Car-to-Car-Kommunikation denkbar. Jedoch ist unsicher, ob durch diesen Ansatz eine Verbesserung erzielbar ist. Erste Studien deuten drauf hin, dass nachfolgende Fahrer durch den Hinweis auf eine energieeffiziente Fahrweise eher zu einer riskanten Fahrweise provoziert werden. Vielversprechender ist dagegen das Konzept der Kooperation. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass eine große Anzahl von Fahrzeugen über eine Car-to-Car-Kommunikation verfügt und dadurch alle Fahrzeuge eine gemeinsame Fahrstrategie automatisiert ausführen können. Langfristig ist diese Lösung hin zum automatisierten Fahren sicher die wirkungsvollste Methode, um die Sicherheit und Energieeffizienz zu optimieren. Jedoch wird kurz und mittelfristig in vielen Fahrzeugen keine Car-to-Car-Kommunikation und automatisierte Längsführung zur Verfügung stehen, so dass hier der Nutzen zunächst gering sein wird. Aus diesem Grund wurde der Ansatz der Adaption entworfen, der in Abhängigkeit des Fahrverhaltens des nachfolgenden Fahrzeugs die Ego-Fahrstrategie anpasst. Dabei wird mithilfe eines geeigneten Sensors der Bereich hinter dem Ego-Fahrzeug überwacht und der Abstand sowie die Relativgeschwindigkeit zu nachfolgenden Fahrzeugen gemessen. Die Anpassung der Ego-Fahrstrategie kann dabei entweder über die Anpassung der Fahrerhinweise oder direkt in der Fahrstrategie bzw. automatisierten Längsführung erfolgen. Im Vergleich zu den anderen Lösungsansätzen hat die Methode der Adaption den Vorteil, dass der Nutzen für den einzelnen Fahrer direkt spürbar wird. Das heißt, der Fahrer ist nicht wie beim

kooperativen Ansatz auf eine hohe Ausstattungsrate bei anderen Fahrzeugen angewiesen. Aufgrund der oben erläuterten Gründe wurden die weiteren Untersuchungen auf den Lösungsansatz der Adaption fokussiert.

Nach der Ableitung und Auswahl des Lösungsansatzes folgten im nächsten Schritt Überlegungen zur Umsetzung der Adaption. Ein wichtiger Bestandteil der Adaptionstrategie ist die Möglichkeit zur Abbildung und Prädiktion des Folgeverhaltens des nachfolgenden Fahrers. Um eine Prädiktion des Folgeverhaltens zu ermöglichen, wurden verschiedene aus der Literatur bekannte Fahrzeugfolgemodelle hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Aufgrund seiner Eigenschaften fiel die Auswahl auf das Intelligent Driver Model (IDM) von Treiber. Auf Basis des Fahrzeugfolgmodells wurden des Weiteren verschiedene Algorithmen vorgestellt, die eine Adaption der Fahrstrategie an das Fahrverhalten von nachfolgenden Fahrzeugen ermöglichen. Bei der sogenannten regelbasierten Adaption wird mit einem Satz von Regeln entschieden, wann eine Anpassung der Ego-Fahrstrategie wegen eines zum Beispiel mit hoher Differenzgeschwindigkeit herannahenden Fahrzeugs erforderlich ist. Im Gegensatz dazu wird bei der optimierungsbasierten Adaption nicht für oder gegen eine energieeffiziente Fahrstrategie entschieden, sondern mithilfe einer Kostenfunktion ein optimaler Verlauf für die Ego-Fahrzeuggeschwindigkeit gebildet. In Abhängigkeit dessen, wie die Gewichtungsfaktoren der Kostenfunktion gewählt werden, ist das Resultat der Optimierung ein eher sicheres oder energieeffizientes Geschwindigkeitsprofil. Ein großer Nachteil dieses Verfahrens sind jedoch die benötigten Rechen- und Speicherressourcen, die den Einsatz auf automotiven Steuergeräten wegen der begrenzten Kapazitäten erschweren. Um das Konzept der Adaption auch im Fahrversuch unter realen Bedingungen erproben zu können, wurde deshalb der regelbasierte Ansatz der Adaption weiterverfolgt.

Aufgrund des großen zeitlichen Aufwands für Messfahrten im Realverkehr wurde zunächst eine simulationstechnische Parameterstudie durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Parameter wie Startabstand und Wunschgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs variiert. Weitere Parameter wa-

ren die Sensorreichweite sowie die Art der Verzögerungsstrategie und die Geschwindigkeitsänderung des Tempolimits. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der regelbasierten Adaption in weiten Bereichen die Fahrsicherheit im Vergleich zur reinen Strategie Segeln erhöht werden kann. Gleichzeitig wird im Vergleich zur Strategie Bremsen eine Kraftstoffeinsparung erzielt. Besonders großen Einfluss auf die Änderung der Fahrsicherheit hat zum einen die Sensorreichweite und zum anderen die Änderung der Geschwindigkeitsbegrenzung. Bei einer Reduktion der Sensorreichweite auf 80 m wird der Nutzen hinsichtlich Fahrsicherheit eingeschränkt. In diesem Fall kann bei größeren Startabständen erst zu spät reagiert werden. Um einen nennenswerten Nutzen zu erzielen, ist daher eine Sensorreichweite von 150 m wünschenswert. Wird dagegen die Änderung der Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h auf 20 km/h reduziert, ist der Vorteil bei der Fahrsicherheit bei Anwendung der regelbasierten Adaption nur noch gering. Unterschätzungen des Verzögerungsverhaltens von nachfolgenden Fahrern haben dagegen keinen erheblichen Einfluss auf die Veränderung bei der Fahrsicherheit und Energieeffizienz.

Um die positiven Ergebnisse aus der Simulation zu stützen, wurde abschließend die regelbasierte Adaption im realen Fahrversuch erprobt. Dazu wurde das Standard ACC um eine energieeffiziente Verzögerungsstrategie, die auf elektronischen Kartendaten basiert, erweitert. Für die Darstellung der regelbasierten Adaption wurde auf das Modell, das auch für die Parametervariation verwendet wurde, zurückgegriffen und über die Messtechnikumgebung an den Radarsensor angebunden. Zur besseren Vergleichbarkeit orientierte sich der Ablauf der Studie und die Auswahl der Teststrecke an der vorangegangenen Studie im Realverkehr. Die Ergebnisse zeigen, dass auch im Realverkehr durch die regelbasierte Adaption eine Verbesserung der Fahrsicherheit erzielt werden kann. Der Expositionsanteil mit Zeitlücken kleiner als 0,9 s unterscheidet sich im Mittel mit 14 % bei Anwendung der Adaption signifikant von der Verzögerung im Segelbetrieb mit 67 %.

Durch die Adaption der Fahrweise wird eine deutliche Erhöhung des Kraftstoffverbrauches auf 4,1 l/100km von 2,19 l/100km im reinen Segelbetrieb hervorgerufen. Im Vergleich zur Strategie Bremsen mit 5,49 l/100km wird aber dennoch im Mittel eine Kraftstoffeinsparung von 25 % erzielt, ohne eine Verschlechterung bei der Fahrsicherheit, das bedeutet beim Abstandsverhalten, in Kauf nehmen zu müssen.

Im Gegensatz zur ersten Studie ist bei der Time to Collision eine Verschlechterung zu erkennen. Das bedeutet, dass sich hier im Mittel die minimale TTC signifikant von 9,25 s bei der Strategie Segeln auf 6,48 s bei der regelbasierten Adaption verringert. Bei der Unterschreitung der kritischen Grenze von 5 s ist der Unterschied zwischen beiden Strategien nicht signifikant, allerdings kann hier von einem negativen Trend gesprochen werden. Um diesen negativen Trend entgegenzuwirken, wird daher vorgeschlagen, die Verzögerung langsamer aufzubauen, damit der nachfolgende Fahrer mehr Zeit zur Reaktion hat.

Insgesamt kann also zusammengefasst werden, dass eine energieeffiziente Fahrweise zu einem sicherheitskritischen Abstandsverhalten von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern führen kann. Weiterhin zeigt der Test im Realverkehr, dass die entworfene regelbasierte Adaption eine geeignete Maßnahme ist, um die Fahrsicherheit zu verbessern und den Zielkonflikt mit der Energieeffizienz zu entschärfen. Dennoch bleiben Fragen unbeantwortet, die genügend Raum für weiterführende Untersuchungen geben.

8 Ausblick

Bei den Untersuchungen zum Einfluss von energieeffizienten Fahrstrategien auf die Fahrsicherheit konnte aus Zeitgründen nur eine begrenzte Anzahl von Fahrten im Realverkehr durchgeführt werden. Hier ist es sinnvoll, die Untersuchungen auch auf andere Fahrstrategien wie beispielsweise das Sägezahnverfahren oder die Ausnutzung der Topografie auszuweiten. Unbeantwortet ist bisher auch die Frage, wie sich unterschiedliche Streckeneigenschaften wie zum Beispiel die Vorhersehbarkeit, Verkehrsdichte und Anzahl der Fahrspuren auswirken. Des Weiteren wurden die Studien nur in einem bestimmten Umkreis durchgeführt und geben daher keinerlei Auskunft über die Übertragbarkeit auf andere Regionen oder gar Länder. Um die Repräsentativität der Ergebnisse zu erhöhen, wären demnach Langzeitmessungen in verschiedenen Regionen notwendig. Des Weiteren wurden in den Studien keine Erhebungen hinsichtlich des Empfindens und Befindens sowie der Demografie von nachfolgenden Fahrern durchgeführt. Diese zusätzlichen Ergebnisse können dazu genutzt werden, um beispielsweise neue Maßnahmen zur Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen Sicherheit und Energieeffizienz abzuleiten.

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten bestehen bei der Prädiktion des Fahrverhaltens des nachfolgenden Fahrzeugs, um eine genauere Adaption der Ego-Fahrstrategie durchführen zu können. Bei der in dieser Arbeit umgesetzten Prädiktion werden alle nachfolgenden Fahrer mit dem gleichen Parametersatz abgebildet. Das führt dazu, dass manche Fahrer in ihrem Fahrverhalten entweder über- oder unterschätzt werden. An dieser Stelle könnte ein adaptives Modell zum Einsatz kommen, das während der Fahrt die Pa-

parameter in Abhängigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs lernt und somit das Fahrverhalten genauer präzisieren kann.

Offene Fragestellungen existieren auch im Hinblick auf die optimierungsbasierte Adaption. Durch eine Verbesserung der Echtzeitfähigkeit der Optimierungsverfahren würde der Einsatz auf automotiven Steuergeräten ermöglicht. Dadurch bestünde des Weiteren die Möglichkeit eine aufwendigere Adaption der Fahrstrategie zu ermöglichen. Dazu gehören beispielsweise Optimierungen entlang eines größeren Vorausschauhorizontes, Berücksichtigung von weiteren Fahrzuständen wie Beschleunigung und Konstantfahrt, Berücksichtigung von weiteren Antriebsmodi wie die Rekuperation sowie die Erweiterung der Optimierungskriterien um beispielsweise den Komfort. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch im Hinblick auf die untersuchten Konzepte zur Optimierung des Zielkonfliktes zwischen Sicherheit und Energieeffizienz. Wie bereits erläutert, ist längerfristig der Ansatz der Kooperation zielführend. Hier stellt sich unter anderem die Frage, wie ein globales Optimum für die Sicherheit und Energieeffizienz für mehrere Fahrzeuge bestimmt werden kann.

Auch wenn erste Studien darauf hinweisen, dass das Konzept der Information eher ein entgegengesetztes Verhalten bei nachfolgenden Verkehrsteilnehmern hervorruft, sollten hier weitere Untersuchungen angestellt werden. Beispielsweise ist bisher unbeantwortet, ob auch eine situationsabhängige Information zu einem unerwünschten Verhalten führt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die vorgeschlagenen Lösungsansätze zu kombinieren. Ein denkbare Beispiel für eine Kombination wäre die Adaption des Fahrverhaltens und die gleichzeitige Information des nachfolgenden Fahrers.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass energieeffizientes Fahren nicht immer im Einklang mit der Fahrsicherheit steht. Bei der Entwicklung neuer Fahrstrategien und neuer Fahrerassistenzsysteme ist es deshalb wünschenswert, die Fahrsicherheit insbesondere im Hinblick auf die nachfolgenden Verkehrsteilnehmer mit zu berücksichtigen.

A Statistische Tests

In den folgenden Abschnitten werden die in dieser Arbeit verwendeten statistischen Tests erläutert. Auf den Vorzeichentest wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da er bereits in Abschnitt 4.1.3 ausführlich behandelt wurde. Die folgenden Erläuterungen wurden sinngemäß aus [78] übernommen und zusammengefasst.

A.1 Median-Test für 2 unabhängige Stichproben

Der Median-Test ist ein nicht-parametrischer Test, um den Median von unabhängigen Stichproben zu vergleichen. Die Nullhypothese (H_0) geht davon aus, dass die Mediane beider Stichproben gleich sind. In diesem Abschnitt wird der Median-Test für 2 unabhängige Stichproben vorgestellt. Dazu wird im ersten Schritt aus beiden Stichproben der gemeinsame Median (\tilde{z}) bestimmt. Mithilfe des gemeinsamen Medians wird danach eine 2×2 Kontingenztafel aufgestellt (s. Tabelle A.1).

	Stichprobe 1	Stichprobe 2	Σ
$\leq \tilde{z}$	$h_{1,1}$	$h_{1,2}$	h_{R1}
$> \tilde{z}$	$h_{2,1}$	$h_{2,2}$	h_{R2}
Σ	h_{S1}	h_{S2}	N

Tabelle A.1: 2×2 Kontingenztafel für den Median-Test mit 2 Stichproben

Zur Überprüfung, ob eine Abhängigkeit besteht bzw. ob sich die Häufigkeiten signifikant unterscheiden, kann entweder der Chi-Quadrat-Test auf Unabhängigkeit oder der Exakte Test nach Fisher herangezogen werden. Beim

Median-Test für 2 Stichproben wird der Exakte Test nach Fisher verwendet, da dieser nicht auf eine Approximation zurückgreift und die p-Werte daher direkt bestimmen kann. Aus diesem Grund ist der exakte Test nach Fisher auch für kleine Stichproben geeignet. Die Teststatistik des Fisher-Tests entspricht der Wahrscheinlichkeitsfunktion einer hypergeometrischen Verteilung, die sich aus den Randhäufigkeiten der Kontingenztabelle ergibt (s. Gleichung A.1).

$$P(X = x) = \frac{\binom{h_{R1}}{x} \binom{h_{R2}}{h_{S1}-x}}{\binom{N}{h_{S1}}} \quad (\text{A.1})$$

Für den zweiseitigen Test bestimmt sich der p-Wert aus der Summe aller Wahrscheinlichkeiten für x von 0 bis $\min(h_{S1}, h_{R1})$ für die gilt $P(x) \leq P(h_{1,1})$. Die Nullhypothese gleicher Mediane wird abgelehnt, wenn $p < \alpha$.

A.2 Median-Test für k unabhängige Stichproben

Der Median-Test für k unabhängige Stichproben funktioniert wie der Median-Test für 2 Stichproben. Der einzige Unterschied ist, dass der Chi-Quadrat-Test auf Unabhängigkeit zum Einsatz kommt. Für beispielsweise 3 Stichproben ($k = 3$) hat die Kontingenztabelle eine 2 x 3 Form (s. Tabelle A.2).

	Stichprobe 1	Stichprobe 2	Stichprobe 3	Σ
$\leq \tilde{z}$	$h_{1,1}$	$h_{1,2}$	$h_{1,3}$	h_{R1}
$> \tilde{z}$	$h_{2,1}$	$h_{2,2}$	$h_{2,3}$	h_{R2}
Σ	h_{S1}	h_{S2}	h_{S3}	N

Tabelle A.2: 2 x 3 Kontingenztabelle für den Median-Test mit 3 Stichproben ($k = 3$)

Die Teststatistik wird anhand den beobachteten ($h_{i,j}$) und den erwarteten Häufigkeiten ($h_{i,j}^e$) berechnet (s. Gleichung A.2), wobei sich die erwarteten Häufigkeiten aus den Randhäufigkeiten h_{Sj} und h_{Ri} bestimmen lassen (s. Gleichung A.3).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^k \frac{(h_{i,j} - h_{i,j}^e)^2}{h_{i,j}^e} \quad (\text{A.2})$$

$$h_{i,j}^e = \frac{h_{Sj} \cdot h_{Ri}}{N} \quad (\text{A.3})$$

Die Nullhypothese gleicher Mediane wird abgelehnt, wenn die Teststatistik größer ist als die Inverse der Chi-Quadrat Verteilung für $1 - \alpha$ und $k - 1$ (s. Gleichung A.4).

$$\chi^2 \geq \chi_{1-\alpha; n-1}^2 \quad (\text{A.4})$$

A.3 Kruskal-Wallis-Test für k unabhängige Stichproben

Der Kruskal-Wallis-Test ist wie der Median-Test ein nicht parametrischer Test zum Vergleich von k Stichproben. Im Gegensatz zum Median-Test stellt er allerdings höhere Anforderungen an die Verteilungen der Stichproben. Um nur auf Lageunterschiede zu testen, wird beim KW-Test vorausgesetzt, dass die Verteilungen die gleiche Form besitzen. Im Gegenzug liefert der Kruskal-Wallis-Test dafür eine höhere Teststärke als der Median-Test und reagiert empfindlicher auf Lageunterschiede bei den Verteilungen.

Die Nullhypothese (H0) des Kruskal-Wallis-Test geht davon aus, dass alle Verteilungen der gleichen Grundgesamtheit entstammen und die gleiche Verteilungsform besitzen. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich bei der Alternativhypothese (H1) zwei Verteilungen mindestens in der Lage.

Für die Berechnung der Teststatistik müssen beim KW-Test im ersten Schritt alle k Stichproben in einer gemeinsamen Stichprobe zusammengefasst und vom niedrigsten zum höchsten Wert sortiert werden. Danach wird jeder Realisierung der gemeinsamen Stichprobe ein eindeutiger Rang zugewiesen. Treten Bindungen auf, das heißt sind in der Stichprobe mehrere gleiche

Werte vorhanden, wird diesen jeweils der Durchschnittsrang zugewiesen. Wenn die Ränge bekannt sind, kann im nächsten Schritt für jede Stichprobe die Rangsumme $r_{i,sum}$ bestimmt werden. Auf Basis der Rangsummen kann danach die Teststatistik (H) berechnet werden (s. Gleichung A.5).

$$H = \left(\frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{r_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \quad (\text{A.5})$$

Liegen Bindungen vor, muss die Teststatistik (H_{Korr}) korrigiert werden. Dabei wird für die gesamte Anzahl von Werten, für die Bindungen vorliegen (B), die jeweilige Anzahl der Bindungen in einer Gruppe (l_b) berücksichtigt (s. Gleichung A.6).

$$H_{korr} = H \cdot \left(1 - \frac{\sum_{b=1}^B (l_b^3 - l_b)}{N^3 - N} \right)^{-1} \quad (\text{A.6})$$

Die Nullhypothese (H_0) ist abzulehnen, wenn H_{korr} bzw. $H \geq \chi_{1-\alpha; k-1}^2$.

B Radarsensoren

B.1 Bosch LRR3



Bild B.1: Bosch Long Range Radar der 3. Generation (LRR3) (Quelle: Bosch)

Merkmal	Einheit	Wert
Frequenzbereich	GHz	76 - 77
Detektionsbereich	m	0,5 - 250
Maximaler Öffnungswinkel	°	30
Modulation	-	FMCW
Max. Anzahl detektierter Objekte	1	32
Abmessungen (B x H x T)	mm	74 x 77 x 58
Gewicht	g	285
Leistungsaufnahme	W	4

Tabelle B.1: Technische Daten des Bosch Long Range Radars der 3. Generation (LRR3) [47]

B.2 Bosch MRR rear



Bild B.2: Bosch Mid Range Radar für Heckenwendungen (MRR rear) (Quelle: Bosch)

Merkmal	Einheit	Wert
Frequenzbereich	GHz	76 - 77
Detektionsbereich	m	0,36 - 80
Maximaler Öffnungswinkel	°	150
Modulation	-	FMCW
Max. Anzahl detektierter Objekte	1	32
Abmessungen (H x B x T)	mm	70 x 60 x 30
Gewicht	g	190
Leistungsaufnahme	W	4,5

Tabelle B.2: Technische Daten des Bosch Mid Range Radars für Heckenwendungen (MRR rear) [50, 51]

C Versuchsfahrzeuge

	Parameter	Einheit	E61 (2005)	E60 (2007)
Karosserie	L/B/H	mm	4843/1846/1491	4841/1846/1468
	Radstand	mm	2886	2888
	Spurweite v/h	mm	1558/1581	1558/1581
	Tankinhalt	l	70	70
	Leergewicht (EU)	kg	1755	1675
	cw x A	m ²	0,30 x 2,26	0,27 x 2,26
Motor	Bauart/Zyl./Vent.	1	R/6/4	R/6/4
	Hubraum	cm ³	2993	2993
	Hub / Bohrung	mm	90,0/84,0	90,0/84,0
	Verdichtung :l	1	17,0	17,0
	Kraftstoff	–	Diesel	Diesel
	Leistung	kW	170	173
	bei Drehzahl	1/min	4000	4000
	Drehmoment	Nm	500	500
bei Drehzahl	1/min	1750-3000	1750-3000	
Getriebe	Getriebeart	–	Automatik	Automatik
	Übersetzung I :1	1	4,17	4,17
	II :1	1	2,34	2,34
	III :1	1	1,52	1,52
	IV :1	1	1,14	1,14
	V :1	1	0,87	0,87
	VI :1	1	0,69	0,69
	R :1	1	3,40	3,40
	Hinterachse :1	1	2,47	2,65
Reifen	–	255/45R18	225/55R17	
Fahrleistung	Leistungsgewicht	kg/kW	9,9	9,2
	Literleistung	kW/l	56,8	57,8
	0 auf 100 km/h	s	7,0	6,8
	0 bis 1000 m	s	-	26,8
	v _{max}	km/h	242	248
NEFZ	städtisch	l/100km	10,6	9,1
	außerstädtisch	l/100km	6,0	5,2
	insgesamt	l/100km	7,7	6,6
	CO ₂	g/km	205	176

Tabelle C.1: Technische Daten der Versuchsfahrzeuge BMW 530d Touring (E61) und BMW 530d Limousine (E60) [44, 45]

D Abkürzungsverzeichnis

ABD	Acceleration Boundaries
ACC	Adaptive Cruise Control
ACF	ACC Controller Function
ADASIS	Advanced Driver Assistance System Interface Specification
AHP	ADASIS Horizon Provider
AHR	ADASIS Horizon Reconstructor
ANOVA	Analysis of Variance
AP	Action Point
APD	Avalanche Photodiode
ATS	ACC Target Selection
BA	Beschleunigungsabschnitt
CA	Cellular Automata
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
CAC	Coasting Assist Control
CAN	Controller Area Network
CCD	Charged Coupled Device

CD	Compact Disc
CES	Consumer Electronics Show
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CSC	Curve Speed Control
DSP	Digital Signal Processing
ESP	Electronic Stability Control
FCD	Floating Car Data
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FMSK	Frequency Modulated Shift Keying
FOC	Follow Object Control
FSI	Functional System Infrastructure
FSK	Frequency Shift Keying
GPS	Global Positioning System
H0	Nullhypothese
H1	Alternativhypothese
HB70	Strategie Hochbeschleunigen auf 70 km/h
HB80	Strategie Hochbeschleunigen auf 80 km/h
HMI	Human Machine Interface / Human Machine Interaction
HUD	Head-up-Display
HV	Hauptverkehrszeit
IDM	Intelligent Driver Model

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KA	Konstantfahrabschnitt
LIDAR	Light Detection and Ranging
LSA	Lichtsignalanlage
MAN	Manuelle Fahrt
MPC	Model Predictive Control
MPP	Most Propable Path
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation System using Timing and Ranging
NDS	Navigation Data Standard
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NV	Nebenverkehrszeit
OVM	Optimal Velocity Model
PIN	Positive Intrinsic Negative Diode
RADAR	Radio Detection and Ranging
RAM	Random Access Memory
RHC	Receding Horizon Control
SARTRE	Safe Road Trains for the Environment
SD	Safety-Distance
SDF	Sensor Data Fusion
SN	Strategie Segeln mit nachgelagertem Schubbetrieb

SSC	Set Speed Control
SSR	Set Speed Coordinator
TTC	Time to Collision
USB	Universal Serial Bus
VA	Verzögerungsabschnitt
VLC	Vehicle Longitudinal Control
WLAN	Wireless Local Area Network
XCP	Universal Measurement and Calibration Protocol

E Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	–	Signifikanzniveau oder Fehler erster Art
β	–	Fehler zweiter Art
Δt	s	Zeitliche Differenz
$\Delta t_{w,k}$	s	Differenz zur Wunschfahrzeit zum Tempolimit k
Δv	m/s	Differenzgeschwindigkeit
Δv_r	m/s	Radiale Relativgeschwindigkeit
\dot{m}_k	g/s	Kraftstoffmassenstrom
η	–	Wirkungsgrad
\hat{b}	m/s^2	Maximale Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs (Gipps Modell)
λ	$1/s$	Sensitivität (Stimulus-Response Modell)
ω	$1/s$	Winkelgeschwindigkeit
ρ	kg/m^3	Dichte von Luft
τ	s	Zeitlücke
$\tau_{0.5}$	s	Zeitlückenmedian einer Messung
τ_{max}	s	Maximale Zeitlücke einer Messung
τ_{min}	s	Minimale Zeitlücke einer Messung
\tilde{D}	–	Median der Differenzverteilung

Symbol	Einheit	Bedeutung
\tilde{x}	—	Median einer Verteilung
φ	%	Steigung der Fahrbahn in Längsrichtung
φ_e	°/s	Ego-Gierrate
A	m^2	Stirnfläche
a	m/s^2	Maximale Wunschbeschleunigung (IDM)
a_{cv}	m/s^2	Sollwert der Beschleunigung (cv - command value)
a_k	m/s^2	Maximale Beschleunigung des Fahrzeugs k (Gipps Modell)
a_{max}	m/s^2	Maximale Beschleunigung
a_{min}	m/s^2	Minimale Beschleunigung
b	m/s^2	Maximale Wunschverzögerung (IDM)
b_k	m/s^2	Maximale Verzögerung des Fahrzeugs k (Gipps-Model)
b_s	$l/100km$	Streckenspezifischer Verbrauch
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
c_w	—	Luftwiderstandsbeiwert
D	—	Differenzverteilung
d_{min}	m	Minimaler Abstand im Stillstand
d_r	m	Radialer Abstand
d_x	m	Abstand in x-Richtung
d_y	m	Abstand in y-Richtung
E_{ab}	J	Abgeführte Energie

Symbol	Einheit	Bedeutung
E_{zu}	J	Zugeführte Energie
F	N	Kraft
f_{Diff}	Hz	Differenzfrequenz
$f_{Doppler}$	Hz	Dopplerfrequenz
f_{Hub}	Hz	Frequenzhub
f_0	Hz	Trägerfrequenz
f_E	Hz	Empfangene Frequenzrampe
f_G	Hz	Gesendete Frequenzrampe
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
H	–	Absolute Häufigkeit
h	m	Schrittweite
$i_{Getriebe}$	–	Übersetzung des Getriebes
K	–	Kosten
k	–	Gewichtungsfaktor in Zusammenhang mit Kosten
k_r	–	Rollwiderstandsbeiwert
l_k	m	Länge des Fahrzeugs k
m	kg	Masse
M	Nm	Drehmoment
N	–	Größe der Stichprobe
$q_{\tau < 0,9s}$	–	Expositionsanteil mit Zeitlücken kleiner 0,9 s
r_{Rad}	m	Effektiver Reifenradius
s	m	Strecke

Symbol	Einheit	Bedeutung
$s_{b,k}$	m	Strecke zur Verzögerung auf Tempolimit k
$s_{k,k}$	m	Strecke mit konst. Geschwindigkeit bis zum Tempolimit k
s_{Start}	m	Startabstand zur Geschwindigkeitsbegrenzung
s_k	m	Abstand zum Tempolimit k
T	s	Totzeit oder Reaktionszeit
T_1	s	Zeitkonstante
t	s	Zeit
$t_{e,k}$	m	Egofahrzeit zum Tempolimit k
t_{Rampe}	s	Dauer der Frequenzrampe
$t_{tc,min}$	s	Minimale Time to Collision einer Messung
t_{tc}	s	Time to Collision
$t_{w,k}$	m	Wunschfahrzeit zum Tempolimit k
t_a	s	Zeit einer Lastpunktanhebung
u	—	Steuergrößenvektor
v	m/s	Geschwindigkeit
v_0	m/s	Wunschgeschwindigkeit
v_h	m/s	Geschwindigkeit des nachfolgenden bzw. hinteren Fahrzeugs
v_{ist}	m/s	Istgeschwindigkeit
v_{max}	m/s	Maximal erlaubte Geschwindigkeit oder mögliche Geschwindigkeit
v_{min}	m/s	Minimale Geschwindigkeit

Symbol	Einheit	Bedeutung
v_{Opt}	$1/s$	Optimale Geschwindigkeit
v_{set}	m/s	Setzgeschwindigkeit
v_{soll}	m/s	Sollgeschwindigkeit
\dot{v}_{soll}	m/s^2	Sollbeschleunigung
v_e	m/s	Ego-Geschwindigkeit
V_k	m/s^2	Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs k (Gipps-Modell)
v_{Ziel}	m/s	Zielgeschwindigkeit während einer Verzögerung oder Beschleunigung
x	—	Zustandsgrößenvektor
x_k	m	Zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs k

F Literaturverzeichnis

- [1] *Gesetz zu dem Protokoll von Kyoto vom 11. Dezember 1997 zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (Kyoto-Protokoll)*. http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGB1&jumpTo=bgbl202s0966.pdf. – Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil II Nr. 16, ausgegeben zu Bonn am 2. Mai 2002
- [2] *Gesetz zu der Entscheidung der Konferenz von Doha vom 8. Dezember 2012 zur Änderung des Protokolls von Kyoto vom 11. Dezember 1997 zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (Doha-Änderung des Protokolls von Kyoto)*. http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGB1&jumpTo=bgbl215s0306.pdf. – Bundesgesetzblatt Jahrgang 2015 Teil II Nr. 8, ausgegeben zu Bonn am 12. März 2015
- [3] *Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg*. <http://www.svz-bw.de>. – abgerufen am 18.07.2013
- [4] *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/NOT/?uri=CELEX:32009R0443&qid=1451508102239>

- [5] *Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen.* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1451508545297&uri=CELEX:32014R0333>
- [6] Aktive Sicherheit mit Fahrerassistenzsystemen und passive Sicherheit. In: *ATZextra* 13 (2008), Nr. 8, 113-113. <http://dx.doi.org/10.1365/s35778-008-0173-3>. – ISSN 2195-1454
- [7] ETSI: *Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band European Profile 5 GHz.* http://www.etsi.org/deliver/etsi_es/202600_202699/202663/01.01.00_60/es_202663v010100p.pdf. Version: 01 2010
- [8] ETSI: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service.* http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263703/01.01.01_60/ts_10263703v010101p.pdf. Version: 09 2010
- [9] ETSI: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 1: Requirements.* http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263601/01.01.01_60/ts_10263601v010101p.pdf. Version: 03 2010
- [10] ETSI: *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service.* http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263702/01.02.01_60/ts_10263702v010201p.pdf. Version: 03 2011

- [11] *ibeo LUX*. <http://ibeo-as.com/>. Version: 2013. – Datenblatt, abgerufen am 01.11.2013
- [12] *Jetzt erkennt Ihr Auto von selbst die grüne Welle*. Die Welt. <http://www.welt.de/motor/article123730654/Jetzt-erkennt-Ihr-Auto-von-selbst-die-gruene-Welle.html>. Version: 01 2014. – Abgerufen am 07.02.2014
- [13] *National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism (1985-2013)*. http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/ds_resolveuid/a1cac3a090614381ac5cb10f1f4c75b9. Version: 01 2015. – European Environment Agency (EEA)
- [14] ADAC: Navi-Updates oft teuer und langwierig / ADAC e.V. Version: 2013. http://www.adac.de/infotestrat/tests/autozubehoer-technik/mobile-navis/Navis_updates/vergleich_naviupdates.aspx?tabid=tab1. 2013. – Forschungsbericht. – Abgerufen am 01.12.2013
- [15] ADELL, Emeli ; VÁRHELYI, András ; FONTANA, Mario dalla: The effects of a driver assistance system for safe speed and safe distance - A real-life field study. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (2011), Nr. 1, 145 - 155. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2010.04.006>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2010.04.006>. – ISSN 0968–090X
- [16] ALAM, A. ; MARTENSSON, J. ; JOHANSSON, K.H.: Look-ahead cruise control for heavy duty vehicle platooning. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2013, S. 928–935
- [17] ALAM, A.A. ; GATTAMI, A. ; JOHANSSON, K.H.: An experimental study on the fuel reduction potential of heavy duty vehicle platoon-

- ing. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on*, 2010. – ISSN 2153–0009, S. 306–311
- [18] ALBERS, Albert ; SCHWARZ, Alexander ; ZINGEL, Christian ; SCHROETER, Jens ; BEHRENDT, Matthias ; ZELL, Andreas ; LEONE, Carmelo ; ARCATI, Antonio: System-Oriented Validation Aspects of a Driver Assistance System Based on an Accelerator-Force-Feedback-Pedal. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33838-0_20. In: *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress* Bd. 200. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978–3–642–33837–3, 221-233
- [19] ALKIM, Tom P. ; BOOTSMAN, Gerben ; HOOGENDOORN, Serge ...: Field Operational Test "The Assisted Driver". In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2007. – ISSN 1931–0587, S. 1198–1203
- [20] ANDO, Ryosuke ; NISHIHORI, Yasuhide: How does driving behavior change when following an eco-driving car? In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 20 (2011), Nr. 0, 577 - 587. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.064>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.064>. – ISSN 1877–0428. – The State of the Art in the European Quantitative Oriented Transportation and Logistics Research - 14th Euro Working Group on Transportation & 26th Mini Euro Conference & 1st European Scientific Conference on Air Transport
- [21] ASADI, B. ; VAHIDI, A.: Predictive Cruise Control: Utilizing Upcoming Traffic Signal Information for Improving Fuel Economy and Reducing Trip Time. In: *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 19 (2011), May, Nr. 3, S. 707–714. <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2010.2047860>. – DOI 10.1109/TCST.2010.2047860. – ISSN 1063–6536
- [22] BACKHAUS, Richard: Weniger Verbrauch Durch Optimierte Reifen Und Räder. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr.

- 12, 986-988. <http://dx.doi.org/10.1365/s35148-011-0229-3>. – DOI 10.1365/s35148-011-0229-3. – ISSN 0001-2785
- [23] BALDESSARI, Roberto ; BÖDEKKER, Bert ; DEEGENER, Matthias ; FESTAG, Andreas ; FRANZ, Walter ; KELLUM, C. C. ; KOSCH, Timo ; KOVACS, Andras ; LENARDI, Massimiliano ; MENIG, Cornelius ; PEICHL, Timo ; RÖCKL, Matthias ; SEEBERGER, Dieter ; STRASSBERGER, Markus ; STRATIL, Hannes ; VÖGEL, Hans-Jörg ; WEYL, Benjamin ; ZHANG, Wenhui: CAR 2 CAR Communication Consortium Manifesto / CAR 2 CAR Communication Consortium. 2007. – Forschungsbericht
- [24] BANDO, M. ; HASEBE, K. ; NAKAYAMA, A. ; SHIBATA, A. ; SUGIYAMA, Y.: Structure stability of congestion in traffic dynamics. In: *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics* 11 (1994), Nr. 2, 203-223. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03167222>. – DOI 10.1007/BF03167222. – ISSN 0916-7005
- [25] BANDO, M. ; HASEBE, K. ; NAKAYAMA, A. ; SHIBATA, A. ; SUGIYAMA, Y.: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. In: *Phys. Rev. E* 51 (1995), Feb, 1035-1042. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.51.1035>. – DOI 10.1103/PhysRevE.51.1035
- [26] BANDO, Masako ; HASEBE, Katsuya ; NAKANISHI, Ken ; NAKAYAMA, Akihiro: Analysis of optimal velocity model with explicit delay. In: *Phys. Rev. E* 58 (1998), Nov, 5429-5435. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.58.5429>. – DOI 10.1103/PhysRevE.58.5429
- [27] BANDO, Masako ; HASEBE, Katsuya ; NAKANISHI, Ken ; NAKAYAMA, Akihiro: Delay of vehicle motion in traffic dynamics. In: *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics* 17 (2000), Nr. 2, 275-294. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03167348>. – DOI 10.1007/BF03167348. – ISSN 0916-7005

- [28] BANDO, Masako ; HASEBE, Katsuya ; NAKANISHI, Ken ; NAKAYAMA, Akihiro ; SHIBATA, Akihiro ; SUGIYAMA, Yūki: Phenomenological Study of Dynamical Model of Traffic Flow. In: *Journal de Physique I* 5 (1995), Nr. 11, 1389-1399. <http://dx.doi.org/10.1051/jp1:1995206>. – DOI 10.1051/jp1:1995206
- [29] BANKHOFER, Udo ; VOGEL, Jürgen: Signifikanztests. Version: 2008. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-9654-1_11. In: *Datenanalyse und Statistik*. Gabler, 2008. – ISBN 978-3-8349-0434-8, 125-151
- [30] BAR, T. ; NIENHUSER, D. ; KOHLHAAS, R. ; ZOLLNER, J.-M.: Probabilistic driving style determination by means of a situation based analysis of the vehicle data. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011. – ISSN 2153-0009, S. 1698–1703
- [31] BARTH, Matthew ; BORIBOONSOMSIN, Kanok: Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14 (2009), Nr. 6, 400 - 410. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.004>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.004>. – ISSN 1361-9209
- [32] BASTIAENSEN, Edwin ; FLAMENT, M. ; LÖWENAU, J. ; BEUK, L. ; MEIER, J. ; ANGENVOORT, J. ; OTTO, H.-U. ; ALEKSICM, M. ; BRACHT, A. ; SABEL, H. ; LILLI, F.: ActMAP: real-time map updates for advanced in-vehicle applications. In: *Proceedings, 10th World Congress on ITS, Madrid, 2003*
- [33] BATISTA, Milan ; TWRDY, Elen: Optimal velocity functions for car-following models. In: *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 11 (2010), Nr. 7, 520-529. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.A0900370>. – DOI 10.1631/jzus.A0900370. – ISSN 1673-565X

- [34] BECKER, Gernot ; KIEFNER, Dominique: Entwurf und Verifikation CO₂-reduzierender ACC-Regelalgorithmen mittels Simulation und Fahrversuch (ECO-ACC) / FKFS Stuttgart im Auftrag der Robert Bosch GmbH. 2011. – Forschungsbericht. – Interner Abschlussbericht EFA2014
- [35] BECKER, Gernot ; REUSS, Hans-Christian: Efficient cruise control - a measure for electric vehicle range increase. In: *13. Internationales Stuttgarter Symposium 2013 Automobil- und Motorentechnik*, 2013
- [36] BELLMAN, Richard E.: *Dynamic Programming*. Princeton University Press, 1957
- [37] BENMIMOUN, Mohamed ; PÜTZ, Andreas ; ZLOCKI, Adrian ; ECKSTEIN, Lutz: euroFOT: Field Operational Test and Impact Assessment of Advanced Driver Assistance Systems: Final Results. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33805-2_43. In: *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress* Bd. 197. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-33804-5, 537-547
- [38] BENZ, Thomas: Fahrzeug-Funkwarnsystem: Studie Wirksamkeitssimulation / PTV Planung Transport Verkehr AG. 2002. – Forschungsbericht
- [39] BEXELIUS, Sten: An extended model for car-following. In: *Transportation Research* 2 (1968), Nr. 1, 13 - 21. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647\(68\)90004-X](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(68)90004-X). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647\(68\)90004-X](http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(68)90004-X). – ISSN 0041-1647
- [40] BIERMANN, Jan-Welm ; BARKOW, Axel ; TÖPLER, Felix: Vorausschauende Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge der Subkompaktklasse. In: *ATZelektronik* 4 (2009), Nr. 6, 10-19. <http://dx.doi.org/>

- org/10.1007/BF03223983. – DOI 10.1007/BF03223983. – ISSN 1862–1791
- [41] BIERMANN, Jan-Welm ; RENNER, Christian: Betriebsstrategien. Version:2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2050-1_4. In: REIF, Konrad (Hrsg.) ; NOREIKAT, Karl-Ernst (Hrsg.) ; BORGEESE, Kai (Hrsg.): *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978–3–8348–0722–9, 301-323
- [42] BIRRELL, Stewart A. ; FOWKES, Mark: Glimpse behaviours when using an in-vehicle smart driving aid: A real-world, on-road driving study. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 22 (2014), Nr. 0, 113 - 125. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2013.11.003>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2013.11.003>. – ISSN 1369–8478
- [43] BIRRELL, Stewart A. ; YOUNG, Mark S.: The impact of smart driving aids on driving performance and driver distraction. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 14 (2011), Nr. 6, 484 - 493. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2011.08.004>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2011.08.004>. – ISSN 1369–8478. – Special Issue: Driving Simulation in Traffic Psychology
- [44] BMW: *Technische Daten BMW 5er Touring*. 03 2005
- [45] BMW: *Technische Daten BMW 5er Limousine*. 09 2007
- [46] BORIBOONSOMSIN, K. ; BARTH, M.J. ; ZHU, Weihua ; VU, A.: Eco-Routing Navigation System Based on Multisource Historical and Real-Time Traffic Information. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 13 (2012), Nr. 4, S. 1694–1704. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2012.2204051>. – DOI 10.1109/TITS.2012.2204051. – ISSN 1524–9050

-
- [47] BOSCH: *Fernbereichsradarsensor LRR3: Long-Range Radar, 3. Generation*. 2009. – Datenblatt, Robert Bosch GmbH
- [48] BOSCH: *Entspannter fahren mit Adaptive Cruise Control*. 2011. – Robert Bosch GmbH
- [49] BOSCH: *Multi-Funktions-Display und Navigation: Eco-Routing von Bosch für den neuen Ford Focus Routenempfehlung wird energieeffizient ermittelt*. Mai 2011. – Presseinformation, Robert Bosch GmbH
- [50] BOSCH: *Mehr Sicherheit beim Spurwechsel und Ausparken Mittelbereichsradar von Bosch für Heckanwendungen*. 2012. – Presseinformation, Robert Bosch GmbH
- [51] BOSCH: *Mittelbereichsradarsensor (MRR) für Front- und Heckanwendungen*. 2015. – Datenblatt, Robert Bosch GmbH
- [52] BÄR, T. ; KOHLHAAS, R. ; ZOLLNER, J.M. ; SCHOLL, K.: Anticipatory driving assistance for energy efficient driving. In: *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS)*, 2011, S. 1–6
- [53] BRACKSTONE, Mark ; MCDONALD, Mike: Car-following: a historical review. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 2 (1999), Nr. 4, 181 - 196. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1369-8478\(00\)00005-X](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1369-8478(00)00005-X). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S1369-8478\(00\)00005-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-8478(00)00005-X). – ISSN 1369-8478
- [54] BREYER, F. ; BLASCHKE, C. ; FARBER, B. ; FREYER, J. ; LIMBACHER, R.: Negative Behavioral Adaptation to Lane-Keeping Assistance Systems. In: *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE* 2 (2010), Summer, Nr. 2, S. 21–32. <http://dx.doi.org/10.1109/MITS.2010.938533>. – DOI 10.1109/MITS.2010.938533. – ISSN 1939-1390

- [55] BU, Fanping ; CHAN, Ching-Yao: Adaptive and Cooperative Cruise Control. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-085-4_9. In: ESKANDARIAN, Azim (Hrsg.): *Handbook of Intelligent Vehicles*. Springer London, 2012. – ISBN 978-0-85729-084-7, 191-207
- [56] BU, Fanping ; TAN, Han-Shue ; HUANG, Jihua: Design and field testing of a Cooperative Adaptive Cruise Control system. In: *American Control Conference (ACC)*, 2010. – ISSN 0743-1619, S. 4616-4621
- [57] BUCHNER, Alexander: *Auf Dynamischer Programmierung basierende Nichtlineare Modellprädiktive Regelung für LKW*, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Heidelberg, Diplomarbeit, 2010
- [58] BULD, Susanne ; KRÜGER, Hans-Peter: Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit - Abschlussbericht Projekt EMPHASIS - / Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg. 2002. – Forschungsbericht
- [59] BURKERT, Andreas: Die Brennstoffzelle kommt kräftig in Fahrt. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 76 (2015), Nr. 9, 8-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s35146-015-0092-y>. – ISSN 0024-8525
- [60] CARLSSON, Anne: *A system for the provision and management of route characteristic information to facilitate predictive driving strategies*. Renningen : Expert-Verl., 2008 (40). – 154 S. <http://www.expertverlag.de/php/i.php?i=978381692912>. – ISBN 978-3-8169-2912-3
- [61] CHAKROBORTY, Partha ; KIKUCHI, Shinya: Evaluation of the General Motors based car-following models and a proposed fuzzy inference model. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 7 (1999), Nr. 4, 209 - 235. <http://dx.doi.org/>

- [http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(99\)00020-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(99)00020-0). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(99\)00020-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(99)00020-0). – ISSN 0968-090X
- [62] CHAKROBORTY, Partha ; KIKUCHI, Shinya: Calibrating the membership functions of the fuzzy inference system: instantiated by car-following data. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 11 (2003), Nr. 2, 91 - 119. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(02\)00022-0](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(02)00022-0). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(02\)00022-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(02)00022-0). – ISSN 0968-090X
- [63] CHANDLER, Robert E. ; HERMAN, Robert ; MONTROLL, Elliott W.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following. In: *Operations Research* 6 (1958), Nr. 2, 165-184. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.6.2.165>
- [64] CHEN, Tao ; LUO, Yugong ; LI, Keqiang: Multi-objective adaptive cruise control based on nonlinear model predictive algorithm. In: *Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, S. 274-279
- [65] CHEN, Xin ; STROILA, M. ; LYNCH, J. ; ALWAR, N. ; KOHLMAYER, B. ; BACH, J. ; HUI, R.: Towards next-generation map making. In: *IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2009. ICME 2009.*, 2009. – ISSN 1945-7871, S. 1676-1683
- [66] CIECA: Internal project on 'Eco-driving' in category B driver training & the driving test / CIECA. 2007. – Forschungsbericht
- [67] CREMER, M. ; LUDWIG, J.: A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 28 (1986), Nr. 4, 297 - 303. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0378-4754\(86\)90051-0](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0378-4754(86)90051-0). – DOI

- [http://dx.doi.org/10.1016/0378-4754\(86\)90051-0](http://dx.doi.org/10.1016/0378-4754(86)90051-0). – ISSN 0378-4754
- [68] DALLMEYER, Jörg: *Akteursorientierte multimodale Straßenverkehrssimulation*, Johann Wolfgang Goethe - Universität Frankfurt, Diss., 2013. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:hebis:30:3-311372>. – XIX, 301 S.
- [69] DANG, Thao ; HOFFMANN, Christian ; STILLER, Christoph: Visuelle mobile Wahrnehmung durch Fusion von Disparität und Verschiebung. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer, 2005, S. 21–42
- [70] DANNHEIM, Clemens ; MÄDER, Markus ; ICKING, C. ; LOEWENAU, Jan ; MASSOW, Kay: A Novel Approach for the Enhancement of Cooperative ACC by Deriving Real Time Weather Information. In: *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*,. The Hague, The Netherlands, 2013
- [71] DAUN, Thomas J. ; BRAUN, Daniel G. ; FRANK, Christopher ; HAUG, Stephan ; LIENKAMP, Markus: Evaluation of Driving Behavior and the Efficacy of a Predictive Eco-Driving Assistance System for Heavy Commercial Vehicles in a Driving Simulator Experiment. In: *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*. The Hague, The Netherlands, 2013
- [72] DAVILA, Arturo: SARTRE - Report on Fuel Consumption / Appplus+ IDIADA. Version: 2013. http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE_4_003_PU.pdf. 2013. – Forschungsbericht
- [73] DETERING, Stefan: *Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen*,

- Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig,, Diss., 2011. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00038450>
- [74] DOGAN, Ebru ; STEG, Linda ; DELHOMME, Patricia: The influence of multiple goals on driving behavior: The case of safety, time saving, and fuel saving. In: *Accident Analysis & Prevention* 43 (2011), Nr. 5, 1635 - 1643. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2011.03.002>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2011.03.002>. – ISSN 0001–4575
- [75] DORNIEDEN, Bernd ; JUNGE, Lutz ; PASCHEKA, Patrick: Vorausschauende Energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 3, 230-235. <http://dx.doi.org/10.1365/s35148-012-0293-3>. – DOI 10.1365/s35148-012-0293-3. – ISSN 0001-2785
- [76] DORNIEDEN, Bernd ; JUNGE, Lutz ; THEMANN, Philipp ; ZLOCKI, Adrian: Energy efficient longitudinal vehicle control based on analysis of driving situations. In: *20. Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2011
- [77] DORRER, Claus: *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahre-rassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen*. Renningen : expert-Verl., 2004 (24). – 151 S S. – ISBN 3-8169-2384-4
- [78] DULLER, Christine: *Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R: Ein anwendungsorientiertes Lehr-und Arbeitsbuch*. Physica-Verlag Heidelberg, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7908-2060-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7908-2060-7>
- [79] DUREKOVIC, S. ; SMITH, N.: Architectures of Map-Supported ADAS. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, 2011. – ISSN 1931-0587, S. 207–211

- [80] DUREKOVIC, Sinisa ; BRACHT, Alexander ; RAICHLE, Bernd ; RAUCH, Manuel ; REQUEJO, Julian ; VARCHMIN, Axel ; BALZER, Dirk ; GRIESBECK, Martin ; LÖWENAU, Jan ; MITTAZ, Michel ; RESS, Christian ; T'SIOBBEL, Stephen ; WAGNER, Michael: ADA-SIS v2 Protocol / ADASIS Forum. 2010. – Forschungsbericht
- [81] EBEN LI, Shengbo ; LI, Keqiang ; WANG, Jianqiang: Economy-oriented vehicle adaptive cruise control with coordinating multiple objectives function. In: *Vehicle System Dynamics* 51 (2013), Nr. 1, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2012.708421>. – DOI 10.1080/00423114.2012.708421
- [82] EBEN LI, Shengbo ; PENG, Huei ; LI, Keqiang ; WANG, Jianqiang: Minimum Fuel Control Strategy in Automated Car-Following Scenarios. In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 61 (2012), March, Nr. 3, S. 998–1007. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2012.2183401>. – DOI 10.1109/TVT.2012.2183401. – ISSN 0018–9545
- [83] ECKSTEIN, P.P.: *Repetitorium Statistik: Deskriptive Statistik-Stochastik-Induktive Statistik. Mit Klausuraufgaben und Lösungen*. Gabler Verlag, 2006. – ISBN 9783834904645
- [84] ERICSSON, Eva ; LARSSON, Hanna ; BRUNDELL-FREIJ, Karin: Optimizing route choice for lowest fuel consumption - Potential effects of a new driver support tool. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 14 (2006), Nr. 6, 369 - 383. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>. – ISSN 0968–090X
- [85] ESCALERA, A. de I. ; MORENO, L.E. ; SALICHS, M.A. ; ARMINGOL, J.M.: Road traffic sign detection and classification. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 44 (1997), Nr. 6, S.

- 848–859. <http://dx.doi.org/10.1109/41.649946>. – DOI 10.1109/41.649946. – ISSN 0278–0046
- [86] EVANS, Leonard: *Traffic safety and the driver*. Van Nostrand Reinhold, 1991
- [87] FAIRCHILD, RG ; BRAKE, JF ; THORPE, N ; BIRRELL, Stewart A. ; YOUNG, Mark S. ; FELSTEAD, T ; FOWKES, M: Using on-board driver feedback systems to encourage safe, ecological and efficient driving: the Foot-LITE project. In: *The 23rd Convention of the Society for the Study of Artificial Intelligence and Simulation of Behaviour. Edinburgh*, 2009
- [88] FELSTEAD, Tim ; McDONALD, Mike ; THORPE, Neil ; FAIRCHILD, Richard: Field Trials, plans, results and outcomes / Foot-LITE Project. Version: 2011. <http://www.foot-lite.net/pdfs/Foot-LITE%20111125-01a%20D4.2D%20Field%20Trials,%20plans,%20results%20and%20outcomes%20%28public%20report%29.pdf>. 2011. – Forschungsbericht
- [89] FIAT: *Eco-Driving Uncovered - The benefits and challenges of eco-driving, based on the first study using real journey data*. http://www2.fiat.co.uk/uploadedFiles/Fiatcouk/Stand_Alone_Sites/EcoDrive2010/en/ECO-DRIVING_UNCOVERED_full_report_2010_EN%281%29.pdf. Version: 2010. – Abgerufen am 27.01.2014
- [90] FILZEK, Björn: *Abstandsverhalten auf Autobahnen*, TU Darmstadt, Diss., December 2007. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/911/>
- [91] FRANZÉN, Stig ; ENGELBREKTSSON, P. ; GAITANIDOU, E. ; SOLAR, A. ; TESAURI, F. ; RICHARDSON, J. ; SCHRÖDER, U.: Functions specification / Field Operational Test of Aftermarket and Nomadic Devices in Vehicles (TeleFOT). Version: 2010. <http://>

- www.telefot.eu/files/file/deliverables/Final/SP2/TeleFOT_D2_5_1_Functions%20Specification.pdf. 2010. – Forschungsbericht
- [92] FRÖBERG, Anders: *Efficient simulation and optimal control for vehicle propulsion*, Linköping University, Department of Electrical Engineering, Vehicular Systems, Diss., 2008. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-11475>
- [93] FREUNDT, Dirk ; LUCAS, Bernhard: Long Range Radar Sensor for High-Volume Driver Assistance Systems Market. In: *SAE World Congress*. Detroit, Michigan, April 14-17 2008
- [94] FRIEDFELDT, Rainer ; ZENNER, Thomas ; ERNST, Roland ; FRASER, Andrew: Dreizylinder-Ottomotor. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00790-4_14. In: SIEBENPFEIFFER, Wolfgang (Hrsg.): *Energieeffiziente Antriebstechnologien* Bd. 1. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – ISBN 978-3-658-00789-8, 86-93
- [95] FRIEDRICH, Horst E. ; HÜLSEBUSCH, Dirk: Elektro-Fahrzeugkonzepte und Leichtbau: Anforderungen für neue Werkstoffe? In: *Lightweight Design 2* (2009), Nr. 4-5, 18-24. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03223576>. – ISSN 1865-4819
- [96] FRIEDRICH, Horst E. ; KRISHNAMOORTHY, SivakumaraK.: Leichtbau als Treiber von Innovationen. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2110-2_1. In: FRIEDRICH, Horst E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-8348-1467-8, 1-30
- [97] FRITZSCHE, Hans-Thomas: A model for traffic simulation. In: *Traffic Engineering & Control* 35 (1994), Nr. 5, S. 317-321

-
- [98] GASPAR, Verena ; DIEFENBACH, Ute ; ZELLER, Magdalena ; WOLTMANN, Eleni: Das Spritspar-Paket. In: *ADAC Motorwelt* 10 (2012), S. 22–26
- [99] GAUSEMEIER, S. ; JÄKER, K.-P. ; TRÄCHTLER, A.: Fahrerassistenzsystem für energie- und zeitoptimales Fahren durch prädiktive Geschwindigkeitsprofil-Planung. In: *13. Braunschweiger Symposium AAET*, 2012
- [100] GAUSEMEIER, Sandra F.: *Ein Fahrerassistenzsystem zur prädiktiven Planung energie- und zeitoptimaler Geschwindigkeitsprofile mittels Mehrzieloptimierung*, Universität Paderborn, Diss., 2013. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:466:2-12560>
- [101] GAZIS, Denos C. ; HERMAN, Robert ; ROTHERY, Richard W.: Non-linear Follow-The-Leader Models of Traffic Flow. In: *Operations Research* 9 (1961), Nr. 4, pp. 545-567. <http://www.jstor.org/stable/167126>
- [102] GEDULD, Georg: Lidarsensorik. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8619-4_14. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8348-1457-9, 172-185
- [103] GEIGER, A. ; LAUER, M. ; MOOSMANN, F. ; RANFT, B. ; RAPP, H. ; STILLER, C. ; ZIEGLER, J.: Team AnnieWAY's Entry to the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2012), Sept, Nr. 3, S. 1008–1017. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2012.2189882>. – DOI 10.1109/TITS.2012.2189882. – ISSN 1524-9050
- [104] GIPPS, P.G.: A behavioural car-following model for computer simulation. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 15 (1981), Nr. 2, 105 - 111. <http://dx.doi.org/>

- [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0). – DOI
[http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0). – ISSN 0191-2615
- [105] GREIN, F.G. ; WIEDEMANN, J.: Vorausschauende Fahrstrategien für verbrauchssenkende Fahrerassistenzsysteme. In: *VDI-Berichte 1565* (2000), S. 739–756
- [106] GROB, Andreas: *Praktikumsbericht*. Februar 2013. – Hochschule Pforzheim, Studiengang Elektrotechnik/Informationstechnik
- [107] GUAN, Tianyi ; FREY, C.W.: Predictive fuel efficiency optimization using traffic light timings and fuel consumption model. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2013, S. 1553–1558
- [108] GÜVENÇ, L. ; UYGAN, I.M.C. ; KAHRAMAN, K. ; KARAAHMETOGLU, R. ; ALTAY, I. ; SENTÜRK, M. ; EMIRLER, M.T. ; KARCI, A.E.H. ; GÜVENÇ, B.A. L.venc ; ALTUG, E. ; TURAN, M.C. ; TAS, O.S. ; BOZKURT, E. ; ÖZGÜNER, U. ; REDMILL, K. ; KURT, A. ; EFENDIOGLU, B.: Cooperative Adaptive Cruise Control Implementation of Team Mekar at the Grand Cooperative Driving Challenge. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 13 (2012), Sept, Nr. 3, S. 1062–1074. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2012.2204053>. – DOI 10.1109/TITS.2012.2204053. – ISSN 1524–9050
- [109] HAMBERGER, W.: *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädikativen Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*. VDI-Verlag, 1999 (12): [Fortschrittberichte VDI]. – ISBN 9783183371129
- [110] HANDELSBLATT: *Wirtschaftliche Gründe: USA verweigern sich dem Kyoto-Protokoll*. <http://www.handelsblatt.com/archiv/wirtschaftliche-gruende-usa-verweigern-sich-dem->

kyoto-protokoll/2053672.html. Version: 03 2001. – abgerufen am 30.12.2015

- [111] HARDING, Jochen: *Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs*, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Diss., 2007. <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/HardingJochen/diss.pdf>
- [112] HASCH, J.: Driving towards 2020: Automotive radar technology trends. In: *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, 2015, S. 1–4
- [113] HASCH, J. ; TOPAK, E. ; SCHNABEL, R. ; ZWICK, T. ; WEIGEL, R. ; WALDSCHMIDT, C.: Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band. In: *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 60 (2012), Nr. 3, S. 845–860. <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2011.2178427>. – DOI 10.1109/TMTT.2011.2178427. – ISSN 0018–9480
- [114] HATAKKA, Mika ; KESKINEN, Esko ; SALO, Inkeri: ECOSAFE comes - does it improve safety of driving? / University of Turku. 2004. – Forschungsbericht
- [115] HAWORTH, Narelle ; SYMMONS, Mark: The relationship between fuel economy and safety outcomes / Monash University Accident Research Centre. 2001. – Forschungsbericht
- [116] HAYWARD, John C.: Near-miss determination through use of a scale of danger. In: *Highway Research Record* (1972), Nr. 384
- [117] HELBING, Dirk ; TILCH, Benno: Generalized force model of traffic dynamics. In: *Phys. Rev. E* 58 (1998), Jul, 133–138. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.58.133>. – DOI 10.1103/PhysRevE.58.133

- [118] HELLSTRÖM, Erik: *Look-ahead Control of Heavy Vehicles*, Linköping University, Department of Electrical Engineering, Vehicular Systems, Diss., 2010. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-54922>
- [119] HELLSTRÖM, Erik ; FRÖBERG, Anders ; NIELSEN, Lars: A Real-Time Fuel-Optimal Cruise Controller for Heavy Trucks Using Road Topography Information. In: *2006 SAE World Congress*, 2006
- [120] HELLY, W.: Simulation of Bottlenecks in Single-Lane Traffic Flow. In: *Proceedings of the Symposium on the Theory of traffic flow*, 1961, S. 207–238
- [121] HENN, Michael ; HORST, Tobias L. ; SCHULZE, Frank ; BARTSCH, Patrick ; GADANECZ, Aniko ; DORNIEDEN, Bernd ; JUNGE, Lutz: Energy efficient vehicle operation by intelligent longitudinal control and route planning. In: *12. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*, 2012
- [122] HÜLSEBUSCH, Dirk ; SALFELD, Maïke: *Determining a Driving Strategy For a Vehicle*. Internet. <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2013056881>. Version: April 2013. – WO Patent: WO2013056881
- [123] HÜLSEBUSCH, Dirk ; SALFELD, Maïke ; PONOMAREV, Igor ; GAUTERIN, Frank: The impact of energy efficient driving strategies on rear-end safety. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2013, S. 1644–1649
- [124] HÜLSEBUSCH, Dirk ; SALFELD, Maïke ; XIA, Yinchao ; GAUTERIN, Frank: Adaptive Cruise Control: A Behavioral Assessment of Following Traffic Participants Due to Energy Efficient Driving Strategies. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33838-0_19. In: *Proceedings of the FISITA 2012 World Automot*

- tive Congress* Bd. 200. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-33837-3, 209-220
- [125] HÜLSEBUSCH, Dirk ; UNGETHÜM, Jörg ; BRAIG, Thomas ; DITTUS, Holger: Multidisziplinäre Simulation von Fahrzeugen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 111 (2009), Nr. 10, 772-779. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03222120>. – DOI 10.1007/BF03222120. – ISSN 0001-2785
- [126] HUANG, Wei ; BEVLY, David M. ; LI, Xiaopeng ; SCHNICK, Steve: 3D Road Geometry Based Optimal Truck Fuel Economy. In: *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2007*
- [127] HUBER, W.: *Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen*. Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, 2001 (Veröffentlichungen des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München)
- [128] HUBER, Werner ; LÄDKE, Michael ; OGGER, Rainer: Extended floating-car data for the acquisition of traffic information. In: *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Transport Systems, 1999*, S. 1-9
- [129] HÖVER, Norbert ; LICHTER, Bernd ; LIETAERT, Steven: Multi-beam Lidar Sensor for Active Safety Applications. In: *SAE World Congress*. Detroit, Michigan : SAE International, April 3-6 2006
- [130] IPCC: Summary for Policymakers. Version: 2013. <http://dx.doi.org/10.1017/CB09781107415324.004>. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013. – DOI 10.1017/CB09781107415324.004, S. 1-28. – T.F. Stocker, D. Qin,

- G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)
- [131] IPCC: Summary for Policymakers. Version: 2014. <http://dx.doi.org/10.1017/CB09781107415416>. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2014. – DOI 10.1017/CB09781107415416, S. 1–32. – O., R. Edenhofer, Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)
- [132] JIANG, Rui ; WU, Qingsong ; ZHU, Zuojin: Full velocity difference model for a car-following theory. In: *Phys. Rev. E* 64 (2001), Jun, 017101. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.64.017101>. – DOI 10.1103/PhysRevE.64.017101
- [133] JING, Peng ; JUAN, Zhicai ; GAO, Linjie: Improvement of the Full Velocity Difference Car-following Model. In: *Journal of Computational Information Systems* 7(10) (2011), S. 3651–3659
- [134] JONES, Stephen: Cooperative Adaptive Cruise Control: Human Factors Analysis / U.S. Federal Highway Administration, Office of Safety Research and Development. 2013. – Forschungsbericht
- [135] JONSSON, Johan: *Fuel Optimized Predictive Following in Low Speed Conditions*, Vehicular Systems, Dept. of Electrical Engineering at Linköpings universitet, Diplomarbeit, 2003
- [136] JOOTEL, Paviter: SARTRE - Final Report / Ricardo UK. Version: 2013. http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE_Final-Report.pdf. 2013. – Forschungsbericht

- [137] KALABIS, Marcus: *Steigerung der Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen durch modellbasierte prädikative Geschwindigkeits- und Abstandsregelung*, Technische Universität Kaiserslautern, Diss., 2013
- [138] KAMAL, M. A S. ; MUKAI, M. ; MURATA, J. ; KAWABE, T.: Ecological Vehicle Control on Roads With Up-Down Slopes. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (2011), Nr. 3, S. 783–794. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2011.2112648>. – DOI 10.1109/TITS.2011.2112648. – ISSN 1524–9050
- [139] KAMAL, M.A.S. ; IMURA, J. ; OHATA, A. ; HAYAKAWA, T. ; AIHARA, K.: Efficient control of vehicles in congested traffic using model predictive control. In: *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, 2012. – ISSN 1085–1992, S. 1522–1527
- [140] KAMAL, M.A.S. ; MUKAI, M. ; MURATA, J. ; KAWABE, T.: Ecological driver assistance system using model-based anticipation of vehicle-road-traffic information. In: *Intelligent Transport Systems, IET* 4 (2010), December, Nr. 4, S. 244–251. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2009.0127>. – DOI 10.1049/iet-its.2009.0127. – ISSN 1751–956X
- [141] KAMAL, M.A.S. ; MUKAI, M. ; MURATA, J. ; KAWABE, T.: Model Predictive Control of Vehicles on Urban Roads for Improved Fuel Economy. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 21 (2013), May, Nr. 3, S. 831–841. <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2012.2198478>. – DOI 10.1109/TCST.2012.2198478. – ISSN 1063–6536
- [142] KAMALANATHSHARMA, R.K. ; RAKHA, H.A.: Multi-stage dynamic programming algorithm for eco-speed control at traffic signalized intersections. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2013, S. 2094–2099

- [143] KATO, T. ; NINOMIYA, Y. ; MASAKI, I.: Preceding vehicle recognition based on learning from sample images. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 3 (2002), Nr. 4, S. 252–260. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2002.804752>. – DOI 10.1109/TITS.2002.804752. – ISSN 1524–9050
- [144] KESSLER, Christoph ; ETEMAD, Aria ; ALESSANDRETTI, Giancarlo ; HEINIG, Karsten ; SELPI ; BROUWER, Rino ; CSERPINSZKY, Andras ; HAGLEITNER, Walter ; BENMIMOUN, Mohamed: Deliverable D11.3 - Final Report / European Large-Scale Field Operational Tests on In-Vehicle Systems (EuroFOT). Version: 2012. http://www.eurofot-ip.eu/download/library/deliverables/eurofotsp120121212v11d1d113_final_report.pdf. 2012. – Forschungsbericht
- [145] KEULEN, Thijs van ; NAUS, Gerrit ; JAGER, Bram de ; MOLENGRAFT, Ren´e van d. ; STEINBUCH, Maarten ; ANEKE, Edo: Predictive Cruise Control in Hybrid Electric Vehicles. In: *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 2009
- [146] KÖHLER, Wolfgang ; SCHACHTEL, Gabriel ; VOLESKE, Peter: *Biostatistik - Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler*. 5. Auflage. Springer Spektrum, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [147] KHODAYARI, A. ; GHAFFARI, A. ; KAZEMI, R. ; ALIMARDANI, F. ; BRAUNSTINGL, R.: Improved adaptive neuro fuzzy inference system car-following behaviour model based on the driver - vehicle delay. In: *Intelligent Transport Systems, IET* 8 (2014), June, Nr. 4, S. 323–332. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2012.0111>. – DOI 10.1049/iet-its.2012.0111. – ISSN 1751–956X
- [148] KHODAYARI, A. ; GHAFFARI, A. ; KAZEMI, R. ; BRAUNSTINGL, R.: A Modified Car-Following Model Based on a Neural Network

- Model of the Human Driver Effects. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans* 42 (2012), Nov, Nr. 6, S. 1440–1449. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMCA.2012.2192262>. – DOI 10.1109/TSMCA.2012.2192262. – ISSN 1083–4427
- [149] KHODAYARI, A. ; KAZEMI, R. ; GHAFARI, A. ; BRAUNSTINGL, R.: Design of an improved fuzzy logic based model for prediction of car following behavior. In: *Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, S. 200–205
- [150] KIANFAR, R. ; FALCONE, P. ; FREDRIKSSON, J.: A receding horizon approach to string stable cooperative adaptive cruise control. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011. – ISSN 2153–0009, S. 734–739
- [151] KIKUCHI, Shinya ; CHAKROBORTY, Partha: Car-following model based on fuzzy inference system. In: *Transportation Research Record*, 1992, S. 82–91
- [152] KIRCHER, Katja ; FORS, Carina ; AHLSTROM, Christer: Continuous versus intermittent presentation of visual eco-driving advice. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 24 (2014), Nr. 0, 27 - 38. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2014.02.007>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2014.02.007>. – ISSN 1369–8478
- [153] KLAUER, S.G. ; DINGUS, T. A. ; NEALE, V. L. ; SUDWEEKS, J.D. ; RAMSEY, D.J.: The Impact of Driver Inattention On Near-Crash/Crash Risk: An Analysis Using the 100-Car Naturalistic Driving Study Data / National Highway Traffic Safety Administration. Version: 2006. <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/Driver%20Distraction/810594.pdf>. 2006. – Forschungsbericht

- [154] KLEINE-BESTEN, Thomas ; KERSKEN, Ulrich ; PÖCHMÜLLER, Werner ; SCHEPERS, Heiner: Navigation und Telematik. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8619-4_40. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8348-1457-9, 599-624
- [155] KLOIBER, B. ; STRANG, T. ; PONTE-MULLER, F. de: Slipstream cooperative adaptive cruise control - A conceptual ITS application for electric vehicles. In: *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, 2012, S. 1-5
- [156] KNOLL, Peter: Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. Version: 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8619-4_24. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8348-8619-4, 330-342
- [157] KNOOP, Michael ; KERN, Alexander: Verzögerungsprofile für optimale Rekuperation und Komfort. In: *13. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*, 2013
- [158] KOCH-GROEBER, Hermann: Segeln im Überlandbetrieb - Potenziale und Realisierung. In: *13. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*, 2013
- [159] KOCK, P. ; WELFERS, H.J. ; PASSENBERG, B. ; GNATZIG, S. ; STURSBURG, O. ; ORDYS, A.W.: Energieeinsparung beim Betrieb von Nutzfahrzeugen durch prädiktive Regelungsstrategien in der Längsdynamikregelung. In: *VDI-Berichte Nr. 2033*, 2008

- [160] KOEHLER, S. ; VIEHL, A. ; BRINGMANN, O. ; ROSENSTIEL, W.: Optimized recuperation strategy for (Hybrid) Electric Vehicles based on intelligent sensors. In: *12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2012, S. 218–223
- [161] KOHLHAAS, R. ; SCHAMM, T. ; LENK, D. ; ZOLLNER, J.M.: Towards driving autonomously: Autonomous cruise control in urban environments. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013. – ISSN 1931–0587, S. 116–121
- [162] KOHLHAAS, R. ; SCHAMM, T. ; NIENHUSER, D. ; ZOLLNER, J.-M.: Anticipatory energy saving assistant for approaching slower vehicles. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011. – ISSN 2153–0009, S. 1966–1971
- [163] KOUKOUMIDIS, Emmanouil ; PEH, Li-Shiuan ; MARTONOSI, Margaret R.: SignalGuru: Leveraging Mobile Phones for Collaborative Traffic Signal Schedule Advisory. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services ACM*, 2011, S. 127–140
- [164] KRASCHL-HIRSCHMANN, K. ; FELLENDORF, M.: Estimating energy consumption for routing algorithms. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012. – ISSN 1931–0587, S. 258–263
- [165] KRAUSS, Stefan: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Universität Köln, Diss., 1998. <http://e-archive.informatik.uni-koeln.de/319/>
- [166] KRUSKAL, William H. ; WALLIS, W. A.: Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. In: *Journal of the American Statistical Association* 47 (1952), Nr. 260, 583–621. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>. – DOI 10.1080/01621459.1952.10483441

- [167] KÜSTER, Ursula ; REITER, Karl: Technikwissen und Fahrverhalten junger Fahrer : eine empirische Studie; Bericht zum Forschungsprojekt 8307/2 / Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. 1987. – Forschungsbericht
- [168] LANG, Dominik ; STANGER, Thomas ; SCHMIED, Roman ; RE, Luigi: Predictive Cooperative Adaptive Cruise Control: Fuel Consumption Benefits and Implementability. Version: 2014. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-05371-4_10. In: WASCHL, Harald (Hrsg.) ; KOLMANOVSKY, Ilya (Hrsg.) ; STEINBUCH, Maarten (Hrsg.) ; RE, Luigi del (Hrsg.): *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems* Bd. 455. Springer International Publishing, 2014. – ISBN 978-3-319-05370-7, 163-178
- [169] LANGE, Christian: *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*, Technischen Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2008. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20071127-633326-1-4>
- [170] LANGE, S. ; SCHIMANSKI, M.: *Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben*, Technischen Universität Carolin Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2006
- [171] LEDERER, Matthias: Energieeffizientes Fahren. Version: 2014. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04451-0_8. In: *Energiemanagement im Kraftfahrzeug*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-658-04450-3, 307-321
- [172] LEE, Jeongwoo: *Vehicle Inertia Impact on Fuel Consumption of Conventional and Hybrid Electric Vehicles Using Acceleration and Coast Driving Strategy*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Diss., 2009. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/>

available/etd-09172009-234744/unrestricted/ETD_PhD_Dissertation_Jeongwoo_Lee.pdf

- [173] LEE, S. E. ; WIERWILLE, W. W. ; KLAUER, S. G.: Enhanced Rear Lighting And Signaling Systems: Literature Review and Analyses of Alternative System Concepts / U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. Version: 2002. <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/2002/Task%201%20Report.pdf>. 2002. – Forschungsbericht
- [174] LI, S.E. ; PENG, Huei: Strategies to minimize fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios. In: *American Control Conference (ACC)*, 2011. – ISSN 0743–1619, S. 2107–2112
- [175] LI, Shengbo ; LI, Keqiang ; RAJAMANI, R. ; WANG, Jianqiang: Model Predictive Multi-Objective Vehicular Adaptive Cruise Control. In: *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 19 (2011), May, Nr. 3, S. 556–566. <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2010.2049203>. – DOI 10.1109/TCST.2010.2049203. – ISSN 1063–6536
- [176] LINDNER, Frank ; KRESSEL, U. ; KAELEBERER, S.: Robust recognition of traffic signals. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE*, 2004, S. 49–53
- [177] LINDNER, P. ; RICHTER, E. ; WANIELIK, G. ; TAKAGI, K. ; ISOGAI, A.: Multi-channel lidar processing for lane detection and estimation. In: *Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC '09. 12th International IEEE Conference on*, 2009, S. 1–6
- [178] LIU, Feng: *Objektverfolgung durch Fusion von Radar- und Monokameradaten auf Merkmalsebene für zukünftige Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss.,

2010. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000020219>. – Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2009
- [179] LÜSSMANN, Jonas ; VRESWIJK, Jaap ; MATHIAS, Paul: The Co-operative Traffic Light Control Approach of the eCoMove System. In: *19th ITS World Congress*. Vienna, Austria, October 2012
- [180] LORKOWSKI, Stefan ; BROCKFELD, Elmar ; MIETH, Peter ; PASSFELD, Bert ; THIESSENHUSEN, Kai-Uwe ; SCHÄFER, Ralf-Peter: Erste Mobilitätsdienste auf Basis von "Floating Car Data". In: *Ta-gungsband zum 4. Aachener Kollouium "Mobilität und Stadt"*, 2003
- [181] LUDWIG, Jürgen: Elektronischer Horizont Vorausschauende Systeme und deren Anbindung an Navigationseinheiten. In: *ATZelextronik* 7 (2012), Nr. 6, 434-439. <http://dx.doi.org/10.1365/s35658-012-0228-5>. – DOI 10.1365/s35658-012-0228-5. – ISSN 1862-1791
- [182] LUO, Li-hua ; LIU, Hong ; LI, Ping ; WANG, Hui: Model predictive control for adaptive cruise control with multi-objectives: comfort, fuel-economy, safety and car-following. In: *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 11 (2010), Nr. 3, 191-201. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.A0900374>. – DOI 10.1631/jzus.A0900374. – ISSN 1673-565X
- [183] LUTHER, Rebecca ; BAAS, Peter: Eco-Driving Scoping Study / AA Research Foundation. Version: 2011. <https://www.aa.co.nz/assets/about/Research-Foundation/Ecodrive/TERNZ-Eco-Driving-Report.pdf>. 2011. – Forschungsbericht
- [184] LUU, Hong T. ; NOUVELIERE, Lydie ; MAMMAR, Said: Ecological and safe driving assistance system: Design and strategy. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2010. – ISSN 1931-0587, S. 129-134

- [185] MALDONADO-BASCON, S. ; LAFUENTE-ARROYO, S. ; GIL-JIMENEZ, P. ; GOMEZ-MORENO, H. ; LOPEZ-FERRERAS, F.: Road-Sign Detection and Recognition Based on Support Vector Machines. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 8 (2007), Nr. 2, S. 264–278. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2007.895311>. – DOI 10.1109/TITS.2007.895311. – ISSN 1524–9050
- [186] MALTA, Lucas ; AUST, Mikael L. ; FABER, Freek ; METZ, Barbara ; PIERRE, Guillaume S. ; BENMIMOUN, Mohamed ; SCHÄFER, Roland: Deliverable 6.4 - Final results: Impacts on traffic safety / European Large-Scale Field Operational Tests on In-Vehicle Systems (euroFOT). Version: 2012. http://www.eurofot-ip.eu/download/library/deliverables/eurofotsp620121121v11dld64_final_results_impacts_on_traffic_safety.pdf. 2012. – Forschungsbericht
- [187] MANSER, Michael P. ; RAKAUSKAS, Michael ; GRAVING, Justin ; JENNESS, James W.: Fuel Economy Driver Interfaces: Develop Interface Recommendations / National Highway Traffic Safety Administration. Version: 2010. <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/Crash%20Avoidance/Technical%20Publications/2010/811319.pdf>. 2010. – Forschungsbericht
- [188] MARKSCHLÄGER, Philip ; WAHL, Hans-Georg ; WEBERBAUER, Frank ; LEDERER, Matthias: Assistenzsystem für mehr Kraftstoffeffizienz. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), Nr. 11, 850-855. <http://dx.doi.org/10.1007/s35148-012-0496-7>. – DOI 10.1007/s35148–012–0496–7. – ISSN 0001–2785
- [189] MARSDEN, G. ; McDONALD, M. ; BRACKSTONE, M.: Towards an understanding of adaptive cruise control. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 9 (2001), Nr. 1, S. 33–51

- [190] MATHEUS, Kirsten ; MORICH, Rolf ; PAULUS, Ingrid ; MENIG, Cornelius ; LÜBKE, Andreas ; SPECKS, Will ; RECH, Bernd: Car-to-Car Communication - Market Introduction and Success Factors. In: *Proc. 5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, 2005
- [191] MAUK, Tobias: *Selbstlernende, zuverlässigkeitsorientierte Prädiktion energetisch relevanter Größen im Kraftfahrzeug*. Renningen, Universität Stuttgart, Hochschulschrift, 2011. <http://www.expertverlag.de/php/i.php?i=978381693123>. – 104 S.
- [192] MCCALL, J.C. ; TRIVEDI, M.M.: Video-based lane estimation and tracking for driver assistance: survey, system, and evaluation. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 7 (2006), Nr. 1, S. 20–37. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2006.869595>. – DOI 10.1109/TITS.2006.869595. – ISSN 1524–9050
- [193] MCDONALD, M. ; WU, J. ; BRACKSTONE, M.: Development of a fuzzy logic based microscopic motorway simulation model. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97.*, 1997, S. 82–87
- [194] MEINHEIT, Hinrich: *Konzeption eines vorausschauend fahrenden Hybridfahrzeugs*. Aachen : Forschungsges. Kraftfahrwesen Aachen (fka), 2009 (112). – 151 S.. – ISBN 978–3–940374–14–1
- [195] MENSING, F. ; TRIGUI, R. ; BIDEAUX, E.: Vehicle trajectory optimization for application in ECO-driving. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011, S. 1–6
- [196] MENSING, F. ; TRIGUI, R. ; BIDEAUX, E.: Vehicle trajectory optimization for hybrid vehicles taking into account battery state-of-charge. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2012, S. 950–955

- [197] MENSING, Felicitas ; BIDEAUX, Eric ; TRIGUI, Rochdi ; TATTEGRAIN, Helene: Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 18 (2013), Nr. 0, 55 - 61. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2012.10.003>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2012.10.003>. – ISSN 1361-9209
- [198] MILANES, V. ; SHLADOVER, S.E. ; SPRING, J. ; NOWAKOWSKI, C. ; KAWAZOE, H. ; NAKAMURA, M.: Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15 (2014), Feb, Nr. 1, S. 296-305. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2013.2278494>. – DOI 10.1109/TITS.2013.2278494. – ISSN 1524-9050
- [199] MINDERHOUD, Michiel M. ; BOVY, Piet H.: Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. In: *Accident Analysis & Prevention* 33 (2001), Nr. 1, 89 - 97. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00019-1](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00019-1). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00019-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00019-1). – ISSN 0001-4575
- [200] MÜLLER, M. T.: Navigation Data Standard (NDS): Bald Industriestandard? In: *AUTOMOBIL-ELEKTRONIK* Dezember 2010 (2010), S. 30-31
- [201] MÜLLER, Norbert ; STRAUSS, Steffen ; TUMBACK, Stefan ; CHRIST, Ansgar: Coasting - Next Generation Start-Stop Systems. In: *MTZ worldwide eMagazine* 72 (2011), Nr. 9, 14-19. <http://dx.doi.org/10.1365/s38313-011-0084-3>. – DOI 10.1365/s38313-011-0084-3
- [202] MONONEN, Petri ; FRANZEN, Stig ; PAGLEA, Katia ; MORRIS, Andrew ; INNAMAA, Satu ; KARLSSON, MariAnne ; TOULIOU,

- Katerina ; MONTANARI, Roberto ; FRUTTALDO, Serena: Final Report / Field Operational Test of Aftermarket and Nomadic Devices in Vehicles (TeleFOT). Version:2012. http://www.telefot.eu/files/file/deliverables/Final/TeleFOT_D1%2015_FinalReport_Final.pdf. 2012. – Forschungsbericht
- [203] NAGEL, Kai ; SCHRECKENBERG, Michael: A cellular automaton model for freeway traffic. In: *J. Phys. I France* 2 (1992), Nr. 12, 2221-2229. <http://dx.doi.org/10.1051/jp1:1992277>. – DOI 10.1051/jp1:1992277
- [204] NAUS, Gerrit ; PLOEG, Jeroen ; MOLENGRAFT, M.J.G. ; HEEMELS, W.P.M.H. ; STEINBUCH, Maarten: A Model Predictive Control Approach to Design a Parameterized Adaptive Cruise Control. Version:2010. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84996-071-7_17. In: RE, Luigi (Hrsg.) ; ALLGÖWER, Frank (Hrsg.) ; GLIELMO, Luigi (Hrsg.) ; GUARDIOLA, Carlos (Hrsg.) ; KOLMANOVSKY, Ilya (Hrsg.): *Automotive Model Predictive Control* Bd. 402. Springer London, 2010. – ISBN 978-1-84996-070-0, 273-284
- [205] NEMETH, B. ; GASPAR, P. ; BOKOR, J.: Design of vehicle platoon control based on predicted road inclinations. In: *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, 2011. – ISSN 2159-6247, S. 265-270
- [206] NEUNZIG, Dirk: *Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsminderung von Kraftfahrzeugen Anforderungen, Realisierung und Bewertung*. Aachen : fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, 2003 (68). – 164 S.. – ISBN 3-925194-68-1
- [207] NEWELL, G. F.: Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following. In: *Operations Research* 9 (1961), Nr. 2, 209-229. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.9.2.209>. – DOI 10.1287/opre.9.2.209

- [208] NEWELL, G.F.: A simplified car-following theory: a lower order model. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 36 (2002), Nr. 3, 195 - 205. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261500000448>. – ISSN 0191–2615
- [209] NGO, Dac V. ; HOFMAN, T. ; STEINBUCH, M. ; SERRARENS, A. F A.: An optimal control-based algorithm for Hybrid Electric Vehicle using preview route information. In: *American Control Conference (ACC)*, 2010. – ISSN 0743–1619, S. 5818–5823
- [210] NORRIS, John ; WALKER, Helen ; STONES, Phil ; DAVIES, Russell: Development of a new method to assess fuel saving using gear shift indicators / AEA Energy & Environment. 2010. – Forschungsbericht
- [211] NOUVELIERE, L. ; MAMMAR, S. ; LUU, H.-T.: Energy saving and safe driving assistance system for light vehicles: Experimentation and analysis. In: *9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2012, S. 346–351
- [212] OGAWA, T. ; SAKAI, H. ; SUZUKI, Y. ; TAKAGI, K. ; MORIKAWA, K.: Pedestrian detection and tracking using in-vehicle lidar for automotive application. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, 2011. – ISSN 1931–0587, S. 734–739
- [213] ONCU, S. ; PLOEG, J. ; WOUW, N. van d. ; NIJMEIJER, H.: Cooperative Adaptive Cruise Control: Network-Aware Analysis of String Stability. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* PP (2014), Nr. 99, S. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2014.2302816>. – DOI 10.1109/TITS.2014.2302816. – ISSN 1524–9050
- [214] OROFINO, Luigi ; CILIMINGRAS, Luis ; MORELLO, Eugenio: EcoDrive: Driver Behaviour Evaluation System to Reduce CO2 Emissions. In: *FISITA World Automotive Congress*. Budapest,, 2010

- [215] PIPES, Louis A.: An Operational Analysis of Traffic Dynamics. In: *Journal of Applied Physics* 24 (1953), Mar, Nr. 3, S. 274–281. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1721265>. – DOI 10.1063/1.1721265. – ISSN 0021–8979
- [216] PLOEG, J. ; SERRARENS, A. F. A. ; HEIJENK, G. J.: Connect & Drive: design and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction. In: *Journal of Modern Transportation* 19 (2011), September, Nr. 3, 207–213. <http://jmt.swjtu.edu.cn/EN/Y2011/V19/I3/207>. – ISSN 2095–087X
- [217] PONOMAREV, Igor: *Untersuchung des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von verschiedenen Ego-Fahrstrategien*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2013
- [218] POPIV, Daria: *Enhancement of Driver Anticipation and Its Implications on Efficiency and Safety*, Technischen Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2011. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20120201-1079920-1-1>
- [219] POPIV, Darya ; BENGLER, Klaus ; RAKIC, Mariana ; DUSCHL, Markus ; LAQUAI, Florian: Reduction of Fuel Consumption by Early Anticipation and Assistance of Deceleration Phases. In: *FISITA World Automotive Congress*. Budapest, Hungary, 2010
- [220] PUDENZ, Katrin: *BMW i3: Automobilbau mit CFK*. <http://www.springerprofessional.de/bmw-i3-automobilbau-mit-cfk/4401938.html>. Version: 05 2013. – Redaktion Springer für Professionals
- [221] RADKE, T ; LEWANDOWITZ, L ; GAUTERIN, Frank ; KACZMAREK, T: Operationalisation of human drivers' subjective dynamics perception in automated longitudinally controlled passenger vehicles. In: *Int. J. of Vehicle Autonomous Systems* 11 (2013), 01, S. 86 – 109

- [222] RADKE, T ; ROTH, M ; LEDERER, M ; GAUTERIN, F ; FREY, M ; STEINBRECHER, C. ; SCHRÖTER, J. ; GOSLAR, M.: Porsche InnoDrive - An Innovative Approach for the Future of Driving. In: *Proceedings of 1st Aachen Colloquium China*, 2011
- [223] RADKE, Tobias ; FAHRZEUGSYSTEMTECHNIK, Institut für (Hrsg.): *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2013 <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000035819>. – Dissertation
- [224] RAKOTONIRAINY, Andry ; HAWORTH, Narelle ; SAINT-PIERRE, Guillaume ; DELHOMME, Patricia u. a.: Research issues in Eco-driving. In: *22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, 2011
- [225] RAMAKERS, R. ; HENNING, K. ; GIES, S. ; ABEL, D. ; MAX, H.: Electronically coupled truck platoons on German highways. In: *International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2009. – ISSN 1062–922X, S. 2409–2414
- [226] REICHART, G ; FRIEDMANN, S ; DORRER, C ; RIEKER, H ; DRECHSEL, E ; WERMUTH, G: Potentials of BMW driver assistance to improve fuel economy. In: *FISITA World Automotive Congress, Paris* Bd. 27, 1998
- [227] REINHARDT, E.: Eco-Drive TM in Switzerland - A success story of Energy 2000. In: *International Transdisciplinarity Conference*, Haffmans Sachbuch, 2000
- [228] REKERSBRINK, Andreas: Mikroskopische Verkehrssimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic. In: *Straßenverkehrstechnik* 2 (1995), S. 68–74

- [229] RESS, Christian ; BALZER, Dirk ; BRACHT, Alexander ; DUREKOVIC, Sinisa ; LÖWENAU, Jan: ADASIS protocol for advanced in-vehicle applications. In: *ITS World Congress, New York, 2008*
- [230] REUSCHEL, A.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne. In: *Österreichisches Ingenieur-Archiv* 4 (1950), S. 193–215
- [231] REYHER, Alexander von: *Lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung von Objekten für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr*, TU Darmstadt, Diss., December 2007. <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/903/>
- [232] RICHTER, Andreas: *Geschwindigkeitsvorgabe an Lichtsignalanlagen*. Deutscher Universitätsverlag, 2005. – Dissertation Helmut-Schmidt-Universität
- [233] RICHTER, M. ; ZINSER, S. ; KABZA, H.: Comparison of eco and time efficient routing of ICEVs, BEVs and PHEVs in inner city traffic. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE, 2012*, S. 1165–1169
- [234] RIEKER, H. ; DORRER, C. ; GREIN, F. G. ; WIEDEMANN, J.: Informationen über die vorausliegende Strecke als Basis für verbrauchsoptimierte Fahrstrategien. In: BARGENDE, M. (Hrsg.) ; WIEDEMANN, J. (Hrsg.): *3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren*. Renningen-Malmsheim : Expert-Verlag, 1999, S. 716–731
- [235] ROMMERSKIRCHEN, C. ; HELMBRECHT, M. ; BENGLER, K.: The Impact of an Anticipatory Eco-Driver Assistant System in Different Complex Driving Situations on the Driver Behavior. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 6 (2014), Summer, Nr. 2, S. 45–56. <http://dx.doi.org/10.1109/MITS.2014.2307078>. – DOI 10.1109/MITS.2014.2307078. – ISSN 1939–1390

- [236] ROTH, Martin: Betriebsstrategie. Version: 2014. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04451-0_9. In: *Energiemanagement im Kraftfahrzeug*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978–3–658–04450–3, 323-365
- [237] ROUZIKHAH, Hossein ; KING, Mark ; RAKOTONIRAINY, Andry: Examining the effects of an eco-driving message on driver distraction. In: *Accident Analysis & Prevention* 50 (2013), Nr. 0, 975 - 983. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2012.07.024>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2012.07.024>. – ISSN 0001–4575
- [238] RUINA, Dang ; CHAOZHE, He ; QIANG, Zhang ; KEQIANG, Li ; YUSHENG, Li: ACC of electric vehicles with coordination control of fuel economy and tracking safety. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012. – ISSN 1931–0587, S. 240–245
- [239] SÁ, Joaquim P. d.: Non-Parametric Tests of Hypotheses. Version: 2007. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71972-4_5. In: SÁ, JoaquimP. Marques d. (Hrsg.): *Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. – ISBN 978–3–540–71971–7, 171-222
- [240] SACHS, Lothar ; HEDDERICH, Jürgen: Hypothesentest. Version: 2006. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32161-3_7. In: *Angewandte Statistik*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. – ISBN 978–3–540–32160–6, 305-559
- [241] SAENGER-ZETINA, Siegfried ; WAGNER, Markus: Hybride Antriebsstrukturen. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2050-1_2. In: REIF, Konrad (Hrsg.) ; NOREIKAT, Karl-Ernst (Hrsg.) ; BORGEEST, Kai (Hrsg.): *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978–3–8348–0722–9, 7-74

- [242] SAERENS, B. ; RAKHA, H.A. ; DIEHL, M. ; BULCK, E. V.: A methodology for assessing eco-cruise control for passenger vehicles. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 19 (2013), Nr. 0, 20 - 27. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2012.12.001>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2012.12.001>. – ISSN 1361–9209
- [243] SAHLHOLM, Per ; JOHANSSON, Karl H.: Road grade estimation for look-ahead vehicle control using multiple measurement runs. In: *Control Engineering Practice* 18 (2010), Nr. 11, 1328 - 1341. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.09.007>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.09.007>. – ISSN 0967–0661. – <ce:title>Special Issue on Automotive Control Applications, 2008 {IFAC} World Congress</ce:title>
- [244] SALFELD, Maike: *Schnittstellenspezifikation des Navigationshorizonts in TOP71*. 11 2010. – interner Bericht, Robert Bosch GmbH
- [245] SALMASI, F.R.: Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends. In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 56 (2007), Sept, Nr. 5, S. 2393–2404. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2007.899933>. – DOI 10.1109/TVT.2007.899933. – ISSN 0018–9545
- [246] SAMPER, K u. a.: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch ein vorausschauendes Assistenzsystem. In: *VDI-Berichte Nr. 1613*, 2001
- [247] SCHAKEL, W.J. ; VAN AREM, B. ; NETTEN, B.D.: Effects of Cooperative Adaptive Cruise Control on traffic flow stability. In: *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*,, 2010. – ISSN 2153–0009, S. 759–764
- [248] SCHNABEL, R. ; MITTELSTRAB, D. ; BINZER, T. ; WALDSCHMIDT, C. ; WEIGEL, R.: Reflection, Refraction, and Self-

- Jamming. In: *Microwave Magazine, IEEE* 13 (2012), Nr. 3, S. 107–117. <http://dx.doi.org/10.1109/MMM.2012.2186095>. – DOI 10.1109/MMM.2012.2186095. – ISSN 1527–3342
- [249] SCHNEIDER, Martin: Automotive radar–status and trends. In: *German Microwave Conference*, 2005, S. 144–147
- [250] SCHRAUT, Michael P.: *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen*, Technische Universität München, Dissertation, 2000. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss2000121915326>
- [251] SCHÜTT, Holger: *Entwicklung und Erprobung eines sehr schnellen, bitorientierten Verkehrssimulationssystems für Straßennetze*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., 1990
- [252] SCHUBERT, Michael: Green ACC Verbrauchsmessung / Robert Bosch GmbH. 2011. – Forschungsbericht. – Interner Bericht
- [253] SCHULE, Florian ; SCHWEIGER, Roland ; DIETMAYER, Klaus: Augmenting night vision video images with longer distance road course information. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, 2013. – ISSN 1931–0587, 1233-1238
- [254] SCHURICHT, Philipp ; BAEKER, Bernard: Entwicklung eines Fahrerinformationssystems für eine energieeffiziente Fahrzeugbetriebsführung im Bereich von Lichtsignalanlagen. In: *11. Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, 2010
- [255] SCHURICHT, Philipp ; BAEKER, Bernard: Intelligent Vehicle Control Based On Predictive Urban Traffic Information. In: *FISITA World Automotive Congress*. Budapest, Hungary, 2010

- [256] SCIARRETTA, Antonio ; GUZZELLA, Lino: Fuel-Optimal Control of Rendezvous Maneuvers for Passenger Cars. In: *at - Automatisierungstechnik* 53 (2005), 244-250. <http://dx.doi.org/10.1524/auto.53.6.244.65604>
- [257] SÜDDEUTSCHE: *Kanada steigt offiziell aus Kyoto-Protokoll aus.* <http://www.sueddeutsche.de/politik/klimaschutzabkommen-kanada-steigt-offiziell-aus-kyoto-protokoll-aus-1.1233232>. Version: 12 2011. – abgerufen am 30.12.2015
- [258] SÜDDEUTSCHE: *So kommen Sie mit Ihrer Tankfüllung weiter.* <http://www.sueddeutsche.de/auto/2.220/zehn-spritspartipps-so-kommen-sie-mit-ihrer-tankfuellung-weiter-1.1934698>. Version: 2014. – Abgerufen am 04.01.2016
- [259] SEGATA, Michele: Novel Communication Strategies for Platooning and their Simulative Performance Analysis. In: *1st GI/ITG KuVS Fachgespräch Inter-Vehicle Communication (FG-IVC 2013)*. Innsbruck, Austria, February 2013
- [260] SENYÜZ, Gökhan: *Evaluierung eines Fahrerassistenzsystems zur energieeffizienten Längsregelung*, Institut für Technik der Informationsverarbeitung, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2013
- [261] SEREDYNSKI, Marcin ; DORRONSORO, Bernabe ; KHADRAOUI, Djamel: Comparison of Green Light Optimal Speed Advisory approaches. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2013, S. 2187–2192
- [262] SKUPIN, Christian ; CAKAR, Emre ; MODLER, Holger ; BERSINER, Lutz: Cooperative Functions for Ecologic Routing and Driving Support in Personal Cars. In: *9th ITS European Congress*. Dublin, Ireland, June 2013

- [263] SOMMER, Kerstin C.: *Vorausschauendes Fahren - Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Antizipationsleistungen im Straßenverkehr*, Universität Regensburg, Diss., 2012
- [264] STANGER, T. ; RE, L. del: A model predictive Cooperative Adaptive Cruise Control approach. In: *American Control Conference (ACC)*, 2013. – ISSN 0743–1619, S. 1374–1379
- [265] STAUBACH, Maria ; KASSNER, Astrid ; FRICKE, Nicola ; SCHIESSL, Caroline ; BROCKMANN, Martin ; KUCK, Detlef: Driver reactions on ecological driver feedback via different HMI modalities. In: *Proceedings of the 19th World Congress on ITS*. Vienna, 2012
- [266] STÜBING, Hagen: *Multilayered Security and Privacy Protection in Car-to-X Networks*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02531-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02531-1>
- [267] STILLER, Christoph: Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: MAURER, Markus (Hrsg.) ; STILLER, Christoph (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer Berlin Heidelberg, 2005. – ISBN 978–3–540–23296–4, S. 1–20
- [268] STILLER, Christoph ; BACHMANN, Alexander ; DUCHOW, Christian: Maschinelles Sehen. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8619-4_16. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978–3–8348–1457–9, 198–222
- [269] TAKAGI, K. ; MORIKAWA, K. ; OGAWA, T. ; SABURI, M.: Road Environment Recognition Using On-vehicle LIDAR. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE*, 2006, S. 120–125

- [270] TANG, I. ; BRECKON, T.P.: Automatic Road Environment Classification. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (2011), Nr. 2, S. 476–484. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2010.2095499>. – DOI 10.1109/TITS.2010.2095499. – ISSN 1524–9050
- [271] TANG, Zhijun ; SALTSMAN, Benjamin ; HALBE, Omkar ; PATIL, Amol ; NOWAK, Michael: Intelligent Driver Assistance Systems Toward Greener and More Efficient Commercial Vehicles. In: *18th World Congress on Intelligent Transport Systems*. Orlando, 2011
- [272] TERWEN, Stephan: *Vorausschauende Längsregelung schwerer Lastkraftwagen Elektronische Ressource*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2010 <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000015696>. – ISBN 978–3–86644–481–2
- [273] THEMANN, P. ; ECKSTEIN, L.: Modular approach to energy efficient driver assistance incorporating driver acceptance. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012. – ISSN 1931–0587, S. 1023–1028
- [274] THEMANN, Philipp ; BOCK, Julian ; ECKSTEIN, Lutz: Energy efficient adaptive cruise control utilizing V2X information. In: *9th ITS European Congress*. Dublin, Ireland, June 2013
- [275] THOMA, Stephan: *Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich*, Technische Universität München, Fakultät für Informatik, Diss., 2010. <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20100428-818177-1-7>
- [276] THOMAS, B. ; LOWENAU, J. ; DUREKOVIC, S. ; OTTO, H.-U.: The ActMAP - FeedMAP framework A basis for in-vehicle ADAS application improvement. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, 2008. – ISSN 1931–0587, S. 263–268

- [277] TIELERT, T. ; KILLAT, M. ; HARTENSTEIN, H. ; LUZ, R. ; HAUSBERGER, S. ; BENZ, T.: The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emissions. In: *Internet of Things (IOT), 2010*, 2010, S. 1–8
- [278] TOULIOU, K. ; BRIGNOLO, R. ; INNAMAA, S. ; RÄMÄ, A. ; PAGLE, K. ; WILL, D.: TeleFOT applications efficiency impact / Field Operational Test of Aftermarket and Nomadic Devices in Vehicles (TeleFOT). Version: 2012. http://www.telefot.eu/files/file/deliverables/Final/TeleFOT_D%204%205%203_TeleFOT%20applications%20%20Efficiency%20impact_v31.pdf. 2012. – Forschungsbericht
- [279] TÖPLER, Felix ; BIERMANN, Jan-Welm: Development of a compact hybrid vehicle with a foresighted energy management system. In: *FISITA World Automotive Congress*. München, 2008
- [280] TREIBER, Martin ; HELBING, Dirk: Explanation of observed features of self-organization in traffic flow. In: *arXiv preprint cond-mat/9901239* (1999). <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9901239>
- [281] TREIBER, Martin ; HENNECKE, Ansgar ; HELBING, Dirk: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. In: *Phys. Rev. E* 62 (2000), Aug, 1805–1824. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805>. – DOI 10.1103/PhysRevE.62.1805
- [282] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: Einfache Fahrzeugfolgemodelle. Version: 2010. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05228-6_10. In: *Verkehrsdynamik und -simulation*. Springer Berlin Heidelberg, 2010 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978–3–642–05227–9, 139-153
- [283] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: Zelluläre Automaten. Version: 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642->

- 05228-6_13. In: *Verkehrsdynamik und -simulation*. Springer Berlin Heidelberg, 2010 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-642-05227-9, 187-195
- [284] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: Car-Following Models Based on Driving Strategies. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4_11. In: *Traffic Flow Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-32459-8, 181-204
- [285] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: Elementary Car-Following Models. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4_10. In: *Traffic Flow Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-32459-8, 157-180
- [286] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: Modeling Human Aspects of Driving Behavior. Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4_12. In: *Traffic Flow Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978-3-642-32459-8, 205-224
- [287] TROMMER, S. ; HÖLTL, A.: Perceived usefulness of eco-driving assistance systems in Europe. In: *Intelligent Transport Systems, IET* 6 (2012), Nr. 2, S. 145–152. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2011.0154>. – DOI 10.1049/iet-its.2011.0154. – ISSN 1751-956X
- [288] UHLER, Werner ; SCHERL, Michael ; LICHTENBERG, Bernd: Driving Course Prediction Using Distance Sensor Data. In: *International Congress & Exposition*. Detroit, Michigan, USA : SAE International, 1999
- [289] UNFCCC: *Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President*. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>. – Paris Climate Change Conference - November 2015, COP 21

- [290] USMAN, M.: Power Efficiency of Sign Test and Wilcoxon Signed Rank Test Relative to T-Test. In: *Mathematical Theory and Modeling* 5 (2015), Nr. 12, 53-59. <http://www.iiste.org/Journals/index.php/MTM/article/view/26851>
- [291] VCD: *Spritsparen - Schont Geldbeutel und Umwelt*. <https://www.vcd.org/themen/auto-umwelt/spritsparen/>. – VCD Verkehrsclub Deutschland e.V., Abgerufen am 04.01.2016
- [292] VENNEBÖRGER, Martin ; STRÜBEL, Christian ; WIES, Burkhard ; WIESE, Klaus: Leichtlaufreifen für Pkw mit niedrigem CO₂-Ausstoss. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 115 (2013), Nr. 7-8, 572-577. <http://dx.doi.org/10.1007/s35148-013-0213-1>. – DOI 10.1007/s35148-013-0213-1. – ISSN 0001-2785
- [293] VERMA, Rajeev ; NAHAR, Nikhil ; TANG, Zhijun ; SALTSMAN, Benjamin: A Driver Assistance System for Improving Commercial Vehicle Fuel Economy. In: *SAE Technical Paper 2013-26-0018*, 2013
- [294] VOGEL, Katja: A comparison of headway and time to collision as safety indicators. In: *Accident Analysis & Prevention* 35 (2003), Nr. 3, 427 - 433. [http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00022-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00022-2). – ISSN 0001-4575
- [295] VOGT, Martin: *Autofahrertypentest - Raser oder Regelfahrer?* Focus Online. http://www.focus.de/auto/ratgeber/sicherheit/fahrsicherheitsspecial/autofahrertypentest_aid_54630.html. Version: 2014. – Abgerufen am 19.06.2014
- [296] VOLKSWAGEN: *Eco Driving - Streckenvorausschau im Antrieb*. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/innovation/fuel_and_propulsion/Eco_Driving.html. – Abgerufen am 04.01.2016
- [297] VOORT, Mascha van d. ; DOUGHERTY, Mark S. ; MAARSEVEEN, Martin van: A prototype fuel-efficiency support tool.

- In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 9 (2001), Nr. 4, 279 - 296. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00038-3](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00038-3). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00038-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00038-3). – ISSN 0968-090X
- [298] VORBERG, Dirk ; BLANKENBERGER, Sven: Die Auswahl statistischer Tests und Maße. In: *Psychologische Rundschau* 50 (1999), Nr. 3, S. 157-164. <http://dx.doi.org/10.1026//0033-3042.50.3.157>. – DOI 10.1026//0033-3042.50.3.157
- [299] VÁRHELYI, András ; HJÄLMDAHL, Magnus ; HYDÉN, Christer ; DRASKÓCZY, Magda: Effects of an active accelerator pedal on driver behaviour and traffic safety after long-term use in urban areas. In: *Accident Analysis & Prevention* 36 (2004), Nr. 5, 729 - 737. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2003.06.001>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2003.06.001>. – ISSN 0001-4575
- [300] WAGENINGEN-KESSELS, Femke van ; LINT, Hans van ; VUIK, Kees ; HOOGENDOORN, Serge: Genealogy of traffic flow models. In: *EURO Journal on Transportation and Logistics* (2014), 1-29. <http://dx.doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>. – DOI 10.1007/s13676-014-0045-5. – ISSN 2192-4376
- [301] WAGNER, C. ; SALFELD, M. ; KNOLL, S. ; REUSS, H.-C.: Quantifizierung des Einflusses von ACC auf die CO₂-Emissionen im kundenrelevanten Fahrbetrieb. In: *10. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*, 2010
- [302] WAHL, H.-G. ; BAUER, K.-L. ; GAUTERIN, F. ; HOLZAPFEL, M.: A real-time capable enhanced dynamic programming approach for predictive optimal cruise control in hybrid electric vehicles. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2013, S. 1662-1667

- [303] WAHL, H.-G. ; GAUTERIN, F.: An iterative dynamic programming approach for the global optimal control of hybrid electric vehicles under real-time constraints. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013. – ISSN 1931–0587, S. 592–597
- [304] WAHL, H. G. ; HOLZÄPFEL, M. ; GAUTERIN, F.: Approximate dynamic programming methods applied to far trajectory planning in optimal control. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, 2014. – ISSN 1931–0587, S. 1085–1090
- [305] WALLENTOWITZ, Henning (Hrsg.) ; REIF, Konrad (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Wiesbaden : Vieweg, 2006 (SpringerLink : Bücher). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9121-1>. – ISBN 978-3-8348-9121-1
- [306] WEBER, Rolf ; KOST, Norbert: 24-GHz-Radarsensoren für Fahrerassistenzsysteme. In: *ATZelextronik 1* (2006), Nr. 2, 16-22. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03223817>. – DOI 10.1007/BF03223817. – ISSN 1862–1791
- [307] WEISS, Christel: *Basiswissen Medizinische Statistik*. 3. Auflage. Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2005
- [308] WEIDEMANN, ReinerE. ; SCHRÖCK, David: Fahrzeugentwicklung im Windkanal. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117 (2015), Nr. 12, 32-37. <http://dx.doi.org/10.1007/s35148-015-0145-z>. – DOI 10.1007/s35148-015-0145-z. – ISSN 0001–2785
- [309] WEIMER, Andreas: *Praktikumsbericht*. Februar 2014. – Universität Stuttgart, Studiengang Geodäsie und Geoinformatik
- [310] WEINBERGER, Markus: *Der Einfluß von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten*, Technischen Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2001

- [311] WELSH, Ruth ; MORRIS, Andrew ; REED, Steven ; WALLGREN, Pontus ; INNAMAA, Satu ; RÄMÄ, Anna ; PEREZ, Oscar M. ; BIRRELL, Stewart ; WILL, Devid ; BRIGNOLO, Roberto ; GUIDOTTI, Leandro: Impacts on Safety - Results and Implications / Field Operational Test of Aftermarket and Nomadic Devices in Vehicles (TeleFOT). Version: 2013. <http://www.telefot.eu/files/file/deliverables/Final/TeleFOTD4%203%203v0%204.pdf>. 2013. – Forschungsbericht
- [312] WHYDELL, Andy ; BASTEN, Mark ; SEEWALD, Alois: Radarbasierte Fahrerassistenzsysteme für alle Fahrzeugklassen. In: *ATZelektronik* 4 (2009), Nr. 6, 52-57. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03223988>. – DOI 10.1007/BF03223988. – ISSN 1862-1791
- [313] WIEDEMANN, Jochen ; WIESEBROCK, Andreas ; HEIDORN, Henrik: Kann man mit dem Luftwiderstandsbeiwert die Batteriekosten senken? Version: 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00790-4_10. In: SIEBENPFEIFFER, Wolfgang (Hrsg.): *Energieeffiziente Antriebstechnologien* Bd. 1. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – ISBN 978-3-658-00789-8, 60-65
- [314] WIEDEMANN, Rainer ; LEUTZBACH, Prof. Dr.-Ing. W. (Hrsg.): *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974. – Habilitationsschrift
- [315] WILL, D. ; SCHRÖDER, U. ; BIRRELL, S. ; PEREZ, O. M. ; INNAMAA, S. ; RÄMÄ, A. ; WALLGREN, P.: Impacts on Environment - Results and Implications / Field Operational Test of Aftermarket and Nomadic Devices in Vehicles (TeleFOT). Version: 2012. http://www.telefot.eu/files/file/deliverables/Final/TeleFOT_D463_Impacts%20on%20environment%20-%20results%20and%20implications_v06.pdf. 2012. – Forschungsbericht

- [316] WILLIGEN, W. van ; HAASDIJK, E. ; KESTER, L.: Fast, comfortable or economical: Evolving platooning strategies with many objectives. In: *Intelligent Transportation Systems - (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*, 2013, S. 1448–1455
- [317] WINNER, Hermann: Radarsensorik. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8619-4_13. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978–3–8348–1457–9, 123-171
- [318] WINNER, Hermann ; DANNER, Bernd ; STEINLE, Joachim: Adaptive Cruise Control. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8619-4_33. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978–3–8348–1457–9, 478-521
- [319] WISCHHOF, L. ; EBNER, A. ; ROHLING, H.: Information dissemination in self-organizing intervehicle networks. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 6 (2005), Nr. 1, S. 90–101. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2004.842407>. – DOI 10.1109/TITS.2004.842407. – ISSN 1524–9050
- [320] WISCHHOF, L. ; EBNER, A. ; ROHLING, H. ; LOTT, M. ; HALFMANN, R.: SOTIS - a self-organizing traffic information system. In: *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual Bd.* 4, 2003. – ISSN 1090–3038, S. 2442–2446 vol.4
- [321] WU, Changxu ; ZHAO, Guozhen ; OU, Bo: A fuel economy optimization system with applications in vehicles with human drivers and autonomous vehicles. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 16 (2011), Nr. 7, 515 - 524. <http://dx.doi.org/>

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2011.06.002>. – DOI
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2011.06.002>. – ISSN 1361–9209
- [322] WU, Jianping ; BRACKSTONE, Mark ; McDONALD, Mike: Fuzzy sets and systems for a motorway microscopic simulation model. In: *Fuzzy Sets and Systems* 116 (2000), Nr. 1, 65 - 76. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00038-X](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00038-X). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00038-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00038-X). – ISSN 0165–0114
- [323] XIA, Haitao ; WU, Guoyuan ; BORIBOONSOMSIN, Kanok ; BARTH, Matthew J.: Development and evaluation of an enhanced eco-approach traffic signal application for Connected Vehicles. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2013, S. 296–301
- [324] XIA, Yinchao: *Entwicklung und Validierung einer Zielobjektauswahl für neuartige Fahrerassistenzsysteme*, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2012
- [325] YAY, E. ; MARTINEZ MADRID, N.: SEEDrive - Using in-car serial-bus systems for safe and energy efficient driving. In: *Proceedings of the 11th Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES)*, 2013, S. 1–6
- [326] YOUNG, Mark S. ; BIRRELL, Stewart A. ; STANTON, Neville A.: Safe driving in a green world: A review of driver performance benchmarks and technologies to support smart driving. In: *Applied Ergonomics* 42 (2011), Nr. 4, 533 - 539. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2010.08.012>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2010.08.012>. – ISSN 0003–6870. – Applied Ergonomics and Transportation Safety
- [327] ZABAT, Michael ; STABILE, Nick ; FRASCAROLI, Stefano ; BROWAND, Frederick: The Aerodynamic Performance of Platoons: Final

Report / California Path Program, Institute of Transportation Studies,
University of California. 1995. – Forschungsbericht

- [328] ZADEH, L.A.: Fuzzy sets. In: *Information and Control* 8 (1965), Nr. 3, 338 - 353. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X). – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X). – ISSN 0019-9958
- [329] ZHANG, Jianlong ; IOANNOU, P.A.: Longitudinal control of heavy trucks in mixed traffic: environmental and fuel economy considerations. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 7 (2006), March, Nr. 1, S. 92–104. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2006.869597>. – DOI 10.1109/TITS.2006.869597. – ISSN 1524-9050
- [330] ZHAO, Li ; SUN, Jian: Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors Under Connected-vehicle Environment. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 96 (2013), Nr. 0, 914 - 924. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.105>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.105>. – ISSN 1877-0428. – Intelligent and Integrated Sustainable Multimodal Transportation Systems Proceedings from the 13th {COTA} International Conference of Transportation Professionals (CICTP2013)
- [331] ZLOCKI, Adrian ; ECKSTEIN, Univ.-Prof. Dr.-Ing. L. (Hrsg.): *Fahrzeuglängsregelung mit kartenbasierter Vorausschau*. 1. Aufl. Aachen : fka - Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH, 2010 (124). – 153 S.. – ISBN 978-3-940374-26-4

G Betreute Arbeiten

Im Folgenden findet sich eine Auflistung der Diplomarbeiten und Praktika, die vom Autor während der Erstellung dieser Arbeit betreut wurden und deren Ergebnisse verwendet wurden:

- Xia, Yinchao: Entwicklung und Validierung einer Zielobjektauswahl für neuartige Fahrerassistenzsysteme, Diplomarbeit [324]
- Ponomarev, Igor: Untersuchung des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von verschiedenen Ego-Fahrstrategien, Diplomarbeit [217]
- Senyüz, Gökhan: Evaluierung eines Fahrerassistenzsystems zur energieeffizienten Längsregelung, Diplomarbeit [260]
- Grob, Andreas: Praktikumsbericht [106]
- Weimer, Andreas: Praktikumsbericht [309]

H Vorabveröffentlichungen

Während der Erstellung dieser Arbeit wurden vom Autor folgende Tagungsbeiträge und Patentanmeldungen vorab veröffentlicht:

- Adaptive Cruise Control: A Behavioral Assessment of Following Traffic Participants Due to Energy Efficient Driving Strategies, Veröffentlichung [124]
- Determining a Driving Strategy For a Vehicle, Patentanmeldung [122]
- The impact of energy efficient driving strategies on rear-end safety, Veröffentlichung [123]

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrentriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
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. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. 2013
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
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. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 31** Michael Eckert
**Energieoptimale Fahrdynamikregelung
mehrmotoriger Elektrofahrzeuge.** 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3
- Band 32** Martin Scherer
**Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen.
Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung
mit aufgeprägtem Volumenstrom.** 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
**Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines
dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven
Energieübertragung.** 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher
**Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit
sekundärgeregelten Antrieben beim Einsatz in
mobilen Arbeitsmaschinen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
**Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation
von Stromabnehmern.** 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
**Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung
von Nutzfahrzeugen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 38** Ralf Oberfell
Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug. Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren. 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7
- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2016
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb. 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl
Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0422-1
- Band 44** Jennifer Heck
Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. 2016
ISBN 978-3-7315-0443-6

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- 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. 2016
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel
Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. 2016
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriem
Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung. 2016
ISBN 978-3-7315-0489-4
- Band 48** Mohanad El-Haji
Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. 2016
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**
22./23. September 2016 in Karlsruhe. 2016
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
15. Februar 2017, Karlsruhe. 2017
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier
Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege. 2017
ISBN 978-3-7315-0620-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 52** Mathias Cabrera Cano
Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0621-8
- Band 53** Arwed Schmidt
Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr. 2017
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. 2017
ISBN 978-3-7315-0630-0
- Band 55** Frank Christof Stalter
Ansätze zur akustischen Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge unter Antriebsmoment. 2017
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. 2017
ISBN 978-3-7315-0684-3
- Band 57** Ulrico Peckelsen
Objective Tyre Development. Definition and Analysis of Tyre Characteristics and Quantification of their Conflicts. 2017
ISBN 978-3-7315-0713-0
- Band 58** Stefan Haag
Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten. 2018
ISBN 978-3-7315-0752-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Band 59 Dirk Hülsebusch
**Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung -
Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit. 2018**
ISBN 978-3-7315-0755-0

Die Steigerung der Fahrsicherheit und Energieeffizienz gehören zu den wichtigsten Treibern der Fahrerassistenz. Dabei impliziert eine energieeffiziente Fahrweise häufig auch eine sichere Fahrweise. Dagegen existieren jedoch auch Fahrstrategien, die zu einer Verschlechterung der Fahrsicherheit führen können. Insbesondere der Einfluss von energieeffizienten Fahrstrategien auf das Abstandsverhalten von nachfolgenden Fahrern wurde bisher noch nicht ausreichend untersucht. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit der Fragestellung, ob sich die Sicherheit verschlechtert, wenn das vorausfahrende Fahrzeug eine energieeffiziente Fahrweise anwendet. Des Weiteren werden Maßnahmen vorgeschlagen und erprobt, die in Zukunft eine Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Sicherheit und Energieeffizienz ermöglichen.