

Jochen Kramer

Kollektive Energieeffizienz auf mehrspurigen Straßen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Kollektive Energieeffizienz auf mehrspurigen Straßen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Jochen Kramer

geb. in Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung:

01.02.2018

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Eric Sax

Korreferent:

Prof. Dr. J. Marius Zöllner

Danksagung

Die Erstellung einer Doktorarbeit erfordert den Einsatz unzähliger Stunden an Arbeit, von Disziplin und größter Sorgfalt. Ohne die Unterstützung vieler Personen während meiner Promotion wäre dies kaum möglich gewesen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich in der Zeit und auf dem Weg meiner Promotion begleitet haben.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Informatik (FZI) in Karlsruhe. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus D. Müller-Glaser, ehem. Direktor am FZI, ehem. Institutsleiter des Instituts für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) am KIT und mein Doktorgroßvater, Ihnen danke ich ganz besonders dafür, dass Sie mich nach dem Studium zur Promotion ermutigt haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten. Im gleichen Zuge gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Eric Sax, Direktor am FZI, Institutsleiter des ITIV am KIT und mein Doktorvater, für die Übernahmen des Hauptreferates. Vielen Dank für Ihre Zeit, die Sie für viele Anregungen, Diskussionen und den wissenschaftlichen Austausch aufgebracht haben sowie ihre unnachgiebige Art, die wissenschaftlichen Arbeiten voranzutreiben. Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr. J. Marius Zöllner für die Übernahmen des Korreferats.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Werner Nahm danke ich für die Übernahmen des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller und Herrn Prof. Dr.-Ing. John Jelonnek für den Prüfungsbesitz. Danke Herr Jelonnek, für ihr ausgeprägtes Interesse an meinem Promotionsthema und die weitreichende Diskussion, die mich sehr ermuntert hat.

Mein ganz herzlicher Dank gilt der Vector Stiftung, die mein Promotionsthema gefördert und begleitet hat. Daher auch mein besonderer Dank an die Stifter Herrn Eberhard Hinterer, Herrn Martin Litschel und Herrn Dr. Helmut Schelling. Ich habe stets ihre Gastfreundlichkeit und die Diskussionen mit Ihnen zu meinem Promotionsthema sehr genossen.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Arbeitskollegen im Bereich Embedded Systems and Sensors Engineering (ESS) am FZI für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die alltäglichen Gespräche, besonders mit den Bürokollegen. Gleicher Dank gilt auch den

zahlreichen Studenten, egal ob Abschlussarbeit oder studentische Hilfskraft, die mich in der Zeit meiner Promotion am FZI begleitet haben.

Familie Braun danke ich für die stets exzellente kulinarische Versorgung während dieser Zeit und die dadurch gegebene Ablenkung in stressigen Zeiten.

Meiner gesamten Familie gilt schließlich mein persönlicher Dank, insbesondere meinen Eltern Arno und Annette sowie meinen beiden Brüdern Tommi und Fabian. Ihr habt nicht nur immer für das leibliche Wohl gesorgt, sondern auch ganz lieben Dank für die vielen Seiten Korrekturlesen und die nötige Abwechslung mit themenfremden Tätigkeiten.

Mein größter Dank gilt dir, liebe Meike, du hast mich durch alle Höhen und Tiefen meiner Promotion begleitet, hast mich in vermeintlich aussichtslosen Situationen wieder Hoffnung schöpfen lassen und stets den Weg nach vorne aufgezeigt. Vielen Dank für die Wanderungen in den Bergen, die Zeit zum Nachdenken mit sich brachten und nie ohne wissenschaftliche Diskussionen blieben. Danke für die vielen Dinge, um die du dich gekümmert hast, wenn ich keinen Kopf dafür hatte.

Forst, im Februar 2018
Jochen Kramer

Zusammenfassung

Die kontinuierliche Zunahme der Verkehrsdichte sowie der Wunsch nach autonomen Straßenfahrzeugen, lässt die Fahraufgabe aus technischer Sicht immer mehr zu einer vernetzten Aufgabe werden. Da sich die Fahrzeuge in ihrer Bewegung gegenseitig beeinflussen, reicht es zukünftig nicht mehr aus, sie ausschließlich isoliert zu betrachten, sondern die Energieoptimierungsbestrebungen sind zusätzlich unter Berücksichtigung des umliegenden Verkehrs durchzuführen. Ziel dieser Arbeit ist daher die fahrzeugübergreifende Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen auf Grundlage von Fahrmanöverentscheidungen, die dezentral in den Straßenfahrzeugen verortet sind.

Für eine kollektive Energieeffizienzbewertung wird eine Metrik entwickelt, welche die Belange aller Fahrzeuge in einem definierten Umfeld, das als taktisches Fahrzeugumfeld definiert wird, einbezieht. Es werden die tatsächlichen Energiebedarfe mithilfe einer analytischen Abschätzung normiert, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, ohne dabei den ursprünglichen Transportwunsch zu vernachlässigen. Die entstandene Effizienzmetrik ermöglicht die Analyse von simulierten Fahrscenarien. Für eine Überführung von realen Szenarien in die Simulation kommt ein teil-automatisiertes Vorgehen zum Einsatz, das aus Video-Aufzeichnungen relevante Informationen extrahiert.

Erkenntnisse der Szenarienanalysen und der Einsatz von Verhaltensmodellen aus den Verkehrswissenschaften bilden mit Anpassungen auf mehrere Fahrzeuge das Konzept eines kollektiven Energieeffizienz-Assistenten und einer zugehörigen Simulationsumgebung. Die Realisierung des Konzepts setzt eine umfangreiche und konsistente Erfassung sowie Interpretation des Fahrzeugumfeldes voraus. Dieser Herausforderung wird mit dem Aufbau eines abstrakten Modells begegnet, welches den Assistenten partitioniert und die Umfelderkennung abstrahiert. Eine prototypische Realisierung des Assistenten zeigt das Einsparpotential von Energie, Kraftstoff und CO_2 -Ausstoß der fahrzeugübergreifenden Betrachtungsweise basierend auf realen, aufgezeichneten und anschließend variierten Szenarien auf. Dabei integriert die Implementierung des Assistenten sowohl eine direkte Ausführung der ermittelten Manövervorschläge, wie auch die Anzeige über eine Tablet-App, welche das nähere Fahrzeugumfeld und die errechneten Fahrmanövervorschläge visualisiert.

Abstract

Due to continuous increase in traffic density as well as the desire for autonomous road vehicles, the driving task is getting more and more a connected task from a technical point of view. Because of interactions between vehicles while driving it will no longer be sufficient to consider each vehicle isolated. Energy optimization efforts have also to take the surrounding traffic into account. The aim of this thesis is therefore the cross-vehicle assessment of energy efficiency based on driving maneuver decisions, which are located decentrally in the road vehicles.

For a collective energy efficiency assessment, a metric is developed respecting the interests of all vehicles in a specified environment, which is defined as the tactical vehicle environment. The actual energy demand gets normalized through an analytical estimation to allow a comparability without neglecting the original transportation request. The developed efficiency metric allows the analysis of simulated driving scenarios. For a transformation from real scenarios into the simulation, a partly-automated approach is used that extracts relevant information from the video recordings.

Findings of the scenario analysis and the use of behavioral models from the traffic sciences with adaptations to several vehicles form the concept of a collective energy efficiency assistant and an associated simulation environment. The realization of the concept requires a comprehensive and consistent detection and interpretation of the vehicle environment. This challenge is met with the introduction of an abstract model, that partitions the assistant and abstracts the recognition of the surroundings. A prototypical realization of the assistant shows the saving-potential of energy, fuel and CO₂ emissions based on real, recorded and varied scenarios for the cross-vehicle consideration. The implementation of the assistant integrates both a direct execution of the determined maneuver suggestions, such as a visualization of the closer vehicle environment and the calculated driving maneuver suggestions via tablet app.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Zielsetzung und Beitrag	3
1.3. Hintergrund der Arbeit	4
1.4. Gliederung der Arbeit	5
2. Abstraktion von Fahrfunktionen	9
2.1. Aufbau des Kapitels	9
2.2. Grundlagen zu Fahrfunktionsarchitekturen	10
2.2.1. Begriffsdefinitionen	10
2.2.2. Laufzeitumgebungen	12
2.2.3. Drei Ebenen einer Fahraufgabe	16
2.2.4. Test und Absicherung	18
2.3. Stand der Wissenschaft und Technik zu Fahrfunktionsarchitek- turen	19
2.3.1. Automatisierungsgrade für Fahrfunktionen	19
2.3.2. Umfelderkennung und -interpretation	21
2.3.3. Conduct-by-Wire	23
2.3.4. Prototypische Funktionsarchitekturen für Fahrfunktionen	24
2.3.5. Anlehnung und Abgrenzung der eigenen Arbeit	28
2.4. Einführung des Intelligent Driving Automation Layers Modell .	29
2.4.1. Navigationsebene	32
2.4.2. Bahnführungsebene	33
2.4.3. Stabilisierungsebene	36
2.4.4. Umgebungsmodell	37
2.5. Evaluation des IDAL-Modells	38
2.5.1. Prototypisches Matlab Simulink Modell	38
2.5.2. Aufbau und Funktion	40
2.6. Erkenntnisse aus der Evaluation	42
2.6.1. Vergleich zum Stand der Wissenschaft und Technik . . .	43

2.6.2. Beitrag zur <i>herkömmlichen Entwicklung</i>	45
2.7. Zusammenfassung des Kapitels	47
3. Taktisches Fahrzeugumfeld und dessen Simulation	49
3.1. Aufbau des Kapitels	49
3.2. Begriffserläuterungen im Kontext der Fahraufgabe	50
3.2.1. Szenerie	50
3.2.2. Szene	51
3.2.3. Situation	51
3.2.4. Szenario	52
3.2.5. Manöver	54
3.2.6. Fahrzeugumfeld	54
3.2.7. Strategie	56
3.2.8. Taktik	56
3.2.9. Verkehrsfluss	56
3.2.10. Verkehrsdichte	57
3.2.11. Simulation	57
3.3. Stand der Wissenschaft und Technik zur Simulation von Fahr- zenarien	58
3.3.1. Verkehrssimulation	58
3.3.2. Verhaltensmodelle aus der Verkehrssimulation	60
3.3.3. Verkehrssimulationswerkzeuge	64
3.3.4. Fahrzeugsimulation	65
3.3.5. Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft und Technik	69
3.4. Das taktische Fahrzeugumfeld	70
3.4.1. Definition: Taktisches Fahrzeugumfeld	71
3.4.2. Abschätzung der Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld	72
3.5. Zusammenfassung des Kapitels	74
4. Das Paradigma <i>Connected Efficiency</i>	75
4.1. Aufbau des Kapitels	75
4.2. Grundlagen zur Energieeffizienz in Kraftfahrzeugen	76
4.2.1. Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs	77
4.2.2. Angabe des Energiebedarfs	78
4.3. Grundlegendes Energiebedarfsmodell für ein einzelnes Fahrzeug	79
4.3.1. Krafteinwirkung durch den Luftwiderstand	80
4.3.2. Einflüsse durch die Rollreibung	80
4.3.3. Aufzubringende Kraft zur Beschleunigung	81

4.3.4.	Einfluss der Streckensteigung	82
4.3.5.	Hilfskraft Bremswiderstand	82
4.3.6.	Leistungs- und Energieberechnung	82
4.4.	Stand der Wissenschaft und Technik	84
4.4.1.	Zwei-Ebenen Ansatz eines vorausschauenden Cruise Control	84
4.4.2.	EDSS - Eco-Driving Support System	85
4.4.3.	Eco-ACC für Elektro und Hybridfahrzeuge	86
4.4.4.	ECC - Economic Cruise Control	86
4.4.5.	Porsche ACC Innodrive	87
4.4.6.	Der „Wirkungsgrad“ des Fahrzeugs	87
4.4.7.	Test- / Fahrzyklen	88
4.4.8.	Abgrenzung der eigenen Arbeit	90
4.5.	CE Energiebedarfsmodell	91
4.5.1.	Zusammenfassung der Modelleigenschaften	94
4.5.2.	Die Energienormierung und taktische Energieeffizienz	95
4.5.3.	Energieeffizienz im taktischen Fahrzeugumfeld	97
4.5.4.	Die Connected Efficiency Energieeffizienz-Metrik	100
4.6.	Simulative Evaluation der Connected Efficiency mithilfe von Matlab Simulink	102
4.7.	Zusammenfassung des Kapitels	109
5.	Sensitivität der Einflussgrößen	111
5.1.	Aufbau der Sensitivitätsanalyse	111
5.2.	Betrachtete Szenarien	112
5.3.	Auswahl der zu variierenden Parameter	114
5.3.1.	Fahrzeugspezifische Parameter	114
5.3.2.	Streckenabhängige Parameter	114
5.3.3.	Fahrbewegungsabhängige Parameter	116
5.4.	Durchführung der Analyse	116
5.5.	Ergebnisse der Analyse und Interpretation	121
5.5.1.	Fall 1 - Konstante Fahrt auf gerader Strecke	121
5.5.2.	Fall 2 - Überholvorgang	123
5.5.3.	Fall 3 - Ausbremsvorgang	127
5.5.4.	Fall 4 - Beschleunigungsvorgang mit veränderlicher Streckensteigung	131
5.6.	Konsolidierung der Analyseergebnisse	133

6. Konzept eines Energieeffizienz-Assistenten im taktischen Fahrzeugumfeld	135
6.1. Erweiterung bestehender Bewegungsmodelle	136
6.1.1. Anpassungen des Intelligent Driver Model (IDM)	137
6.1.2. Anpassungen von Minimize Overall Braking Induced by Lane Changes (MOBIL)	138
6.2. Auswahl der Manöver	139
6.3. Konzept und Einordnung	141
6.3.1. Konzept des kollektiven Energieeffizienz-Assistenten	143
6.3.2. Konzept der Evaluierungsumgebung	145
6.4. Zusammenfassung des Kapitels	146
7. Modellparameteroptimierung des taktischen Energieeffizienz-Assistenten	147
7.1. Realistische Fahrscenarien aus Videoaufzeichnungen	147
7.1.1. Synchronisation der Aufzeichnungen	151
7.1.2. Inverse perspektivische Geometrie	151
7.1.3. Fahrzeugdetektion	152
7.1.4. Fahrspurerkennung	154
7.1.5. Lokalisierung der Fahrzeuge	155
7.1.6. Simulationsgenerierung	156
7.2. Basisszenario und ihre Variationen	157
7.2.1. Basisszenario	157
7.2.2. Variationsvielfalt	158
7.3. Optimierung der IDM und MOBIL Modellparameter	160
7.3.1. Optimierungsaufgabe	160
7.3.2. Zu optimierende Parameter	162
7.3.3. Optimierungsverfahren	163
7.3.4. Zielfunktion	163
7.3.5. Eingesetzter Optimierungsalgorithmus	164
7.3.6. Ergebnisse aus der Optimierung	165
7.4. Einsparpotential des Energieeffizienz-Assistenten	166
7.5. Zusammenfassung des Kapitels	170
8. Prototypische Realisierung des taktischen Energieeffizienz-Assistenten	173
8.1. Partitionierung der Implementierung	174
8.1.1. Thread Umgebungsmodell	175

8.1.2. Thread EnergieEffizienzFunktion	177
8.1.3. Thread ManoeverAusfuehrung	178
8.1.4. Thread Visualisierung	179
8.1.5. Datenstruktur zur Übertragung der Anzeigehalte . . .	181
8.1.6. Tablet App zur Visualisierung	183
8.2. Aufbau eines Demonstrators	185
8.3. Erkenntnisse aus dem Demonstrator	188
8.4. Zusammenfassung des Kapitels	189
9. Zusammenfassung und Ausblick	191
9.1. Zusammenfassung	191
9.2. Ausblick	193
Abkürzungsverzeichnis	205
10. Bibliografie	209
A. Fahrzeugstatistiken	225
A.1. Fahrzeugklassen	225
A.2. Verkehrsverteilung	225
B. Fahrzeugspezifische Kenngrößen	229
C. Modellierungsartefakte	237
C.1. Darstellung von Aktivitäten	237
C.2. Darstellung von Zuständen	237
C.3. Darstellung von statischen Zusammenhängen	237
C.4. Darstellung dynamischer Abläufe	239
D. Variation eines Basisszenarios	241
E. Beispiel einer Testszenariobeschreibung	243

1. Einleitung

Nach einem Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen [FNS14] werden sich mittelfristig die Straßenverkehrsnetze in Mitteleuropa bei steigender Verkehrsdichte in Bezug auf Netzdichte und Kapazität nicht wesentlich verändern, während die Wünsche der Verkehrsteilnehmer nach individueller Mobilität und eigenem Komfort weiter zunehmen werden. Mit steigendem Verkehrsaufkommen¹ auf Autobahnen, Bundesstraßen oder mehrspurigen innerstädtischen Straßen, spielt das Streben nach umweltfreundlicher Mobilität eine zentrale Rolle, um den Fluss des Gesamtverkehrs unter dem Dilemma individueller Bedürfnisse und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Verkehrssystems auch zukünftig aufrechterhalten zu können. Gerade in Stoßzeiten wirken sich Veränderungen im Gefüge der Verkehrsteilnehmer (vgl. Abb. 1.1) drastisch auf diesen Fluss aus. Dabei entsteht ein Ziehharmonika-Effekt, bei dem viele Verkehrsteilnehmer ihre Bewegungsenergie teilweise schnell abbauen müssen, um sie kurze Zeit später wieder aufzubauen.

Einerseits sind bauliche Veränderungen an bestehender Infrastruktur sowie Modernisierungen der Verkehrsleitsysteme Optionen, um aus makroskopischer Sicht derartigen Verkehrsstörungen entgegenzuwirken. Dadurch lassen sich in erster Linie globale Regelungen (z.B. Geschwindigkeitsbeschränkung, Überholverbot, zusätzliche Fahrspuren etc.) aufstellen, die es für alle Verkehrsteilnehmer gleichermaßen zu beachten gilt. Mit solchen Maßnahmen ist es allerdings nur eingeschränkt möglich auf Abhängigkeiten und Belange unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer individuell einzugehen. Weiterhin besteht, unter anderem im Zuge der Automatisierung von Fahrzeugen [Gas+12], ein gesteigertes Interesse an einer möglichst energieeffizienten Gestaltung der Fahrzeugführung auf Basis von Assistenzfunktionen, um zukünftigen Gesetzesvorgaben und Richtlinien [Kom17] gerecht zu werden. Allerdings optimieren die bis dato bekannten Assistenzsysteme nur auf die eigenen Belange in Bezug

¹ Statistiken des deutschen Kraftfahrtbundesamt (KBA): http://www.kba.de/DE/Statistik/-Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometer_node.html

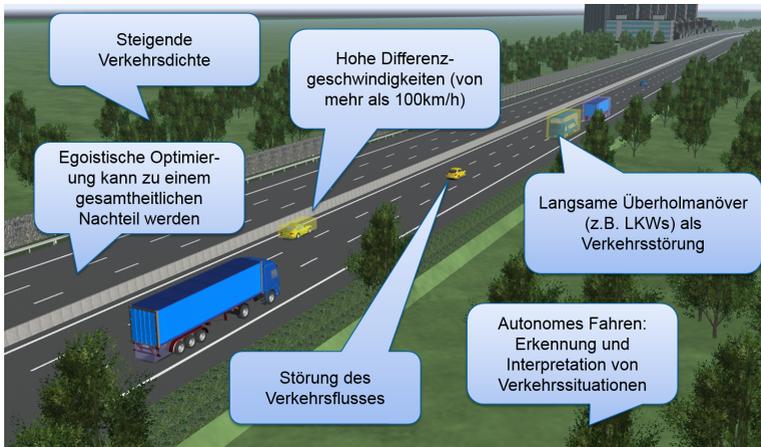


Abbildung 1.1.: Herausforderungen auf mehrspurigen baulich getrennten Straßen

auf das sog. Ego-Fahrzeug und tragen daher nur bedingt positiv zu einer kollektiven Verkehrshomogenität bei.

1.1. Motivation

In den vergangenen Jahrzehnten sind signifikante Veränderungen der Politik und Gesellschaft erkennbar geworden, die zu einem neuen ökonomischen und ökologischen Bewusstsein in Bezug auf Kraftfahrzeuge geführt haben [Ele12]. Treibende Kräfte sind, neben anderen, gesetzliche Vorgaben der Europäischen Union [EU09] sowie ein steigendes Umweltbewusstsein und der Wunsch nach Nachhaltigkeit in der Mobilität. Im Zuge dessen werden immer striktere gesetzliche Richtlinien von der öffentlichen Hand erlassen, die den CO_2 -Ausstoß basierend auf Fahrzeugklassen begrenzen [Kom17], um schließlich ein umweltfreundlicheres Gesamtverkehrssystem zu erhalten.

Die Betrachtung der Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen erfolgt dabei allerdings in isolierten und voneinander unabhängigen Untersuchungen auf

Basis technischer Parameter und standardisierten Fahrzyklen, die eine Bewertung des Gesamtsystems außer Acht lassen. Durch das zunehmende Verkehrsaufkommen und dem Trend zur Automatisierung von Fahrzeugen [ZS15; Gas+12], besonders auf Autobahnen und vergleichbaren mehrspurigen Straßen, ergeben sich neue Möglichkeiten, über die isolierte Betrachtung des Energiebedarfs des jeweils einzelnen Fahrzeugs hinaus, den Verkehrsfluss zu optimieren.

Die Energieeffizienz wird im Wesentlichen durch wiederholtes Bremsen und Beschleunigen beeinflusst [AMW07], das seinerseits abhängig von dem umgebenden Verkehr ist. Aus diesem Grund kann die Energieeffizienz von Fahrzeugen nicht weiter isoliert und individuell betrachtet werden, sondern muss im Gesamtsystem bewertet werden. Durch die Berücksichtigung aller Fahrzeuge und die Abhängigkeiten der Einzelaktionen untereinander ist eine Bewertung und Optimierung nicht nur über einzelne Fahrzeuge sondern über das gesamte Fahrzeugumfeld erforderlich. Deshalb stellt die Optimierung der Energieeffizienz auf kollektiver Basis in Zukunft eine neue Herausforderung dar.

1.2. Zielsetzung und Beitrag

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Assistenzfunktion, die den Fahrzeugführer auf mehrspurigen und baulich getrennten Straßen mit hohen Differenzgeschwindigkeiten bei seiner Entscheidungsfindung zur Auswahl der unmittelbar anstehenden Fahrmanöver unterstützt. Die Vorschläge zur Entscheidung sollen dabei auf einer fahrzeugübergreifenden Bewertung der Energieeffizienz basieren und zusätzlich das Ziel verfolgen, den Verkehrsfluss zu homogenisieren. Dies führt zu folgender konkreten Forschungsfrage:

Wie kann mithilfe technischer Mittel in Fahrzeugen eine Homogenisierung des Verkehrsflusses und eine kollektive Energieeffizienzsteigerung auf mehrspurigen und baulich getrennten Straßen erreicht werden?

Dieses Ziel setzt allerdings voraus, dass unterschiedliche Situationskonstellationen erkannt, klassifiziert und bewertet werden können. Eine Situation umfasst dabei die Infrastruktur (Straße, Verkehrszeichen, Markierungen, etc.),

die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Lichtverhältnisse, Wind, etc.) und weitere Verkehrsteilnehmer [Ulbr+15], womit der gewünschten Assistenzfunktion das gesamte Fahrzeugumfeld für eine erfolgreiche Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen muss.

Moderne Fahrzeuge besitzen eine Vielzahl an Sensoren, mithilfe derer einzelne Aspekte des Umfeldes bereits detailliert ermittelt werden können [AG13]. Diese Sensoren sind bisher allerdings dediziert für ein einzelnes Assistenzsystem (z.B. Notbremsassistent, Spurhalteassistent, ACC, etc.) integriert. Ansatzweise bedienen die gleichen Sensoren mehrere Funktionen, jedoch findet noch keine gesamtheitliche Umfelderkennung und Interpretation der Daten statt. Neben der Bewertung und Entscheidungsfindung bezüglich einer kollektiven Energieeffizienz, stellen die einheitliche und konsistente Umfeldwahrnehmung und Interpretation innerhalb eines Fahrzeugs weitere Herausforderungen im Kontext dieser Arbeit dar. Dies führt zu folgenden untergeordneten Forschungsfragen:

- Wie sind die Systemgrenzen für eine derartige Assistenzfunktion zu wählen?
- Was muss eine Metrik zur Bewertung der kollektiven Energieeffizienz auf mehrspurigen Straßen berücksichtigen?
- Wie können Fahrfunktionen abstrahiert von ihrer Realisierung im Fahrzeug analysiert werden?
- Wie können realistische Szenarien analysiert und bewertet werden?
- Wie könnte eine Realisierung eines kollektiven Energieeffizienz-Assistenten aussehen?

1.3. Hintergrund der Arbeit

Diese Arbeit entstand im Rahmen des von der Vector-Stiftung² geförderten Forschungsprojekts „Energy optimized Traffic Flow“ (EnopTraFlow). Im Zuge dessen untersuchte das FZI³ Möglichkeiten zur Homogenisierung des Verkehrsflusses mit dem Fokus auf mehrspurige und mit hohen Geschwindigkeiten befahrbare Straßen (Autobahn, Bundesstraße, Stadtautobahn, etc.). Dazu

² <http://www.vector-stiftung.de> (abgerufen am 31.12.2016)

³ FZI Forschungszentrum Informatik (<http://www.fzi.de>)

sollten unterschiedliche technische Voraussetzungen von Fahrzeugen und Infrastruktur zur Wahrnehmung und Interaktion mit ihrer Umgebung betrachtet werden (Radar, Kamera, Navigation, GPS, Verkehrsinformationen, Car2Car, Car2Infrastructure, etc.).

Das letztendliche Ziel des zweistufig gestalteten Projekts war es, ein prototypisches Fahrerassistenzsystem zu entwickeln, das die verfügbaren Fahrspuren, zusätzliche Verkehrsteilnehmer und bereitgestellte Fahrvorschläge basierend auf einer kollektiven Energiebewertung visuell für den Fahrer aufbereitet. Dadurch soll der Fahrer unterstützt werden, auf mehrspurigen Straßen energieeffizient im gesamtwirtschaftlichen Sinne zu handeln, um so den Verkehrsfluss zu homogenisieren.

Die Umsetzung dieses prototypischen Fahrerassistenzsystems erfordert jedoch die Definition einer kollektiven Energieeffizienz und die Eingrenzung des Betrachtungshorizonts. Genau an dieser Stelle setzt diese Arbeit an. Sie soll untersuchen, wie durch eine Fahrerassistenzfunktion die Energieeffizienz auf mehrspurigen und baulich getrennten Straßen gesteigert werden kann.

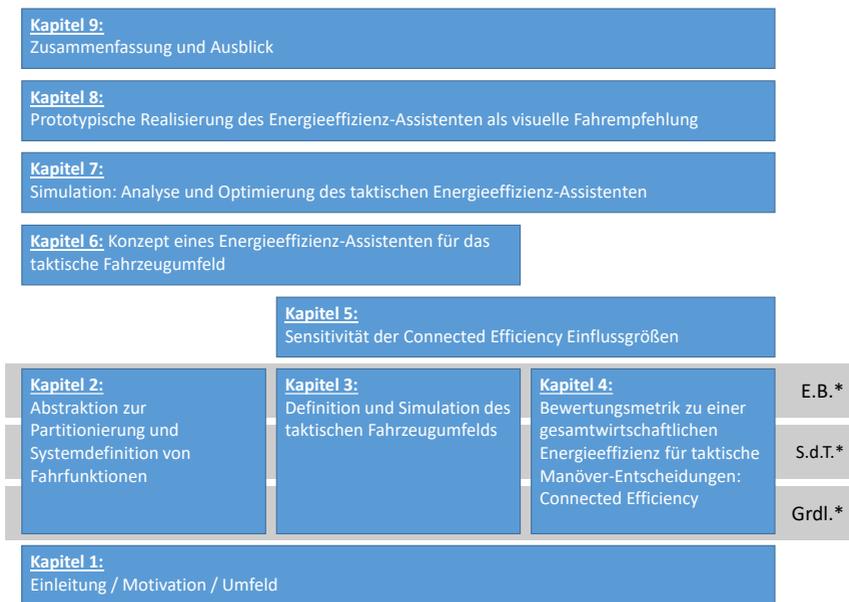
1.4. Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus neun Kapiteln beginnend mit einer Erläuterung des thematischen Umfeldes, welche die Beweggründe zu dem bearbeiteten Thema und die gesteckten Ziele beinhaltet, gefolgt vom Aufbau dieser wissenschaftlichen Arbeit selbst, der in Abb. 1.2 grafisch dargestellt ist. Danach gehen die Kapitel zwei bis vier auf die drei großen Säulen dieser Arbeit ein. Diese Kapitel sind gleichermaßen in Grundlagen, Stand der Wissenschaft und Technik des jeweiligen Teilbereichs, sowie eigener Beitrag zu diesen Teilthemen gegliedert.

Die erste Säule stellt ein mehrschichtiges Ebenenmodell zur Abstraktion der Fahraufgabe im Hinblick auf Fahrerassistenzfunktionen und zukünftige autonome Fahrfunktionen dar, welches in Kap. 2 detailliert erläutert wird. Darauf folgt in Kap. 3 ein Einblick in die Thematik zum Einsatz von Simulationsmethoden und -werkzeugen zum Test und Absicherung von aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen sowie autonomen Fahrfunktionen. Im Rahmen dieses

1. Einleitung

Kapitels liegt der Fokus auf der Eingrenzung des zu berücksichtigenden Fahrzeugumfelds, das die abstrakte Systemgrenze und den Betrachtungshorizont für die weiteren Schritte definiert. Die letzte Säule referenziert das Paradigma der kollektiven Energieeffizienz in Kap. 4. Zu Beginn des Kapitels wird eine auf den Fahrerwünsche normierte Effizienz zunächst für ein einzelnes Fahrzeug und basierend darauf die Berechnungen für die kollektive Energieeffizienz eingeführt. Das Ende des Kapitels bildet eine simulative Evaluation der theoretischen Grundlagen mithilfe der Werkzeuge IPG CarMaker und Matlab Simulink.



*) Grdl.: Grundlagen / S.d.T.: Stand der Wissenschaft und Technik / E.B.: Eigener Beitrag

Abbildung 1.2.: Aufbau der Arbeit

Basierend auf Kap. 3 und Kap. 4 beinhaltet Kap. 5 eine Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung der Einflussgrößen auf die kollektive Energieeffizienz. Daher startet das Kapitel zunächst mit der Erläuterung zum Vorgehen der Analyse, worauf

eine Beschreibung der betrachteten Szenarien folgt. Nach der Durchführung der Analyse werden die Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

Mit den Erkenntnissen aus der Sensitivitätsanalyse (Kap. 5) und dem entwickelten Konzept zur Abstraktion von Fahrfunktionen aus Kap. 2 stellt Kap. 6 das Konzept eines Energieeffizienz-Assistenten vor. Dazu werden zunächst bestehende mathematische Bewegungs- und Entscheidungsmodelle aus den Verkehrswissenschaften, deren Grundlagen in Kap. 3 aufgeführt sind, erweitert. Im Anschluss wird das Gesamtkonzept des Energieeffizienz-Assistenten entwickelt und beschrieben.

Kap. 7 greift das Konzept aus Kap. 6 auf, evaluiert dieses simulativ und optimiert die konfigurierbaren Modellparameter basierend auf der kollektiven Energieeffizienzmetrik aus Kap. 4. Dabei wird als erstes ein für diese Analyse und Optimierung entwickeltes Vorgehen beschrieben, das es erlaubt, realistische Fahrscenarien aus geeigneten Videoaufzeichnungen teil-automatisiert in die Simulation zu überführen. Danach folgt eine Beschreibung des Analyse- und Optimierungsaufbaus sowie dessen Durchführung. Das Ende des Kapitels bilden die Ergebnisse zur Konfiguration der Modellparameter aus der Optimierung und eine Abschätzung des Potentials eines optimierten Energieeffizienz-Assistenten.

Kap. 8 gibt einen Ausblick auf eine prototypische Realisierung des Energieeffizienz-Assistenten aus Kap. 6. Der Assistent zeigt dabei eine visuelle Fahrerunterstützung durch die Darstellung des taktischen Fahrzeugumfeldes aus einer Fahrzeug-externen Perspektive mit Einblendungen für vorgeschlagene Fahrmanöver. Das Kapitel beschreibt den Gesamtsystemaufbau, den Einsatz in einer virtuellen Verkehrsumgebung und die Anforderungen, um diesen prototypischen Energieeffizienz-Assistenten in einem realen Fahrzeug zu integrieren.

In Kap. 9 wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst sowie ein Ausblick auf den Einsatz der aufgezeigten Ideen, Konzepte und prototypischen Umsetzungen bezüglich einer kollektiven Energieeffizienz auf mehrspurigen Straßen gegeben.

2. Abstraktion von Fahrfunktionen

Aktuelle Assistenzsysteme, die den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen, bestehen heutzutage aus einem elektronischen Steuergerät und dedizierter Sensorik und Aktuatorik, welche eine gewünschte Funktionalität abbilden [Rei14]. Da viele Assistenzsysteme durch unterschiedliche Zulieferer entwickelt werden, ist somit für jede Aufgabe ein eigenes Steuergerät im Fahrzeug verbaut. Inzwischen sind die Assistenzsysteme untereinander vernetzt und können Informationen austauschen, allerdings existiert bisher keine gemeinsame und einheitliche Erfassung sowie Interpretation des Fahrzeugumfeldes. Für das geplante Vorhaben eines kollektiven Energieeffizienz-Assistenten (siehe Abschn. 1.2) hingegen ist es erforderlich die Umgebung um das Fahrzeug (Straße und andere Verkehrsteilnehmer) präzise zu kennen, um darauf reagieren zu können. Es wird daher ein einheitliches und konsistentes Abbild des Fahrzeugumfeldes, auf das alle Assistenzsysteme zugreifen können und welches vollständig abstrahiert von der zugrundeliegenden Plattform ist, vorausgesetzt.

2.1. Aufbau des Kapitels

Dieses Kapitel beginnt mit grundlegenden Definitionen und Beschreibungen bezüglich des Aufbaus von aktuellen Fahrerassistenzsystemen und zukünftigen Fahrfunktionen, welche mithilfe von eingebetteten Systemen im Automobil realisiert werden. Auf die Grundlagen folgt eine Darstellung des Stands der Wissenschaft und Technik. Hierbei werden auf der einen Seite bestehende Fahrerassistenzsystem-Konzepte aufgegriffen und andererseits verfügbare Konzepte und prototypische Realisierungen von Fahrfunktionsarchitekturen

dargestellt. Im Anschluss wird ein konzeptionelles Modell für Fahrfunktionen vorgestellt, welches in der vorliegenden Arbeit zur thematischen Einordnung Anwendung findet und ebenfalls zusammen mit der Entwicklung des gewünschten Zielsystems als Rahmenwerk entwickelt wurde. Am Ende des Kapitels werden die Vorzüge des hierbei entstandenen konzeptionellen Modells aufgezeigt.

2.2. Grundlagen zu Fahrfunktionsarchitekturen

2.2.1. Begriffsdefinitionen

Funktion

Mit dem Begriff Funktion wird eine automatisierte Tätigkeit bezeichnet, die eine definierte Anforderung erfüllt. Es ist dabei nicht festgelegt, wie diese Funktion im konkreten Fall realisiert wird. Das heißt, diese automatisierte Tätigkeit kann entweder als technische, hardwarebasierte, softwarebasierte oder als eine Kombination dieser realisiert werden. Beispiel einer Funktion ist *Blinken*, welche die Aufgabe besitzt, die Lichter zur Signalisierung eines Abbiegevorgangs im definierten Intervall an- und auszuschalten. Die Funktion selbst wird durch vorgegebene Ereignisse aktiviert, was beispielsweise das Betätigen eines Hebels durch den Fahrzeugführer sein kann.

Fahrfunktion

Eine Fahrfunktion ist eine Funktion die Einfluss auf das Fahrverhalten des Fahrzeugs hat und somit auch aktiv die Bewegung des Fahrzeugs verändern kann. Der Begriff Fahrfunktion wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Überbegriff für assistierende und automatisierte Fahrfunktionen verwendet.

Assistierende Fahrfunktion

Als assistierende Fahrfunktionen werden diejenigen bezeichnet, die den menschlichen Fahrer bei seiner Tätigkeit, ein Fahrzeug zu führen, unterstützt. Diese

Funktionen können sowohl rein passiv agieren, ohne aktiven Eingriff in die Fahrbewegung beispielsweise durch eine Warnung beim Verlassen der eigenen Fahrspur, als auch aktiv den Fahrer unterstützen wie etwa eine Abstandsregelung zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. Bei diesen Funktionen ist der menschliche Fahrer stets in der Verantwortung und kann die Funktionen auch zu jedem Zeitpunkt übersteuern. Es handelt sich dabei zumeist um Funktionen der BAST-Automatisierungsstufe *Assistiert* (vgl. Abb. 2.3).

Automatisierte Fahrfunktion

Im Gegensatz zu den assistierten Fahrfunktionen übernehmen automatisierte Fahrfunktionen die Fahrzeugführung komplett, ohne dabei auf den menschlichen Fahrer angewiesen zu sein. Eine ständige Überwachung der Fahrfunktionen durch den Fahrer entfällt in diesem Fall. Es stehen somit die Funktionen der BAST-Automatisierungsstufen *Hochautomatisiert* und *Vollautomatisiert* (s. Abb. 2.3) im Fokus.

Stabilisierende Fahrfunktion

Hierbei handelt es sich um Funktionen, die einen fahrzeugstabilisierenden Eingriff in die Fahrdynamik des Fahrzeugs durchführen. Dies sind Eingriffe, welche das Fahrzeug stabil auf dem vorgegeben Bewegungswunsch (Sollwert) halten. Bekannte Systeme wie ein ESP (Elektronisches Stabilitäts-Programm) oder ABS (Anti-Blockier-System) realisieren eine oder mehrerer solcher stabilisierenden Funktionen. Umgesetzt werden diese durch einen geschlossenen Regelkreis, der kontinuierlich einen Soll-/Ist-Wert-Vergleich durchführt und daraus die Stellgröße zur Stabilisierung ermittelt.

Manöverbasierte Fahrfunktion

Manöverbasierte Fahrfunktionen basieren auf dem Ansatz von unterschiedlichen Fahrmanövern, die je nach bestehender Situation durchgeführt werden können [WH06; KSB10]. Dabei erfolgt die Steuerung eines Fahrzeuges nicht über die Vorgabe von Lenkwinkel und Beschleunigung, sondern über die Auswahl eines diskreten Manövers, wie etwa ein Spurwechsel oder Beschleunigen

auf eine Zielgeschwindigkeit [Gey+11]. Hierbei ist ein Fahrmanöver eine exakte Abfolge von Tätigkeiten, um eine gewünschte Fahraufgabe zu erfüllen. Eine detaillierte Erläuterung zu den Begriffen Manöver und Fahrmanöver, sowie deren Interpretation in dieser Abhandlung ist in Abschn. 3.2.5 zu finden.

Funktionsarchitektur

Eine Funktionsarchitektur beschreibt den funktionalen Aufbau und Zusammenhang eines Gesamtsystems. Die Gesamtfunktion ist dabei hierarchisch untergliedert in kleinere Teilfunktionen, welche an geeigneter Stelle durch sinnvolle Schnittstellen miteinander gekoppelt sind. Damit wird die Gesamtkomplexität soweit aufgeteilt, bis sie in den einzelnen Teilfunktionen vollständig beherrschbar ist. Die Funktionsarchitektur ist dabei vollkommen unabhängig von der technischen Realisierung, die in Form von Mechanik, Elektrik/Elektronik oder Software durchgeführt werden kann. [MM15]

2.2.2. Laufzeitumgebungen

Die konkrete Realisierung von steuernden und regelnden Funktionen, egal ob es sich dabei um Fahrfunktionen oder andere Funktionen handelt, findet inzwischen häufig in Form einer Software-Implementierung statt. Dies hat einige Vorteile wie etwa:

- wiederverwendbar
- einfach änderbar
- einfach anpassbar
- wirtschaftlich
- skalierbar (einmal entwickelt, kann es beliebig oft verwendet werden)

Um die Funktionen möglichst losgelöst von der verwendeten Hardware zu implementieren und so auch die genannten Vorteile zielgerichtet umsetzen zu können, ist es erforderlich, eine Umgebung zu schaffen, welche die zugrundeliegende Zielplattform (Hardware/Prozessor/Recheneinheit) komplett abstrahiert. Aus diesem Grund existieren Laufzeitumgebungen vergleichbar mit einem Computer-Betriebssystem (Windows/Unix/Linux/BSD/macOS) für den speziellen Einsatz in der Automotive-Domäne. Bekannte Exponenten derartiger Umgebungen werden im Folgenden kurz erläutert.

OSEK

OSEK steht für *Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kraftfahrzeug* und stellt eine Plattform für vernetzte Funktionen im Fahrzeug dar. Es besteht aus den Teilen OSEK-OS, OSEK-COM, OSEK-NM welche einzelne Teilaufgaben bzgl. der Hardwareabstraktion übernehmen. So bietet OSEK-OS (OSEK Operating System) z.B. ein einheitliches Prozessmanagement (Teilfunktionen werden als Prozesse realisiert) und OSEK-COM (OSEK Communication) eine einheitlich Übertragung von Signalen von einer Hardwarekomponente zu einer anderen. OSEK-NM (OSEK Network Management) stellt Möglichkeiten zur Verfügung einzelne Hardwarekomponenten in ihrem Zustand und ihre Kommunikation zu verwalten. Der Grund für einen Einsatz von OSEK ist die Abstraktion der Hardware, so dass eine entwickelte Funktion erneut auch auf einer anderen beispielsweise neueren Hardware zum Einsatz kommen kann. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Funktion eines Scheibenwischers, welche einmal entwickelt immer wieder verwendet werden kann, bestenfalls auch in unterschiedlichen Fahrzeugmodellen.

AUTOSAR

AUTomotive Open System ARchitecture (AUTOSAR) kann als eine Weiterentwicklung von OSEK angesehen werden mit dem Unterschied, dass bei AUTOSAR standardisierte Schnittstellen und Abläufe festgeschrieben sind. Somit wird eine Kompatibilität zwischen unterschiedlichen AUTOSAR-Implementierungen ermöglicht. Die Hardwareabstraktion und Wiederverwendbarkeit im Vergleich zu OSEK wird dadurch weiter gesteigert. Die Abstraktion wird durch ein Ebenen-Konzept realisiert, wobei die unterste Ebene diejenige ist, die direkt mit der Hardware interagieren können muss, vergleichbar mit einem Desktop-PC, der über Hardware-spezifische Treiber verfügen muss, um z.B. Steuer-Ein- und -Ausgänge bedienen zu können. In der obersten Schicht sind ausschließlich die zu realisierenden Funktionen komplett abstrahiert von dem zugrundeliegenden Steuergerät vorzufinden. Diese interagieren untereinander und mit den erforderlichen Steuer-Ein- und -Ausgängen lediglich über die standardisierten Schnittstellen des Runtime Environment (RTE). Des weiteren wird ihre Ausführung, wann welche Applikation (Funktion oder Teilfunktion) gestartet/beendet/ausgeführt wird, darüber verwaltet. Zwischen den beiden Schichten befinden sich die sogenannten AUTOSAR Services, welche einzelne

2. Abstraktion von Fahrfunktionen

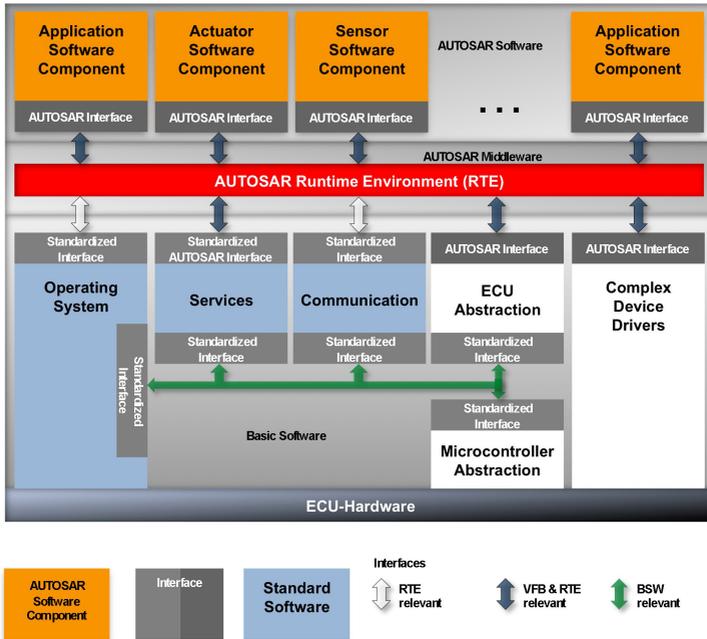


Abbildung 2.1.: Grundkomponenten von AUTOSAR [AUT]

Systemaufgaben wie etwa eine Vereinheitlichung der Kommunikation oder den Speicherzugriff übernehmen, um so eine stufenweise Abstraktion der Hardware zu den standardisierten Schnittstellen zuverlässig zu gewährleisten. [AUT; Hei+04]

Echtzeitfähiges Linux

In Ergänzung zu den bekannten und weitverbreiteten Laufzeitumgebungen OSEK und AUTOSAR werden auch echtzeitfähige Betriebssysteme wie etwa ein Echtzeit-Linux als Abstraktionsbasis für Software-basierte Funktionen eingesetzt. Es handelt sich dabei um eine Erweiterung des gewöhnlichen Linux-Kerns¹, welche den Prozess-Scheduler mit der Fähigkeit ausstattet, ausgewählte Prozesse mit ihren vorgegeben Zeitanforderungen auszuführen. Es kann also sichergestellt werden, dass echtzeitfähige Prozesse in einer gewöhnlichen Linux-Umgebung zusammen mit nicht-echtzeitfähigen Prozessen auf einem System ausgeführt werden. Dies erlaubt es komplexere Funktionen z.B. aus der Unterhaltungselektronik mit zeitkritischen Funktionen einfacher zu koppeln und bei der Entwicklung bereits erprobte Methoden und Tools zu verwenden. Durch die Verwendung des Linux Betriebssystems kann auf die Standardschnittstellen zur Prozessverwaltung und Kommunikation zurückgegriffen werden. Für sämtliche Aufgaben, die nicht zeitkritisch sind, kann auf Abstraktions-, Modularisierungs- und Kommunikationskonzepte aus der Informatik für schnelllebigere Produkte aus der Verbraucher-Welt (Consumer Electronics) zurückgegriffen werden.

Robot Operating System (ROS)

Bei ROS² handelt es sich um eine quelloffene (OpenSource³) Sammlung von Softwarebibliotheken und -werkzeugen, welche die Entwicklung von

¹ Der Kernel eines Linux-Systems stellt die Grundfunktionalität eines Betriebssystems - die Abstraktion der Hardware - bereit. Dies beinhaltet Treiber für unterschiedliche Komponenten wie Ein-/Ausgabe, Dateisysteme, Kommunikation, aber auch die zeitliche Planung der Abfolge von Softwareprozessen, das s.g. Scheduling.

² <http://www.ros.org> (Angerufen am 12.07.2016)

³ OpenSource bedeutet, dass der Software-Quellcode dem Anwender zur Verfügung steht, so dass er selbst daran Änderungen vornehmen kann und diesen auf unterschiedliche Zielplattformen übersetzen kann.

Anwendungen im Bereich der Robotik beschleunigen sollen. Dazu stehen verschiedene Treiber, diverse Algorithmen bis hin zu umfangreichen Entwicklungstools für den schnellen Aufbau von Roboterapplikationen zur Verfügung. Da sich ein autonomes/fahrerloses Fahrzeug auch als Roboter betrachten lässt, kommt ROS auch bei diversen Forschungsprojekten im Bereich des Automobils zum Einsatz, wie es beispielsweise im CoCar⁴ des FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe der Fall ist.

ADTF

Bei Automotive Data and Time-Triggered Framework (ADTF) handelt es sich um eine spezielle Entwicklerplattform zur flexiblen Funktionsentwicklung von Fahrfunktion, die nicht für den Serieneinsatz gedacht ist. Sie stellt eine Integrationsplattform zur Verfügung, die es erlaubt die zu entwickelnden Fahrfunktionen sowohl im Labor als auch im Fahrzeug selbst auszuführen. Dies wird dadurch ermöglicht, dass bereits Softwarekomponenten für den Zugriff auf die im Fahrzeug bestehende Kommunikations- und Hardwarearchitektur in ADTF integriert sind und damit eine Abstraktion der zugrundeliegenden Architektur stattfindet. Weiterhin werden dem Entwickler Tools angeboten, die eine einfache Verarbeitung, Visualisierung und Analyse der Signale und Daten erlauben. Der Aufbau der Funktionen in ADTF ist komponentenbasiert, wodurch eine hohe Flexibilität und Wiederverwendbarkeit gegeben ist. Weiterhin sind die Schnittstellen und Austauschformate der Daten zwischen den Komponenten bekannt. Über einen grafischen Editor können so die einzelnen Komponenten miteinander über zusammenhängende Signale verknüpft werden. Letztlich ist ein binäres Austauschformat für Komponenten definiert, welches die Zusammenarbeit und den Austausch zwischen unterschiedlichen Original Equipment Manufacturers (OEMs) und Zulieferern erlaubt, ohne dabei das eigene Wissen preiszugeben. [Sch07]

2.2.3. Drei Ebenen einer Fahraufgabe

Die Fahraufgabe zur Bewegung eines Fahrzeugs lässt sich hierarchisch in drei Abstraktionsebenen aufteilen. Es handelt sich nach [Don78; Don82] um die

⁴ <http://www.fzi.de/forschung/projekt-details/cocar> (Abgerufen am 21.05.2017)

drei nachfolgend aufgeführten und in Abb. 2.2 übereinander angeordneten Ebenen:

- Navigationsebene
- Bahnführungsebene
- Stabilisierungsebene

Die am weitesten von der konkreten Fahrzeugbewegung abstrahierte Ebene ist die Navigationsebene, in welcher der Transportwunsch im Fokus steht. Es geht darum von einem Punkt, dem Ursprung, an einen anderen Punkt, dem Ziel, zu gelangen. Zusammen mit einer Karte über das bestehende Straßennetzwerk lässt sich eine Route auswählen, über welche der Transportwunsch durchgeführt werden kann. Für diesen Zweck wurde das bestehende Straßennetzwerk bereits auf verschiedenste Arten kartografiert, beispielsweise in gedruckter Form oder als Navigationssystem mit digitalen oder online abrufbaren Karten. Weiterhin gibt es Systeme, welche bei digitalen oder online bereitgestellten Karten Informationen über die aktuelle oder auch prognostizierte Verkehrslage zur ausgewählten Route bereitstellen. Diese unterstützen den Fahrer oder ein automatisiertes Navigationssystem bei der Auswahl der besten Route. So können z.B. Straßensperrungen oder hohes Verkehrsaufkommen gemieden und eine evtl. schnellere Route gefunden werden. Da es sich hierbei um zeitlich weitreichende Planungsvorgänge handelt wird auch von strategischen Entscheidungen gesprochen bzw. von der strategischen Ebene der Fahraufgabe und dem strategischen Fahrzeugumfeld [Don12].

Die Bahnführungsebene befindet sich in Bezug auf die Abstraktion unterhalb der Navigationsebene und oberhalb der Stabilisierungsebene. Dieser Teil der Fahraufgabe beinhaltet die Tätigkeit, das Fahrzeug auf der gewünschten Route zu bewegen, die durch die Navigationsebene vorgegeben ist. Auf mehrspurigen Straßen liegt die Auswahl der gewünschten Fahrbahn und der zu fahrenden Geschwindigkeit im Ermessen dieser Ebene. Das bedeutet, dass die sogenannten taktischen Entscheidungen, die vom Zeithorizont deutlich geringer ausfallen als die strategischen Entscheidungen, in dieser Ebene gefällt werden. Es sind lediglich die Objekte im näheren Umfeld (vgl. Abschn. 3.4) für diese Ebene relevant, nicht aber ein Unfall der sich auf der gewählten Route voraus befindet, aber noch keine direkte Handlung, etwa ein Abbremsvorgang erfordert.

Die konkreteste Ebene ist die Stabilisierungsebene. Diese hat unmittelbar mit der Fahrbewegung zu tun und spielt sich im Zeitbereich unterhalb einer

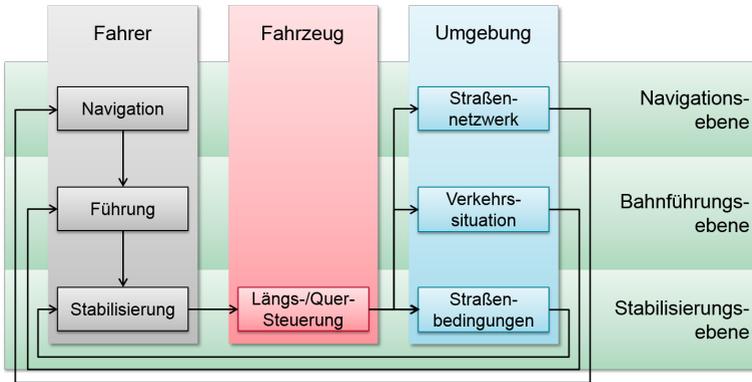


Abbildung 2.2.: Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach [Don82]

Sekunde in der Zukunft ab. Die Stabilisierungsebene ist als geschlossener Regelkreis vorstellbar, bei dem der Sollwert, der dem Fahrpfad entspricht, aus der Bahnführungsebene vorgegeben wird. Die Aufgabe dieser Ebene ist es, das Fahrzeug derart zu regeln, dass es möglichst den Vorgaben aus der Bahnführungsebene folgt. Die meisten bisherigen eingreifenden bzw. assistierende Fahrfunktionen unterstützen den menschlichen Fahrer auf dieser Ebene. Ein Spurhalteassistent z.B. bekommt die gewünschte Soll-Position in einer Fahrspur aus der Bahnführungsebene vorgegeben und hat zur Aufgabe das Fahrzeug stets in der vorgegebenen Spur zu halten. Ebenso befindet sich eine Geschwindigkeitsregelanlage in der Stabilisierungsebene. Deren Aufgabe ist es, das Fahrzeug auf die aus der Bahnführungsebene vorgegebene Geschwindigkeit zu regeln und bei einer Abweichung dynamisch das Beschleunigungsmoment anzupassen.

2.2.4. Test und Absicherung

Im Rahmen der Entwicklung von Fahrfunktionen muss sichergestellt werden, dass diese zuverlässig ihre Aufgaben erfüllen. Daher entstanden zusammen mit der Elektrifizierung vieler Funktionen, angefangen bei einem elektrischen Fensterheber, neue Methoden, um die elektronischen Funktionen im Labor

testen zu können. Das heißt, die Korrektheit der Funktion losgelöst vom fertigen Fahrzeug zu überprüfen und gegebenenfalls bestehende Fehler in der Entwicklungsphase zu beseitigen. Durch das gezielte Testen wird sichergestellt, dass die Funktion ihre spezifizierten Tätigkeiten erfüllt (Absicherung). [Sax08]

Mit zunehmenden automatisierten Fahrfunktionen werden Test und Absicherung immer wichtiger aber auch deutlich aufwendiger. Bewährte Methoden kommen dabei an ihre Grenzen und es wird erforderlich, bereits in der Entwicklung Prinzipien zu berücksichtigen, die später das Testen und Absichern ermöglichen [Sax15]. Da ein Fahrzeug später mit unzähligen, unterschiedlichen Situation konfrontiert wird und dadurch nicht mehr alle denkbaren Fälle bereits im Voraus getestet werden können, muss das Gesamtsystem (Fahrzeug) in handhabbare Teilsysteme und Komponenten zerlegt werden, die getrennt voneinander getestet und abgesichert werden können. Weiterhin ist dabei sicherzustellen, dass das Zusammenfügen des Gesamtsystems aus getesteten Komponenten letztendlich zu einem abgesicherten Gesamtsystem führt. [Kra15]

2.3. Stand der Wissenschaft und Technik zu Fahrfunktionsarchitekturen

2.3.1. Automatisierungsgrade für Fahrfunktionen

Aus der Historie der Fahrzeugentwicklung heraus wurde für jede neue Assistenzfunktion ein neues elektronisches Steuergerät (Electronic Control Unit (ECU)) und die dazu notwendigen Sensoren und Aktuatoren ins Fahrzeug eingebracht [Rei14]. Dies bietet einerseits den Vorteil, dass ein solches System, bestehend aus ECU mit integrierter Assistenzfunktion sowie dazugehöriger Sensorik und Aktuatorik, unabhängig von dem endgültigen Fahrzeug entwickelt und getestet werden kann, andererseits führt es aber auch zu Redundanzen in Teilfunktionen und Sensoren. Das wiederum indiziert höhere Entwicklungs- und Herstellungskosten, erhöhtes Gewicht, erhöhten elektrischen Energieverbrauch und Inkonsistenzen in der Erfassung von Informationen. Bekannte Vertreter dieser elektronischen Helfer wie etwa ein Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) bzw. Electronic Stability Control (ESC), ein Spurhalteassistent

2. Abstraktion von Fahrfunktionen

oder ein Adaptive Cruise Control (ACC) adressieren die Stabilisierungsebene (vgl. Abb. 2.2) und sind als Regelkreise realisiert.

Nomenklatur	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers	Beispielhafte Systemausprägung
Driver Only	Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/Verzögern) und die Querführung (Lenken) aus.	Kein in die Längs- oder Querführung eingreifendes (Fahrerassistenz-)System aktiv aus.
Assistiert	Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt. <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. • Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein. 	Adaptive Cruise Control: <ul style="list-style-type: none"> • Längsführung mit adaptiver Abstands- und Geschwindigkeitsregelung Parkassistent: <ul style="list-style-type: none"> • Querführung durch Parkassistent (Automatisches Lenken in Parklücken. Der Fahrer steuert die Längsführung.)
Teil-automatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung (für eine gewisse Zeit und/oder in spezifischen Situationen). <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. • Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein. 	Autobahnassistent: <ul style="list-style-type: none"> • Automatische Längs- und Querführung • Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze • Fahrer muss dauerhaft überwachen und bei Übernahmeaufforderung sofort reagieren.
Hoch-automatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dabei nicht dauerhaft überwachen. • Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert. • Systemgrenzen werden alle vom System erkannt (z. T. vom System abgefangen, z. T. muss der Fahrer übernehmen). • Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeiführen. 	Autobahn-Chauffeur: <ul style="list-style-type: none"> • Automatische Längs- und Querführung • Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze • Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen und nach Übernahmeaufforderung mit gewisser Zeitreserve reagieren.
Voll-automatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall. <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen. • Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf. • Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt. • Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen. 	Autobahn-Pilot: <ul style="list-style-type: none"> • Automatische Längs- und Querführung • Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze • Fahrer muss nicht überwachen. • Reagiert der Fahrer nicht auf eine Übernahmeaufforderung, so bremst das Fahrzeug in den Stillstand herunter.

Abbildung 2.3.: Definition der BASt Automatisierungsgrade [Gas+12]

Im Zuge des autonomen Fahrens übernimmt das Fahrzeug immer mehr Tätigkeiten der Bahnführungsebene des Drei-Ebenen-Modells aus Abb. 2.2. Eine Klassifizierung der Automatisierungsgrade der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ist Abb. 2.3 zu entnehmen [Gas+12]. Die Fahraufgabe geht dabei

in fünf Stufen vom Fahrer (Stufe *Driver Only*) immer weiter ans Fahrzeug über (Stufe *Vollautomatisiert*).

2.3.2. Umfeld erfassung und -interpretation

Für eine zuverlässige Umsetzung von Fahr funktions der höheren Automatisierungsgrade (Teilautomatisiert nach Abb. 2.3), wird eine situationsabhängige Kenntnis über das momentane Fahrzeugumfeld erforderlich [Sti05]. Weiterhin ist eine Prädiktion des Verkehrsfortgangs über das Fahrzeugumfeld in naher Zukunft für eine vorausschauende Entscheidung von Vorteil. Eine konsistente Erfassung und Interpretation der Umgebung sowie richtige Klassifizierung von erkannten Objekten ist unentbehrlich [Nie+05]. Hierzu kommen Sensoren und fahrzeugexterne Kommunikation zum Einsatz. Die konsistente Zusammenführung von Informationen aus verschiedenen Datenquellen (Sensoren/-Kommunikation) wird unter dem Begriff Fusion zusammengefasst [Bey06] und im Folgenden detaillierter erläutert.

Fusionierung von Umfeldinformationen

Bei der Fusionierung der Informationen wird unterteilt in Sensorfusion und Datenfusion. Die *Sensorfusion* findet in der Regel direkt mit den Sensorwerten statt und wird meist in einem intelligenten Sensor integriert, der Werte weiterer Sensoren einbezieht und den fusionierten Wert den anknüpfenden Teilsystemen weitergibt. Im Vergleich dazu basiert die *Datenfusion* darauf, dass bereits interpretierte Sensorwerte (diese könnte z.B. auch das Ergebnis aus einer Sensorfusion sein) zusammengeführt werden. Beispielsweise könnte das die Differenzgeschwindigkeit zu einem vorausfahrenden Fahrzeug sein, welche mithilfe eines intelligenten Radarsensors erfasst wird, verknüpft mit der Information, ob das Fahrzeug sich auf der gleichen Spur befindet, was mit einer Kamera detektiert wird.

Weiterhin lässt sich die Fusionierung nach [Bey06] in die drei Integrationskategorien einteilen:

1. **Konkurrierende Integration:** In diesem Fall überdecken die zu fusionierenden Sensoren den gleichen Erfassungsbereich, mit dem Ziel die

Genauigkeit der zu erfassenden Information zu erhöhen bzw. Ausfallsicherheiten zu bieten.

2. **Komplementäre Integration:** Hierbei werden mit gleichen oder unterschiedlichen Sensoren unterschiedliche Bereiche abgedeckt. Dies hat im Vergleich zu einem einzelnen Sensor zum Ziel, den Erfassungsbereich zu vergrößern. Es kann aber auch dadurch die Erfassungsgenauigkeit erhöht werden, wenn präzisere Sensoren für einen Teilbereich verwendet werden und darüber hinaus durch komplementäre Integration der Erfassungsbereich wieder erweitert wird.
3. **Kooperative Integration:** Diese Integrationsmethode verwendet mehrere unterschiedliche Sensorinformationen und spezifisches Wissen, um daraus neue Informationen zu erzeugen.

Als Beispiel sollen zwei Mono-Kameras als Sensoren verwendet und im Fahrzeug an unterschiedlichen Stellen platziert werden. Im ersten Beispielfall werden die Kameras mit optischen Hilfsmitteln (Spiegel, Prismen und Objektiven) so ausgerichtet, dass sie den exakt gleichen Bereich abdecken. Dies wäre dann der Typus einer konkurrierenden Integration. Würde nun eine Kamera auf Grund eines zufälligen Fehlers ausfallen, stünde weiterhin die zweite zur Verfügung, um die notwendigen Informationen zu erfassen. Wird im zweiten Beispielfall die Kamera an der Front in Fahrtrichtung und die andere im Heck gegen die Fahrtrichtung angeordnet, handelt es sich um eine komplementäre Integration und damit um einen erweiterten Erfassungsbereich. Werden die beiden Kameras so angeordnet, dass sie möglichst den gleichen Bereich überdecken, aber jeweils aus einem anderen Blickwinkel, so entsteht mit dem Wissen über deren Relativabstand und -winkel eine Stereokamera, welche z.B. Zusatzinformationen über Abstände und Entfernungen liefern kann, was einer kooperativen Integration entspricht.

Unabhängig von der Integrationskategorie unterscheidet Beyerer [Bey06] bei der Fusionierung drei Ebenen, welche in Abb. 2.4 dargestellt sind: Rohdatenebene, Merkmalsebene, Objektebene. Eine Fusion auf Rohdatenebene verwendet die direkten Sensorsignale und verknüpft diese, wie es z.B. bei einer Stereokamera der Fall ist, um Tiefeninformationen zu erhalten (in diesem Beispiel: Kooperative Integration). Auf Merkmalsebene werden bereits interpretierte Informationen s.g. Merkmale von Objekten miteinander fusioniert. Merkmale sind z.B. Geschwindigkeit, Abstand etc. Innerhalb der Objektebene werden vollständig interpretierte Objekte, wie etwa ein anderer Verkehrsteilnehmer oder beispielsweise auch ein Geschwindigkeitslimit (Straßenschild),

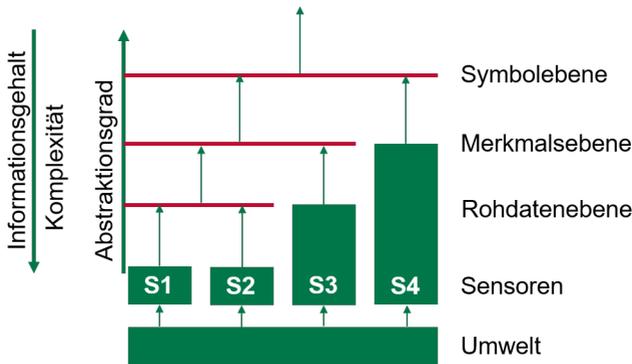


Abbildung 2.4.: Fusionsebenen nach [Bey06]

zusammengeführt und mit Informationen angereichert. Es ist vorstellbar, dass eine Kamera durch Muster-erkennende Algorithmen andere Fahrzeuge erfasst und deren Typ (PKW, LKW, etc.) klassifiziert, während parallel dazu ein Light Detection and Ranging (LIDAR) Sensor ebenfalls diese Objekte ermittelt, dabei aber nur deren Abstände und Relativgeschwindigkeiten bereitstellen kann. Diese Zusammenführung der Objekte aus Kamera und denen des LIDAR findet auf Objektebene statt.

2.3.3. Conduct-by-Wire

Unter dem Begriff *Conduct-by-wire* wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes der TU Darmstadt ein Konzept und eine prototypische Realisierung entwickelt, welche es erlaubt, dass der menschliche Fahrer bei seiner Fahraufgabe keine Tätigkeiten der Stabilisierungsebene mehr übernehmen muss. Die Fahrbewegungen werden in diskrete Abfolgen von Tätigkeiten, den Manövern, eingeteilt. [WH06]

Der Fahrer verwendet als Schnittstelle zum Fahrzeug kein Lenkrad und keine Pedale mehr, er hat nur noch ein berührungssensitives Display. Auf dem Display werden sämtliche möglichen Manöver, abhängig von den bestehenden Umständen (Kreuzung, Landstraße, Autobahn), zur Auswahl gestellt. Durch Antippen des gewünschten Manövers wählt der menschliche Fahrer nun aus,

was als nächstes geschehen soll. Wird auf die Eingabe verzichtet wird ähnlich wie in der Fahrschule einfach *weitergefahren* und dem Straßenverlauf gefolgt. [KSB10]

Im Konzept von *Conduct-by-wire* wird somit der menschliche Fahrer von sämtlichen Aufgaben auf der Stabilisierungsebene befreit, das Fahrzeug übernimmt diese vollständig. Weiterhin werden die Aufgaben auf Bahnführungsebene diskretisiert und als Manöver dem menschlichen Fahrer angeboten, der lediglich die Entscheidung übernehmen muss, welches der verfügbaren Manöver als nächstes durchgeführt werden soll. Die Art der Fahrzeugsteuerung wird als manöverbasierte Steuerung bzw. Fahrzeugführung bezeichnet. [SKB09; Gey+11]

2.3.4. Prototypische Funktionsarchitekturen für Fahrfunktionen

Bisher ist in der Industrie aus historischen Gründen vorwiegend der Aufbau klassischer Funktionsarchitekturen zu finden, mit der Weiterentwicklung, dass die Systeme miteinander vernetzt sind, um meist informativ Daten austauschen zu können. Dennoch lassen sich Veröffentlichungen [BIS09; BR12; MM15; Not14] im Rahmen der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) Urban Challenge und anderen öffentlich geförderten Forschungsprojekten finden, welche eine systemweite Funktionsarchitektur im Fahrzeug mit dem Ziel des autonomen Fahrens adressieren. Dabei ist es zukünftig essentiell, dass das Fahrzeugumfeld einheitlich erfasst und allen Fahrfunktionen zur Verfügung stehen [DKK05].

DARPA:Caroline

In der elektronischen Fahrzeugarchitektur des Caroline-Projekts kommt das Hesperia-Framework aus Abb. 2.5 zum Einsatz. Dieses erlaubt eine plattformübergreifende, szenariengestützte Modellierung und Entwicklung von Systemen auf Sensorbasis. Durch die Möglichkeit, die zu entwickelnden Fahrfunktionen simulativ zu testen, können in der frühen Entwicklungsphase bereits ohne Erprobungsfahrten die implementierten Algorithmen kontinuierlich auf Korrektheit überprüft werden. Dies geschieht auf Grundlage simulierter

Sensordaten, die den einzelnen Funktionen zu Testzwecken zur Verfügung gestellt werden. [BR12]

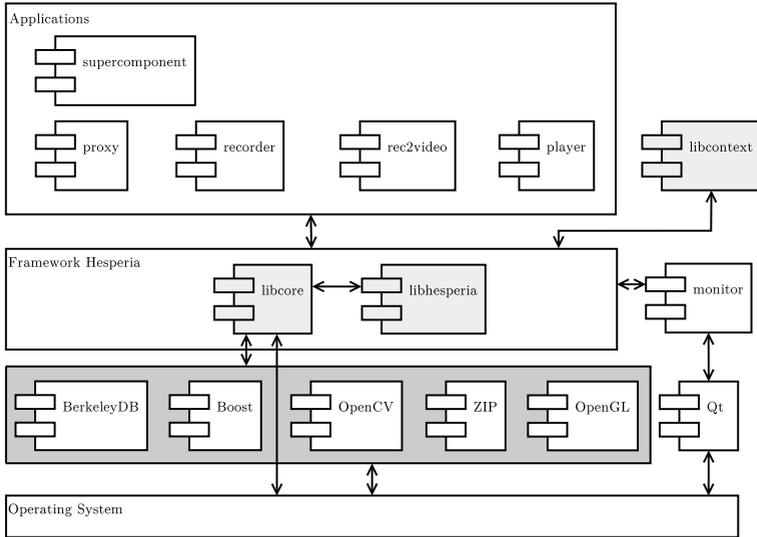


Abbildung 2.5.: Komponenten des Hesperia Frameworks [BR12, Abbildung 9]

Die Komponenten von Hesperia abstrahieren das Betriebssystem und bieten über Bibliotheken Basisfunktionen wie z.B. OpenGL für 3D-Visualisierungen und bildverarbeitende Algorithmen plattformunabhängig an. Weiterhin existieren Entwicklungs- und Testkomponenten, wie ein Datenrekorder, welche ausschließlich in der Simulation zum Einsatz kommen und Fehlersuche/-behebungsmöglichkeiten erlauben. Für den Einsatz auf der Zielplattform stellt das Framework Steuerungs- und Beobachtungsfunktionen mit grafischer Benutzerschnittstelle bereit. Eine abstrakte Darstellung der Komponenten des Hesperia-Frameworks sind der Abb. 2.5 zu entnehmen.

Stadtpilot-Projekt

Eine Weiterentwicklung der im Forschungsfahrzeug *Caroline* (vgl. Abschn. 2.3.4) verwendeten Funktionsarchitektur ist im Rahmen des Projektes *Stadtpilot* wiederzufinden. Dazu wurde der Einsatzbereich von dem bisher abgeschlossenen urbanen Testgelände, das für die DARPA Urban Challenge vorausgesetzt wurde, auf den realen Straßenverkehr des Stadtringes von Braunschweig und einer mehrspurigen Ringstraße erweitert. Im Rahmen dieses Projektes wird eine funktionale Systemarchitektur für ein autonomes Fahrzeug in Form eines modularen Baukastens vorgestellt. Die Herangehensweise ist durch einen Top-Down-Ansatz geprägt, welcher auf der Definition von funktionalen Anforderungen für autonome Fahrzeuge basiert. Die Autoren kombinieren dabei Ansätze zur Umfeldwahrnehmung und der Fahrzeuglokalisierung. Sowohl bei der Definition des Funktionsumfangs, als auch der funktionalen Systemarchitektur, werden diejenigen Aspekte berücksichtigt, damit eine Bedienung durch einen menschlichen Fahrer, die Erfüllung der Fahrmission, die Verwendung von Kartendaten, eine Lokalisierung, die Umfeld- und Selbstwahrnehmung sowie Kooperation möglich sind. [MM15]

Der Fokus lag zunächst auf der Erfassung des Umfeldes und weniger auf der ausführenden Funktion. Zur Erfassung der Umfeldinformationen kommt eine in drei Ebenen (strategisch, taktisch, operativ) aufgeteilte Architektur zum Einsatz. [Not14] Diese Architektur ist in vertikaler Richtung in drei Ebenen (Navigation, Führung, Stabilisierung) und in horizontaler Richtung in mehrere Spalten (Absolute Global localization, External Data, Environmental Perception, Self-Perception, Mission Accomplishment) separiert. In vertikaler Richtung unterscheiden sich die Ebenen basierend auf dem Drei-Ebenen-Modell nach Donges (vgl. Abschn. 2.2.3) hauptsächlich in ihrer Granularität, ihrem Horizont, ihrer Genauigkeit, den relevanten Umgebungsartefakten, ihren Aufgaben und ihren Ausführungszeiten. Orthogonal dazu sind in mehreren Spalten die unterschiedlichen Bereiche der Informationsbeschaffung, sowohl intern über fahrzeugeigene Sensorik, als auch in Bezug auf externe Informationen, und die Funktionsausführung (Mission Accomplishment) dargestellt. [MM15]

Neue Elektrik/Elektronik-Architekturen der BMW Group

Als Antwort auf die steigenden Anforderungen an zukünftige Fahrerassistenzfunktionen und Fahrfunktionen zum automatisierten Fahren durch zunehmende und genauere Erfassung des Fahrzeugumfeldes entwickelt die BMW Group [Sch11] eine neue Elektronik-/Elektrik-Architektur (E/E-Architektur), die in Ansätzen eine funktionale Sichtweise beinhaltet.

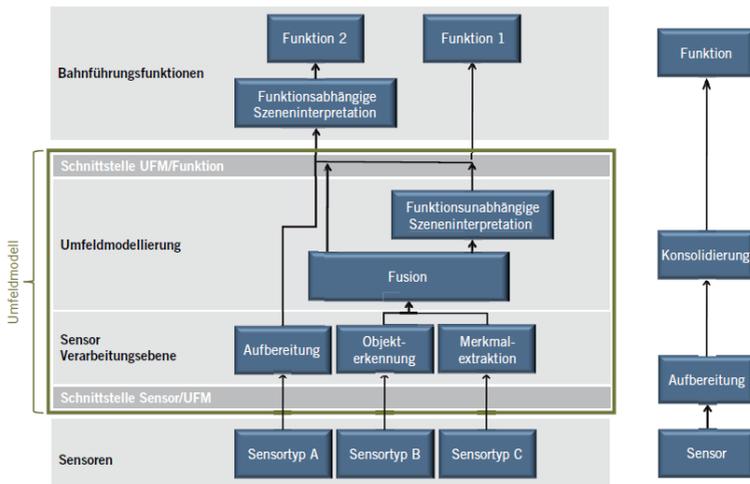


Abbildung 2.6.: BMW Umfeldmodell: Definition als Schichtenmodell [Sch11]

Es wird ein Umfeldmodell eingeführt, das die Funktion in mehreren Schichten von den Sensoren abstrahiert (s. Abb. 2.6). Aufbauend auf dem Schichtenmodell, das von Schöttle [Sch11] gleichbedeutend mit dem Begriff Umfeldmodell verwendet wird, sollen die einheitlich erfassten Informationen über das Umfeld an verschiedene Fahrfunktionen weitergegeben werden. Ziel dabei ist es, die bisher bestehende Diversität der Funktionsketten (vom Sensor bis zum Aktor) zu homogenisieren, so dass eine einheitliche Schnittstelle der Fahrfunktionen auf die Informationen des Umfeldes besteht. Die Abstraktion findet in zwei Schichten statt:

- Sensor Verarbeitungsebene
- Umfeldmodellierung

Die beiden Schichten zusammengefasst werden von der BMW Group als Umfeldmodell (mittlerer Bereich in Abb. 2.6) betitelt, das nur bestimmte, vordefinierte Typen an dynamischen Verkehrsinformationen wie etwa Verkehrszeichen, Bodenmarkierungen, andere Verkehrsteilnehmer, Freiräume usw. verarbeiten kann. [Sch11].

2.3.5. Anlehnung und Abgrenzung der eigenen Arbeit

Der in diesem Kapitel aufgezeigte Stand der Wissenschaft und Technik gibt einen Überblick über die bisherigen Konzepte und Methoden, welche sich in der Entwicklung zukünftiger Fahrfunktionen sowohl für die Fahrerassistenz, als auch für das autonome Fahren nur in begrenztem Maße einsetzen lassen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Verarbeitung und Verschmelzung von heterogenen Informationen über das eigene Fahrzeug und die Fahrzeugumgebung (vgl. Abschn. 2.3.2 und Abschn. 2.3.4). Die hierarchische Abstraktion der Informationen über das Fahrzeugumfeld stellt daher eine Option zur Beherrschung der bestehenden Herausforderungen in diesem Bereich dar [Not14]. Ziel ist es, die Daten in Form von strukturierten Objektlisten und über einheitliche Schnittstellen allen Fahrfunktionen zur Verfügung zu stellen [DKK05]. Eine Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge, unabhängig jedweder Realisierung, steht dabei im primären Fokus. Das Design einer Funktionsarchitektur für die gesamte Fahraufgabe stellt daher einen essentiellen Schritt im Fahrzeugentwicklungsprozess moderner Fahrzeuge dar. Vor diesem Hintergrund entstand das konzeptionelle Intelligent Driving Automation Layers (IDAL)-Modell für Fahrfunktionen, um damit die Ebenen und Bereiche zu abstrahieren, die nicht im direkten Fokus der Fahrfunktion selbst liegen. Es wird damit möglich die konkrete Erfassung der Informationen über das nähere Umfeld komplett zu abstrahieren, so dass diese auch aus einer Simulation stammen können.

Hierbei kommt der manöverbasierte Gedanke der Fahrzeugführung aus [WH06; KSB10; Gey+11; SKB09] als grundlegende Idee für den strukturellen Aufbau zum Einsatz. Die manöverbasierte Fahrzeugführung findet auf Basis von diskreten Fahrmanövern (vgl. Abschn. 3.2.5) statt. Dies bedeutet, dass ein Spektrum an Manövern zur Verfügung steht, die situationsbedingt ausgewählt

werden können, um eine Fahrbewegung durchzuführen. Die Realisierung der Manöver und eine Entscheidung zur Auswahl dieser Manöver findet auf der Bahnführungsebene (vgl. Abschn. 2.2.3) statt.

Da eine abstrakte Funktionsarchitektur vollständig unabhängig von der Zielplattform entworfen werden soll, gehen die in Abschn. 2.2.2 beschriebenen Laufzeitumgebungen (AUTOSAR, OSEK, ROS, RT-Linux, ADTF) nicht in die Darstellung des konzeptionellen Modells ein. Sie liefern innerhalb der E/E-Architektur eine Abstraktion der Softwarefunktionen gegenüber der eingesetzten Hardware, aber keine funktionale Abstraktion im Sinne der Fahrfunktionen, wie es durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und im Folgenden erläuterte IDAL Modell der Fall ist.

2.4. Einführung des Intelligent Driving Automation Layers (IDAL) Modell

Das Intelligent Driving Automation Layers (IDAL) Modell ist eine Meta-Funktionsarchitektur für Fahrfunktionen, das heißt, es beschreibt ein übergeordnetes Prinzip von Funktionsarchitekturen assistierender und automatisierter Fahrfunktionen für eine manöverbasierte Steuerung von Fahrzeugen. Dieses konzeptionelle Modell stellt einen systemweiten Zusammenhang der Fahrfunktionen in seiner Gesamtheit implementierungsunabhängig dar. Die zugrundeliegende Idee basiert auf der Sichtweise der Funktionalität und nicht der Realisierung.

Es handelt sich dabei um einen Top-Down-Ansatz⁵ ausgehend von den funktionalen Anforderungen an das Gesamtsystem. Die Grundlage des Aufbaus der Ebenen entstammt dem Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe aus Abschn. 2.2.3, dem manöverbasierten Gedanken des Conduct-by-Wire Konzept aus Abschn. 2.3.3 und den Konzepten zur Fusionierung von Informationen aus Abschn. 2.3.2.

Der Aufbau des konzeptionellen Modells in Abb. 2.7 ist wie folgt: Das untere Ende stellt die Umgebung dar, in der sich das betrachtete Fahrzeug befindet.

⁵ Top-Down bedeutet, dass ein System vom Allgemeinen immer weiter präzisiert wird, bis es vollständig beschrieben oder entwickelt ist.

2. Abstraktion von Fahrfunktionen

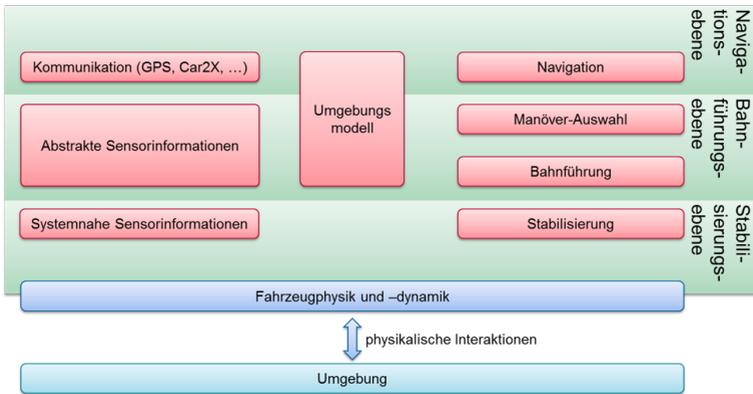


Abbildung 2.7.: Das konzeptionelle Intelligent Driving Automation Layers Modell

Diese beinhaltet sämtliche Artefakte der rechten Säule (Umgebung) aus Abb. 2.2, die in Interaktion mit dem Fahrzeug, welches die Funktionsarchitektur realisiert, stehen. Dazu zählen das Straßennetzwerk, die Verkehrssituation und die Straßenbedingungen, als Abbild einer befahrenen Straße, der Umweltbedingungen und der anderen Verkehrsteilnehmer. Über die physikalischen Zusammenhänge, die entweder real in einem Fahrzeug, teilweise real in einem Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstand oder komplett virtuell modelliert in einer Simulationsumgebung sein können, interagiert das Fahrzeug (*Fahrzeugphysik und -dynamik*) mit der Umgebung.

Aufbauend darauf werden auf der linken Seite Informationen über das Umfeld und das Fahrzeug selbst immer weiter abstrahiert und interpretiert. Dieser Teilbereich beinhaltet sämtliche Teilfunktionen, die zur Erfassung der Fahrzeugumgebung und des Fahrzeugzustands selbst dienen. Die Informationen auf der Erfassungsseite werden somit vom detaillierten Signalwert zur abstrakten Umfeldinformation überführt. So wird beispielsweise aus einem gemessenen Spannungswert auf Höhe der *Fahrzeugphysik und -dynamik* im Übergang zur Ebene *Abstrakte Sensorinformation* ein Beschleunigungswert des Fahrzeugs.

Alle diese aufbereiteten Informationen werden im *Umgebungsmodell* zusammengeführt, so dass darin eine konsistente Repräsentation des tatsächlichen

Fahrzeugumfeldes entsteht. Jede Änderung der bestehenden Situation, die über die Sensorik/Kommunikation erfasst wird, führt zu einer Aktualisierung im *Umgebungsmodell*. Das Umgebungsmodell lässt sich als objektorientierte Datenbank darstellen, in welcher durch statische Vorgaben das sogenannte Domänenwissen hinterlegt ist und die dynamischen Daten durch die Informationserfassung ständig aktualisiert werden. Im Domänenwissen ist somit enthalten, welche Objekte das Umgebungsmodell verarbeiten kann und in welcher Relation diese zueinander stehen. Beispielsweise sind darin Bewegungsgleichungen für Fußgänger oder andere Fahrzeuge integriert, die deren Bewegungsabläufe auf einer ebenen Fläche bzw. der Straße beschreiben. Zur Einordnung der Fahrzeuge und anderer Verkehrsteilnehmer in die Umgebung hält das Domänenwissen z.B. die Einteilung in mehrere Fahrspuren bereit.

Die ausführende Seite (Funktionsblöcke auf der rechten Seite in Abb. 2.7) beinhaltet diejenigen Funktionen, welche mithilfe der Informationen aus dem Umgebungsmodell, die Fahraufgaben durchführen. Angelehnt an das Modell der Fahraufgabe nach Donges in Abb. 2.2 werden die Fahrfunktionen in die drei Ebenen eingeteilt: Navigationsebene, Bahnführungsebene und Stabilisierungsebene. Dabei ist in Abb. 2.7 zu erkennen, dass die Bahnführungsebene zweigeteilt ist in *Manöver-Ausführung* und *Bahnführung*, da der weitere Fokus auf den Fahrfunktionen dieser Ebene liegt. Jede Funktion in den Schichten erhält seine Informationen über die aktuelle Situation, in der sich das Fahrzeug gerade befindet, aus dem Umgebungsmodell. Die entsprechende Sollwertvorgabe kommt aus der jeweiligen übergeordneten Schicht. So kommt aus der *Navigation* z.B. die Vorgabe, welcher Wegpunkt als nächstes angesteuert werden soll. In der *Manöver-Auswahl* werden nacheinander die dazu notwendigen Manöver entschieden und der *Bahnführung* als Auswahlvorschlag weitergegeben. Diese setzt die im Fahrzeug verfügbaren Manöver um, sofern dies unter sicherheitskritischen Aspekten möglich ist. Dazu werden die entsprechenden Sollwerte (z.B. Beschleunigung, Lenkeinschlag, etc.) an die *Stabilisierung* weitergegeben. Letztendlich finden in der Stabilisierungsebene die Regelungen statt, die das Fahrzeug im physikalischen Rahmen auf der Straße halten.

In den folgenden Abschnitten werden die Systemgrenzen der einzelnen Ebenen des IDAL-Modells und die Schnittstellen zu den anderen Ebenen beschrieben. Zuerst wird die abstrakteste Ebene, die Navigationsebene erläutert, welche lediglich den Transportwunsch als Vorgabe erhält. Dieser folgt die Bahnführungsebene, welche ihre Bewegungswünsche aus der Navigationsebene erhält und schließlich an die Stabilisierungsebene weitergeben, welche die Fahrzeug-

bewegung stabilisiert. Nachfolgend wird auf die einzelnen Ebenen im Detail eingegangen.

2.4.1. Navigationsebene

Auf Navigationsebene werden die Informationen durch bestehende Kommunikation erfasst. In Abb. 2.8 ist auf der linken Seite der Informationserfassungsteil dargestellt, welcher eine bidirektionale Schnittstelle zum Umgebungsmodell besitzt. Die Schnittstelle ermöglicht zum einen die Informationen, die über einen externen Kommunikationskanal erhalten werden, an das Umgebungsmodell weiterzuleiten, als auch Informationen aus dem Umgebungsmodell an externe Kommunikationspartner zu übermitteln.

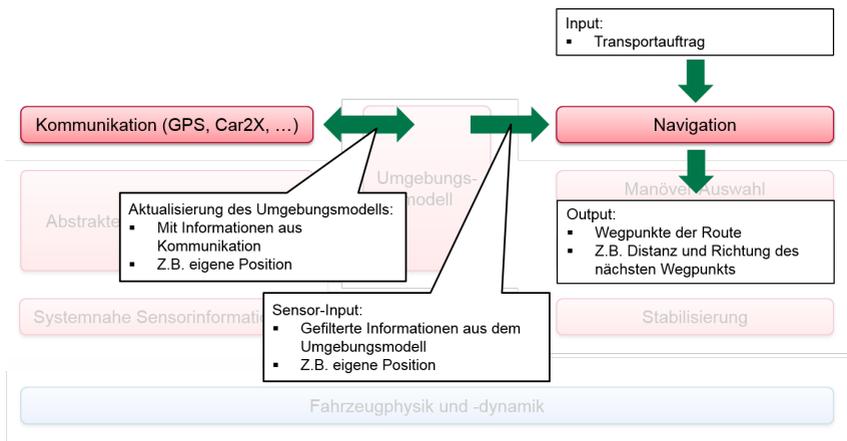


Abbildung 2.8.: IDAL: Navigationsebene im Detail

In Abb. 2.8 auf der rechten Seite sind die Schnittstellen zu den Fahrfunktionen der Navigationsebene dargestellt, die dazu beitragen, längerfristige Entscheidungen auf strategischer Ebene zu fällen. Als Eingabe ist daher der Transportauftrag erforderlich, d.h. das Ziel der Fahrt. Die Informationen über die eigene Position und evtl. über bestehende Hindernisse wie Straßensperrungen oder Stau stehen über das Umgebungsmodell bereit. Als Ausgabe für die

Bahnführungsebene wird die Information über den nächsten, anzufahrenden Wegpunkt weitergereicht.

2.4.2. Bahnführungsebene

In Abb. 2.9 und Abb. 2.10 sind die Schnittstellen der Bahnführungsebene dargestellt. Ebenfalls getrennt voneinander sind die Informationserfassung (linke Seite in Abb. 2.9) und die konkreten Funktionen (rechte Seite in Abb. 2.9) veranschaulicht. Die Informationserfassung erhält aus der Stabilisierungsebene vorverarbeitete Informationen wie etwa einzelne Signale. Diese werden abstrahiert und zu objektorientierten Daten verknüpft, um die einzelnen Objekte im Umgebungsmodell mit dynamischen Daten zu füllen. In diesen Übergang ist z.B. eine Objekterkennung aus einem Videostream einzuordnen, dessen relevante Informationen anschließend als Objektlisten (erkannte Objekte mit Attributen wie Abstand und relative Geschwindigkeit) weitergegeben werden. Nach der Klassifizierung zur Informationsfusion aus Abschn. 2.3.2 werden Sensorinformationen somit aus der Merkmalsebene in die Objektebene gehoben. Das Umgebungsmodell (vgl. Abschn. 2.4.4) wird kontinuierlich mit den abstrahierten Informationen aktualisiert und stets auf dem neusten Stand gehalten, so dass es den Fahrfunktionen jederzeit eine konsistente Darstellung des realen Umfeldes bietet. Weiterhin stellt das Umgebungsmodell einen zentralen Synchronisationspunkt für alle fahrrelevanten Informationen dar. Da der Fokus in dieser Arbeit auf den Funktionen in der Bahnführungsebene liegt, besteht hier nochmals eine Zweiteilung in *Manöver-Auswahl* und *Bahnführung*, wie es in Abb. 2.10 zu sehen ist.

Die Manöver-Auswahl erhält aus der Navigationsebene den als nächstes anzufahrenden Wegpunkt (vgl. Abschn. 2.4.1). Weiterhin werden von der Bahnführung die von ihr zur Verfügung gestellten Manöver angeboten. Dieses Angebot an Manövern ist von der aktuellen Situation abhängig. Das bedeutet, dass nur die Möglichkeiten angeboten werden, die auch überhaupt durchführbar sind. Zum Beispiel wird auf einer Autobahn ein Spurwechsel-Manöver angeboten und ein Abbiege-Manöver nicht. Weiterhin können Informationen über das aktuelle und in naher Zukunft prädiizierte Umfeld über eine Abfrageschnittstelle (*query interface*) aus dem Umgebungsmodell bezogen werden. In diesem Teil der Bahnführungsebene wird eine *weiche* Entscheidung zur Manöverauswahl getroffen, welche auf Basis von sicherheitsunkritischen Aspekten entsteht. Dies

2. Abstraktion von Fahrfunktionen

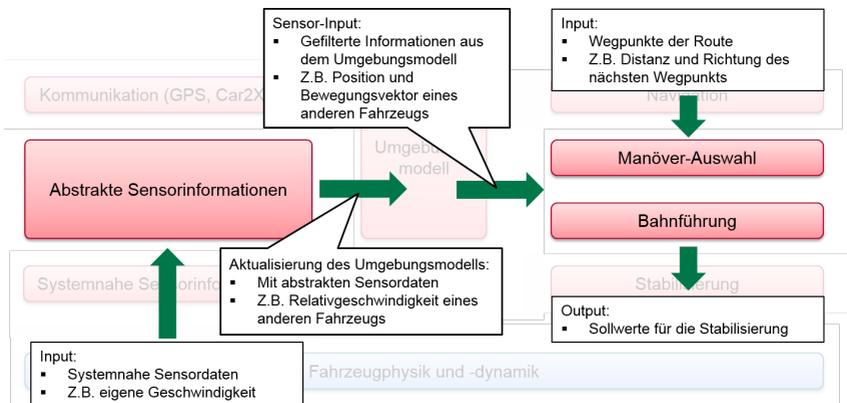


Abbildung 2.9.: IDAL: Bahnführungsebene im Detail

können beispielsweise Aspekte zur Energieeffizienz- und Komfortsteigerung sein.

Das impliziert, dass der zweite Teil der Bahnführungsebene, nämlich die Bahnführung, welche die verfügbaren Manöver anbietet, diese auch sicher ausführt und damit möglicherweise den Komfort- und Effizienzaspekten widerspricht. Dazu liefert in erster Linie eine zyklisch sendende Schnittstelle deterministisch Informationen über das aktuelle Umfeld, wie es z.B. von zyklischen Signalen in AUTOSAR bekannt ist. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass in diesem Teil sicherheitsrelevante Funktionen realisierbar sind. Wird von der *Manöverauswahl* ein bestimmtes Manöver (welches in diesem Moment auch erlaubt ist) vorgeschlagen, dann wird in der *Bahnführung* versucht dieses Manöver auch sicher umzusetzen. Sollte dies nicht möglich sein, wird das Manöver auch nicht durchgeführt und an den übergeordneten Teil (informativ) signalisiert. Ein Manöver lässt sich als logische Abfolge von einzelnen Steuervorgaben, sowohl in Längs- als auch in Querrichtung verstehen. Dabei müssen entsprechende Start-, End- und Abbruchbedingungen, sowie dazugehörige Reaktionen implementiert werden.

Die Funktionen der *Bahnführung* erhalten über zwei Schnittstellen ihre Informationen vom Umgebungsmodell. Die erste Schnittstelle (*cyclic interface*) bietet zeitlich kritische Signale zyklisch und zuverlässig an, so dass damit

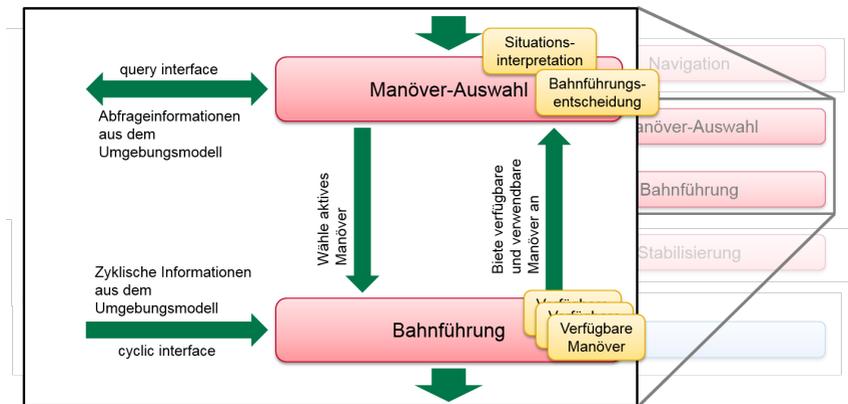


Abbildung 2.10.: Führungsfunktionen des IDAL-Modells im Detail

geschlossene Regelkreise realisiert werden können (*Selective Informationen* in Abb. 2.10). Die Daten die darüber signalbasiert ausgetauscht werden, müssen bereits bei der Implementierung des Umgebungsmodells berücksichtigt, getestet und abgesichert werden, um die Zuverlässigkeit dieser Informationen gewährleisten zu können.

Die zweite Schnittstelle (*query interface*) ist eine Art Datenbankabfrage-Schnittstelle und in Abb. 2.10 als *Query Interface* bezeichnet. Über eine einheitliche Syntax (vergleichbar mit SQL⁶) lassen sich komplexere Informationen aus dem Umgebungsmodell abfragen. Hierbei muss nicht sichergestellt sein, dass die Informationskette z.B. harten Echtzeitbedingungen genügt. Das heißt, aufwändigere Anfragen an das Umgebungsmodell, welche z.B. Verkehrsobjekte miteinander verknüpfen, können je nach Anfragevolumen in ihrer Zeit variieren.

Beispiel einer Abfrage des Umgebungsmodells über das *query interface*: Ist es z.B. erforderlich die Geschwindigkeiten der vorausfahrenden Fahrzeuge auf der gleichen Spur bis zu einem Abstand von 30 Metern zu kennen, um

⁶ Structured Query Language (SQL) ist eine Datenbanksprache für einen einheitlichen, strukturierten Zugriff auf Datenbanken.

in der Manöverauswahl eine Komfortfunktion zu realisieren, dann würde die Abfrage wie folgt aussehen:

```
1 QUERY vehicle.speed
2     WHERE vehicle.distance < 30
3     AND vehicle.lane = own.lane
4     AND vehicle.position = INFRONT
```

Diese geschickte Kombination der beiden Schnittstellen entgegnet der Herausforderung die gesammelten Informationen des Umgebungsmodells mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden in den Fahrfunktionen zu verwenden.

2.4.3. Stabilisierungsebene

Die Schnittstellen der untersten Ebene sind in Abb. 2.11 zu sehen. Ebenfalls ist diese Ebene in Erfassungsbereich auf der linken Seite und Funktionsbereich auf der rechten Seite aufgeteilt. Auf der Erfassungsseite werden physikalische Größen aus der *Fahrdynamik und -physik* Schicht erfasst, in elektronische Signale und Nachrichten überführt und sowohl der darüber liegenden Ebene, als auch der Funktionsseite der Stabilisierungsebene als Informationen zur Verfügung gestellt. In dieser Ebene werden lediglich Rohdaten miteinander kombiniert und aus Datenfusionssicht auf Merkmalsebene gebracht (vgl. Abschn. 2.3.2).

Auf der Stabilisierungsebene werden geschlossene Regelkreise auch ohne das Umgebungsmodell realisiert, indem die erforderlichen Sensorinformationen (linke Seite) ohne weitere Interpretation direkt an eine Funktion (rechte Seite) weitergegeben werden. Dadurch ordnen sich auch bislang bestehende Systeme wie ein ESP oder Antiblockiersystem (ABS) nahtlos in die Funktionsarchitektur ein. Die Aufgabe der Funktionen in dieser Ebene ist es, ausgehend von der Sollwertvorgabe aus der Bahnführungsebene, das Fahrzeug stabil auf dieser zu halten, sofern dies auf Grund der physikalischen Bedingungen möglich ist.

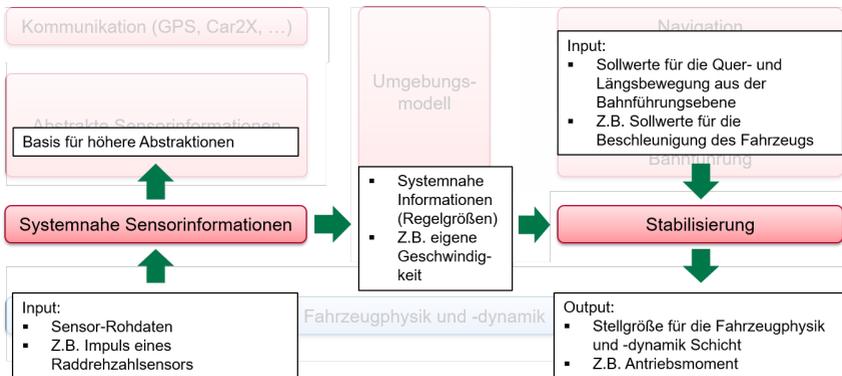


Abbildung 2.11.: IDAL: Stabilisierungsebene im Detail

2.4.4. Umgebungsmodell

Das Umgebungsmodell aus Abb. 2.7 muss schließlich eine konsistente Informationssammlung zur Abbildung des Fahrzeugumfeldes bereitstellen. Alle Informationen über das Umfeld, die erfasst werden können und zur Erfüllung der Fahrfunktionen beitragen, unabhängig davon, ob dies über eigene Sensorik oder über Kommunikationswege stattfindet, werden zentral im Umgebungsmodell zusammengeführt. Das Umgebungsmodell besteht aus statischen Elementen, die in Form von Domänenwissen (Klassen) bei der Entwicklung des Systems eingebracht werden, und dynamischen Elementen (instanzierte Objekte), die während der Laufzeit mit den erfassten Informationen über das Umfeld angereichert werden. [DKK05]

Statisches Wissen besteht darin, dass bestimmte Klassen von Verkehrsobjekten (Personenkraftwagen (PKW), Lastkraftwagen (LKW), Fußgänger, etc.) existieren und diese sich nach gewissen Regeln verhalten. So kann ein PKW der sich mit 120 km/h vorwärts bewegt, sich nicht im nächsten Augenblick rückwärts bewegen.

Die dynamischen Elemente werden durch die Informationserfassung (vgl. Abschn. 2.4.2 und Abschn. 2.4.3) ständig aktualisiert. Beispiel eines dynamischen Inhalts sind die Informationen über ein anderes Verkehrsobjekt, d.h.

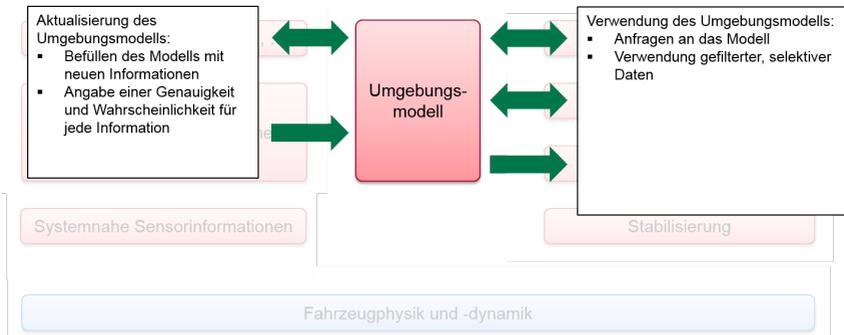


Abbildung 2.12.: IDAL: Schnittstellen des Umgebungsmodells

die Zuordnung zu einer Klasse aus dem statischen Wissen (PKW, LKW, etc.), Differenzabstand und -geschwindigkeit sowie andere erkannte Merkmale wie Objektabmessungen.

2.5. Evaluation des IDAL-Modells

Um die Anwendbarkeit des IDAL-Modells zu bewerten wurde ein Matlab Simulink Modell entwickelt, dessen oberste Hierarchieebene in Abb. 2.13 dargestellt ist [Sch15a]. Ziel soll die Darstellung einer Funktionsarchitektur sein, die auf den Ebenen des IDAL-Modells basiert, um darin beispielhaft ein Assistenzsystem funktional nachbilden zu können.

2.5.1. Prototypisches Matlab Simulink Modell

Das Simulink Modell besitzt die drei Ebenen aus Abb. 2.7, wobei die Bahnführungsebene aus zwei Teilen besteht, was in diesem Modell (Abb. 2.13) zu vier übereinander angeordneten Simulink-Blöcken führt [Sch15a]. Der Datenaustausch zur Bewegungsvorgabe findet in diesem Fall immer nur von oben nach unten statt und Informationen über das Fahrzeugumfeld stehen über die (hier genannte) Fusionsebene (*Umgebungsmodell* in Abb. 2.13) zur

Verfügung. Die Fusionsebene stellt dabei ein Umgebungsmodell dar, in dem andere Verkehrsteilnehmer als Objektliste mit einem festen Parametersatz an die Ebenen weitergegeben werden [Pok15]. Die linke Seite entspricht der Informationserfassung und bereitet die Informationen entsprechend für die Fusionsebene auf.

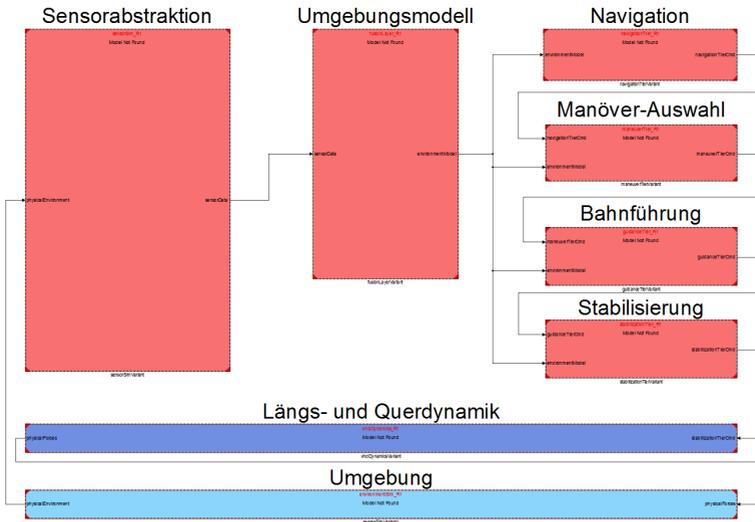


Abbildung 2.13.: Simulink Modell zur Evaluation des IDAL Modells nach [Sch15a]

Die Realisierung ist derart aufgebaut, dass die Sub-Modelle, die in den einzelnen Ebenen-Blöcken hinterlegt sind, durch Referenzen sehr einfach ausgetauscht werden können. So ist es möglich beim Laden des Modells verschiedene Teilmodelle für die einzelnen Ebenen auszuwählen, was eine gewisse Modularität mit sich bringt.

Der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Ebenen und Modulen findet zyklisch mit der Aktualisierungsrate⁷, in der das gesamte Simulink Modell berechnet wird, statt.

⁷ Standardwert der Aktualisierungsrate des verwendeten Aufbaus beträgt 1ms.

2.5.2. Aufbau und Funktion

Navigation: Im prototypischen Simulink Modell wurde die Navigationsebene als reines Interface⁸ ohne funktionalen Inhalt implementiert. Da die Mission in den betrachteten Szenarien durch die Simulationsumgebung vorgegeben ist und ein Szenario inmitten einer Autobahnfahrt beginnen kann, werden keine Informationen generiert, die in der darunterliegenden Manöver-Auswahl umgesetzt werden. Soll z.B. eine komplette Mission vorgegeben werden, in welcher in einem Streckennetz von einem zu einem anderen Punkt navigiert werden soll, ist diese Ebene entsprechend mit Funktionalität zu realisieren.

Manöver-Auswahl: In der zweiten Ausführungsebene werden auf Basis der Umfeldinformationen aus dem Block *Umgebungsmodell* und gegebenenfalls aus den Vorschlägen der Navigationsebene Manöverentscheidungen getroffen. Dies bedeutet, dass an die Bahnführung weitergegeben wird, welches der verfügbaren expliziten Manöver als Handlung vorgeschlagen wird. Die Auswahl basiert in der prototypischen Realisierung auf einem einfachen Vergleich von Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten. Dazu ist eine Wunschgeschwindigkeit für das Fahrzeug vorgegeben, auf die bei freier Fahrt beschleunigt werden soll und andernfalls, wenn möglich, durch einen Spurwechsel versucht wird die Wunschgeschwindigkeit zu erzielen.

Bahnführung: Im Simulink-Block *Bahnführung* sind die durch das Fahrzeug beherrschten Manöver, sowie deren Transitionen untereinander integriert. In dem zu Evaluationszwecken prototypisch implementierten Modell, sind die fünf unterschiedlichen Fahrmanöver, die auf mehrspurigen Straßen durchführbar sind, prototypisch realisiert (eine detailliertere Übersicht und Erläuterung der Fahrmanöver wird in Abschn. 3.2.5 gegeben):

- beschleunigen/verzögern auf Geschwindigkeit
- Spurwechsel recht/links
- Spur halten
- Geschwindigkeit halten
- Abstand halten

Da das eingesetzte Simulationswerkzeug als Schnittstelle zur Steuerung des Fahrzeuges bereits die Manöver Fahrspur und Geschwindigkeit halten, aber

⁸ Ein Interface in der objektorientierte Softwareentwicklung stellt lediglich die Schnittstellen bereit, ohne dabei eine Funktionalität zu implementieren.

auch beschleunigen und verzögern auf eine Zielgeschwindigkeit zur Verfügung stellt, müssen nur noch der Spurwechsel und das Manöver Abstand halten realisiert werden.

Stabilisierung: Dieser Simulink Block ist analog zum Navigations-Block lediglich als Interface ohne Funktion realisiert. Die angeforderten Zielgrößen aus dem Bahnführungs-Block werden direkt an die physikalische Fahrzeugschicht weitergereicht, welche die Bewegungen in der Simulation durchführen. Es besteht hier die Möglichkeit, stabilisierende Funktionen wie z.B. die eines ESP zu integrieren. Im Zuge dessen ist es erforderlich, die bisher vom Simulationswerkzeug genutzten Manöver (Fahrspur halten, Geschwindigkeit halten, beschleunigen, verzögern) ebenfalls in der Bahnführung zu implementieren.

Längs- und Querdynamik: Dieser Teil repräsentiert das reale Fahrzeug, in welchem diese Implementierung der Funktionsarchitektur eingesetzt wird. Da dieses nicht in Matlab Simulink modelliert und simuliert wird, sondern im externen Simulationswerkzeug, werden hier nur Signale an die Fahrzeugsimulation weitergegeben bzw. von dort eingelesen.

Umgebung: Dieser Simulink-Block stellt ebenfalls die Schnittstelle zum Simulationswerkzeug her, indem alle relevanten Informationen über die Fahrzeugumgebung abgefragt werden. Für die bestehende Implementierung sind diese Informationen während einer Autobahnfahrt in Bezug auf die Strecke folgende:

- Anzahl Fahrspuren
- Breite der Fahrspuren
- Fahrzeugposition (Längs- und Querrichtung relativ zum Streckenpfad und Streckenbeginn)

Weiterhin werden Informationen über weitere Verkehrsteilnehmer ausgelesen, wobei für jeden Teilnehmer die folgenden Größen verwendet werden:

- Position
- Geschwindigkeit
- Beschleunigung
- Fahrzeugmaße (Länge, Breite, Höhe)

Sensorabstraktion: Da die durchgeführte Evaluierung des IDAL Modells auf einer simulierten Umgebung (vgl. Kap. 3) beruht, ist in diesem Teil (Sensorabstraktion) der prototypischen Realisierung die Diskrepanzen zwischen

der simulierten Umgebung und der letztendlichen realen Implementierung notwendig. Dazu werden die Sensor-äquivalenten Informationen⁹ aus der Simulation in eine realistische Datenbasis, exakt so wie sie schließlich im realen Fahrzeug vorzufinden wäre, überführt. Es lässt sich z.B. nur eine absolute Position oder Geschwindigkeit der anderen Verkehrsobjekte aus der Simulation bestimmen. Im Gegensatz dazu stehen in einem realen Fahrzeug nur relative Werte zur Verfügung. Damit die Fahrfunktionen, welche in den Ebenen Navigation, Manöver, Bahnführung und Stabilisierung implementiert sind, auf realistischen Informationen, exakt in der Form, wie sie später im richtigen Fahrzeug vorliegen, aufbauen können, werden diese dahin überführt.

2.6. Erkenntnisse aus der Evaluation

Während der prototypischen Implementierung hat sich herausgestellt, dass eine klare Schnittstellendefinition zwischen den einzelnen Ebenen und dem *Umgebungsmodell* von Vorteil ist, bevor die Implementierung der einzelnen Funktionen und Teile innerhalb der Ebenen stattfindet. Ebenfalls hat sich herausgestellt, dass zur Realisierung des Umgebungsmodells ein signalflussorientierter Aufbau, wie es mit Matlab Simulink der Fall ist, ungeeignet ist. So ist z.B. die variierende Anzahl an Verkehrsobjekten, die sich im Fahrzeugumfeld befinden, nicht über die statischen Signalverbindungen in Simulink abbildbar bzw. sie ist auf eine während der Entwicklung festgelegte maximale Anzahl beschränkt. Es bietet sich an, das Umgebungsmodell auf Basis einer objektorientierten Datenbank zu integrieren, welche bereits eine ausgereifte Abfrageschnittstelle für komplexere Anfragen beinhaltet und gleichzeitig für einfachere Informationen eine zyklische signalflussorientierte Schnittstelle integriert werden kann.

Auf gleiche Weise sollten die unterschiedlichen Ebenen aus Abb. 2.13 mithilfe der für sie geeigneten Methode realisiert werden. Das bedeutet für Regelkreise auf Stabilisierungsebene ist weiterhin die etablierte modellbasierte und signalflussorientierte Entwicklung zu empfehlen, da diese den Entwicklungsanforderungen für zeitkritische Regelkreise am ehesten gerecht werden. Auf Bahnführungsebene bedeutet das eine objektorientierte Strukturierung

⁹ Informationen, die im realen Fahrzeug mithilfe von Sensorik erfasst und aufbereitet wird; in der Simulation allerdings als direkte Größen verwendbar sind.

einzusetzen, da auf dieser Ebene bereits vermehrt dynamische Datenstrukturen (Anzahl weiterer Verkehrsteilnehmer im Fahrzeugumfeld) zu verarbeiten sind. Weiterhin ist eine strikte Aufteilung der Bahnführungsebene in Bahnführung und Manöver-Auswahl (vgl. Abb. 2.10) sowie eine klar definierte Schnittstelle dazwischen von Vorteil, wobei die Bahnführung sicherheitsrelevante Funktionen enthält und die Manöver-Auswahl lediglich Komfort- und Effizienz-Funktionen realisiert. Auf Navigationsebene, an die keine Echtzeit- und Sicherheitsanforderungen gestellt werden, bieten Konzepte und Methoden aus der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik Potential, wie etwa der Einsatz einer serviceorientierten Architektur zum Informationsaustausch. Dies ist darin begründet, dass auf dieser Ebene deutlich größere und dynamischere Datenmengen verarbeitet werden müssen, als in der Bahnführung- und Stabilisierungsebene.

Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen durch die Modellierung in Matlab Simulink und auf Grund der genannten Argumente wird im Fortgang dieser Arbeit zur Implementierung des IDAL Frameworks (Rahmen für die Fahrfunktionen) die Programmiersprache C++ verwendet, so dass dieses ohne weitere Anpassungen sowohl in einer simulierten, wie auch realen Umgebung einsetzbar ist. Damit werden die Gesamtstruktur und die Schnittstellen sowie ein Teil der Funktionen in den einzelnen Ebenen realisiert. Andere Ebenen (z.B. die Stabilisierungsebene) werden modellbasiert umgesetzt, durch Code-Generierung übersetzt und als Bibliothek in die Gesamtstruktur der C++ Realisierung integriert.

2.6.1. Vergleich zum Stand der Wissenschaft und Technik

Mit den Bestrebungen zum automatisierten Fahren sind bereits Ansätze in der Literatur [WH06; KSB10; SKB09; Gey+11; Sch11] und erste Prototypen [BR12; MM15] in der Automobilindustrie zu finden, die ein ähnliches Vorgehen, wie es hier vorgeschlagen wird, zur Strukturierung der Fahraufgabe aufweisen (vgl. Abschn. 2.3.3 und Abschn. 2.3.4). Weiterhin existieren Entwicklungswerkzeuge, wie etwa ADTF (vgl. Abschn. 2.2.2), die es ermöglichen implementierungsnah Fahrfunktionen abseits des späteren Fahrzeugs zu entwickeln und zu testen. Ferner existieren Konzepte, wie dasjenige der BMW Group (vgl. Abschn. 2.3.4), die dazu dienen die verschiedenen Sensorinformationen in einem Umgebungsmodell zusammenzufassen und für alle

Fahrfunktionen bereitzustellen. Schließlich kommen bereits in den überwiegenden Teilen der Fahrzeugelektronik Laufzeitumgebungen wie OSEK und AUTOSAR zur Abstraktion der elektronischen Steuergeräte zum Einsatz (vgl. Abschn. 2.2.2).

Zusammenfassend konnten zu jedem Teilbereich, der dazu beiträgt automatisierte Fahrfunktionen für das Automobil zu entwickeln, Konzepte und Lösungen gefunden werden. Allerdings fehlt bisher eine grundlegende übergeordnete Gesamtsystempartitionierung, in der die einzelnen Teilfunktionen klar eingeordnet werden können und eine klare Trennung zu anderen Teilfunktionen besteht. Weiterhin basieren die bisherigen Systeme meist auf signalbasiertem Datenaustausch, so dass dynamisch Informationsinhalte, wie sie für eine umfangreiche Interpretation des Fahrzeugumfeldes erforderlich sind, nur sehr schwierig integrierbar sind. Ebenfalls fehlt es an Fahrfunktionsarchitekturen, die sich klar an den Schnittstellen auftrennen lassen, so dass sich das System zu Test- und Abnahmezwecken in funktionale Teilstücke, die getrennt voneinander funktional getestet werden können, aufteilen lässt. Aus diesem Grund werden mit dem IDAL-Modell die bereits bestehenden Konzepte bzw. Teile davon als Grundlage verwendet und diese aus Sicht des Systems Engineering in einer abstrakten Beschreibung zusammengefasst. Letztendlich dient das Modell zur klaren Aufteilung der Teilbereiche der Fahrfunktionen, so dass diese unabhängig voneinander entwickelt und getestet werden können. Das verfolgte Ziel ist, das Gesamtsystem auf unterschiedliche Zulieferer und Entwicklungsteams aufzuteilen und Teilfunktionen aus vorangegangenen Entwicklungen wiederzuverwenden.

Im Vergleich zu AUTOSAR und Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kraftfahrzeug (OSEK) wird hierbei keine direkte Abstraktion der Steuergeräte-Hardware im Fahrzeug adressiert, sondern eine Hierarchisierung der automatisierten Fahraufgabe und der dazu notwendigen Informationserfassung und -interpretation vorgenommen. Das bedeutet, dass für einen Teil der Ebenen (z.B. die Stabilisierungsebene) und je nach Realisierung AUTOSAR als Basis erforderlich ist. Für andere Ebenen und Teile, wie etwa die Navigationsebene oder das Umgebungsmodell, bieten sich z.B. ein echtzeitfähiges Linux Betriebssystem mit ROS (vgl. Abschn. 2.2.2) als Integrationsplattform an, um von bestehenden Entwicklungen aus anderen Bereichen der Informatik zu profitieren. Folglich steht das hier vorgestellte konzeptionelle Modell nicht in Konkurrenz zu AUTOSAR, OSEK und ähnli-

chen Konzepten, sondern baut auf diesen auf, indem einzelne Funktionen beispielsweise als AUTOSAR Applikation integriert werden.

2.6.2. Beitrag zur *herkömmlichen Entwicklung*

Auf Grund der Bestrebungen, dass zukünftig im Vergleich zu den klassischen Assistenzsystemarchitekturen nur noch ein Satz an Sensorik zur gesamten Automatisierung der Fahraufgabe integriert werden soll [Sti05], ist es nicht mehr möglich ein in sich abgeschlossenes Teilsystem durch einen Zulieferer entwickeln, testen und integrieren zu lassen. Es ist somit ein Umdenken erforderlich, dass eine Partitionierung bzw. Verteilung der Entwicklungsaufwände nicht mehr rein bauteilorientiert sondern funktional basieren muss. Es ist davon auszugehen, dass sich ein Zulieferer oder ein Entwicklungsteam nur mit der Umfelderkennung und -bereitstellung beschäftigt, während sich ein anderes Team lediglich auf die Entwicklung eines einzelnen Fahrmanövers und wieder ein anderes nur auf eine spezielle Komfortfunktion zur entsprechenden Manöver-Auswahl fokussiert. Soll nun das Gesamtsystem zur Abdeckung der gesamten Fahraufgabe aufgebaut und unterteilt werden, ist es sinnvoll eine übergeordnete Systemstruktur wie das IDAL-Modell zu verwenden, so dass eine Entwicklung wie auch ein Testen mit präzise definierten Schnittstellen möglich ist.

Aktuell wird die Komplexität in der Entwicklung von Fahrfunktionen dominiert durch die steigende Anzahl an Sensoren, ihrer wachsenden Auflösung und ihres überproportional steigenden Informationsgehalts. So ist es üblich, dass heutzutage Kameras und Laser-Scanner zur Erfassung des Fahrzeugumfeldes eingesetzt werden, die ganze Informationsströme liefern. Während die erste Sensorik zur Umfelderkennung durch Ultraschallsensoren für einen Parkassistenten gegeben war, verfügt der Mercedes Benz S 500 INTELLIGENT DRIVE [AG13; Taş+17] über eine nach vorne gerichtete Stereokamera, zwei weitere Monokameras, acht Fernbereichsradare und vier Nahbereichsradare (vgl. Abb. 2.14) um das Fahrzeugumfeld auch bei höheren Geschwindigkeiten umfänglich zu erfassen. Weiterhin kommt die Nutzung von Informationen anderer Fahrzeuge durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug- (C2C) und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (C2I) hinzu [Mak13]. Damit ergeben sich auch beim Testen elektronischer Systeme, die auf dieser Informationsflut aufbauen, neue Herausforderungen. Die Zuhilfenahme des IDAL-Modells ersetzt keine

2. Abstraktion von Fahrfunktionen

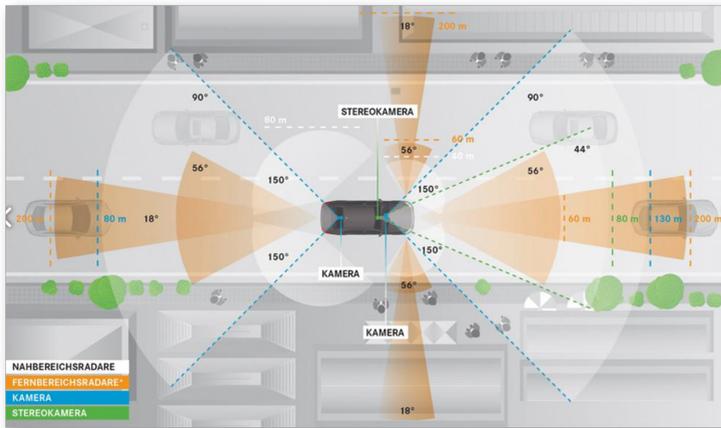


Abbildung 2.14.: Umfeldsensoren des Mercedes Benz S 500 Intelligent DRIVE [AG13]

bestehenden Tests, die bereits für Bauteile, Module, Teilsysteme etc. durchgeführt werden (vgl. Abschn. 2.2.4), sondern erlaubt es, Fahrfunktionen, welche nach dem IDAL-Modell strukturiert und aufgebaut sind, mit den bekannten Testmethoden schrittweise und vom Zielsystem losgelöst zu testen.

Durch die Definition dieser Meta-Funktionsarchitektur mit dem IDAL-Modell wird bereits eine grundlegende Strukturierung der Fahrfunktionen durchgeführt ohne dabei aber einen Funktionsumfang selbst zu definieren. Art und Umfang der erforderlichen Funktionskomponenten lassen sich dadurch einfach und gezielt an den Anwendungsfall, ergo die zu erfüllende Aufgabe, anpassen. Somit lassen sich Teilfunktionen, die zu einer kundenerlebbar und markendifferenzierenden Fahrfunktion beitragen, unabhängig voneinander entwickeln, was die Spezifikation der Anforderungen, die Testbarkeit und die Arbeitsteilung erleichtert. Während der Entwicklung kann die Gesamtfunktionalität iterativ erweitert werden, indem einzelne Fahrfunktionen in den Ebenen des IDAL-Modells sukzessiv hinzukommen. Dies kann stufenweise erfolgen, bis der für ein Fahrzeug geplante Systemumfang erreicht ist. Der

Einsatz von agilen Entwicklungsmethoden zur Funktionsentwicklung in Form von Softwarelösungen wird ebenfalls begünstigt.

Weiterhin wird der Test und die Verifizierbarkeit einzelner Komponenten dadurch erleichtert, dass das Verhalten von Teilfunktionen an definierbaren Schnittstellen festgelegt werden kann. Durch eine strikte Trennung der Funktion von ihrer Zielplattform und den Einsatz der Abstraktionsschnittstellen können Funktionen unabhängig vom späteren Fahrzeug entwickelt, simuliert und getestet werden, sofern das Fahrzeug und die Entwicklungs-/Testumgebung die gleiche Schnittstelle anbieten.

Durch eine Entkopplung der Fahrzeugumfelderfassung, dem Umgebungsmodell und der Fahrzeugfunktionen selbst, wirken sich Verbesserungen z.B. in der Umfelderkennung automatisch auf alle Fahrzeugfunktionen aus. Somit lassen sich z.B. auch durch eine Anpassung im Umgebungsmodell länderspezifische Eigenschaften für alle Fahrfunktionen global aktivieren oder verändern.

2.7. Zusammenfassung des Kapitels

Das IDAL-Modell stellt ein Rahmenwerk zur Verfügung, welches es erlaubt auf abstrakter Ebene das Fahrzeugumfeld ganzheitlich zu erfassen und zu interpretieren. Damit lässt sich eine Assistenzfunktion oder Funktion zum automatisierten Fahren auf Bahnführungsebene des Drei-Ebene-Modells aus Abb. 2.2, wie z.B. ein kollektiver Energieeffizienz-Assistent, unabhängig der Realisierung der anderen Ebenen entwickeln und testen.

Dieses konzeptionelle Modell findet während des gesamten Entwicklungszeitraums, ergo beginnend in der System-Design-Phase und endend bei den Abnahmetests, seine Anwendung. Demzufolge ist das Gesamtsystem, bezogen auf die E/E-Architektur, nicht in einzelne Subsysteme wie ESP oder ACC, die von Zulieferern komplett extern entwickelt und getestet werden, sondern in s.g. Informations-Prozessierungs-Module zu partitionieren. Diese Partitionen können reine Software (SW), reine Hardware (HW) oder eine Kombination dieser sein. Weiterhin ist auch denkbar, dass es sich lediglich um einen Algorith-

mus, eine HW-/SW-Bibliothek oder reine IP¹⁰ z.b. für eine FPGA¹¹-Synthese handelt.

Die konkrete Realisierung in einem Fahrzeug ist letztendlich abhängig vom Ausstattungs-/Funktionsumfang des Fahrzeugs selbst. Ein zentraler Punkt dabei ist ein für den Funktionsumfang entsprechend detailliertes Umgebungsmodell (vgl. Abschn. 2.4.4). Ebenfalls fundamental ist, dass dieses Umgebungsmodell mit ausreichend zuverlässigen Informationen durch Sensoren oder andere Quellen gefüllt werden kann.

¹⁰ Intellectual property (IP) zu deutsch: Geistiges Eigentum

¹¹ Field Programmable Gate Array (FPGA)

3. Taktisches Fahrzeugumfeld und dessen Simulation

Die Simulation ist im Hinblick moderner Fahrzeugentwicklung ein nicht mehr wegzudenkende Methode, um Ideen und Konzepte vor der eigentlichen Entwicklung bzw. Realisierung auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen und zu optimieren [DP85; Tho98; Xu+05]. So ist auch für die Entwicklung neuer Fahr-funktionen die Simulation in einer virtuellen Welt, in der die neue Funktion *Probe gefahren* werden kann, von entscheidender Bedeutung. Es existieren bereits Gebiete, in denen Simulationen von Fahrzeug und Verkehr durchgeführt werden [Zof+14; Zof+15; Bac+17]. Dazu zählen auf der einen Seite die Verkehrssimulation, mit dem Ziel das Straßennetz und die Verkehrsleitung zu optimieren, und auf der anderen Seite die Fahrzeugsimulation, mit dem Ziel das Fahrzeugverhalten zu analysieren.

3.1. Aufbau des Kapitels

Da einige Begriffe in den beiden Domänen (Verkehrssimulation und Fahrzeugsimulation) teils unterschiedlich verwendet werden, beginnt dieses Kapitel mit den Definitionen, wie diese Begrifflichkeiten in der vorliegenden Arbeit zu verstehen sind. Nachfolgend werden die Grundlagen zu Fahrzeug- und Verkehrssimulationen dargestellt, soweit diese zum Verständnis dieser Arbeit erforderlich sind. Anschließend wird ein Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik zu dem Thema Simulation von Fahrzeug und Verkehr gegeben. Danach findet eine Eingrenzung des Betrachtungsrahmens für diese Arbeit statt, indem der Begriff des *taktischen Fahrzeugumfeld* eingeführt und dessen Definition erläutert wird. Die Beschreibung des Einsatzes von Simulationmethoden im Rahmen des taktischen Fahrzeugumfelds zur Analyse von

Fahrfunktionen basierend auf dem IDAL-Modell aus Abschn. 2.4 bildet das Kapitelende.

3.2. Begriffserläuterungen im Kontext der Fahraufgabe

Ulbrich et al. [Ulbr+15] stellen in ihrem Paper eine Begriffssammlung zu Szene, Szenario und Situation zusammen und geben Vorschläge für eine Interpretation im Rahmen des automatisierten Fahrens. In den folgenden Unterabschnitten wird auf die Begriffe und ihre Verwendung näher eingegangen, wobei die Definitionen von Ulbrich et al. als Grundlage verwendet und diese an entsprechenden Stellen angepasst werden.

3.2.1. Szenerie

Der Begriff Szenerie umfasst nach [Ulbr+15] alle statischen und quasi-statischen (z.B. letzter Punkt in nachfolgender Liste) Aspekte der Umwelt, in der sich ein Fahrzeug bewegen kann. Eine unvollständige Liste an Beispielen ist wie folgt gegeben:

- Fahrstreifennetz: Fahrstreifen, Konfliktflächen, ...
- stationäre Elemente: Hindernisse, Bordsteine, Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen, nicht-klassifizierbare Informationen, ...
- Vertikale Elevation
- Umweltbedingungen: diese werden für eine zeitliche begrenzte Dauer als statisch angesehen

Ulbrich et al. gehen bei ihren Begriffsdefinitionen davon aus, dass sich die Fahrzeuge auf entsprechend vorgesehenen Verkehrsflächen bewegen und nicht abseits der Straße (*off-road*) fahren. Im Fortgang dieser Arbeit wird nur eine Untermenge der allgemeinen Verkehrsflächen verwendet: Mehrspurige und baulich getrennte Straßen.

3.2.2. Szene

Der Begriff Szene wird ebenfalls nach der Definition von [Ul+15] verstanden:

„Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die Szenerie, dynamische Elemente, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter wie auch die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst.“

Hierbei werden unter *dynamischen Elementen* alle Objekte verstanden, die sich innerhalb der Szenerie bewegen können. Beispielsweise wird auch ein geparktes Fahrzeug als dynamisches Objekt und nicht als Teil der Szenerie gesehen. Dadurch, dass eine Szene immer subjektiv aus der Sicht des einzelnen Akteurs oder Beobachter gesehen wird, gehört die Selbstrepräsentation ebenfalls zur Beschreibung der Szene. Die Objektivität lässt sich nur in der Simulation allumfassend beschreiben, da in der Realität normalerweise nicht alle Aspekte bekannt sind.

Die Definition nach [Ul+15] gibt für den Begriff der Szene eine allgemein verständliche, allerdings abstrakte Beschreibung im Kontext des automatisierten Fahrens. Sie lässt dennoch in der Konkretisierung sehr viel Spielraum offen, z.B. bei der Verwendung zum Aufbau einer Simulation für Verkehrssimulationen.

3.2.3. Situation

Pellkofer definiert eine Situation als „die Summe der für die Verhaltensentscheidungen relevanten Sachverhalte. Relevant für die Verhaltensentscheidung sind die aktuelle Szene, die Intentionen und Aktionen aller Subjekte in der Szene (einschließlich des Eigenfahrzeugs) und die Fähigkeiten des Eigenfahrzeugs, welche die Entscheidungsalternativen darstellen.“[Pel+03]

Ulbrich et al. fassen den Begriff wie folgt zusammen [Ul+15]:

„Eine Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. Sie umfasst alle relevanten

Bedingungen, Möglichkeiten und Determinanten von Handlungen. Eine Situation wird aus der Szene durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet, basierend auf transienten (z.B. missionspezifischen) wie auch permanenten Zielen und Werten. Folglich ist eine Situation immer subjektiv, indem sie die Sicht eines Elements repräsentiert.“

Diese Definition umfasst eine Zusammenstellung und Interpretation vieler verschiedener Autoren wie: Wershofen und Graefe [WG96]; Reichardt [Rei96]; Haag [Haa98]; Pellkofer [Pel+03]; Krüger [Krü13]; Geyer et al. [Gey+14]

Im Folgenden wird der Begriff Situation mit der zusammengefassten Definition verwendet:

„Eine Situation ist als eine Momentaufnahme der relevanten Szenen-Elemente zu verstehen und beinhaltet alle aus der Sicht eines Verkehrsteilnehmers relevanten Informationen (Szenerieobjekte, dynamische Elemente und momentane Manöverzustände) über das Fahrzeugumfeld und den eigenen Zustand.“

3.2.4. Szenario

Definition nach Ulbrich et al. [Ulb+15]:

„Ein Szenario beschreibt die zeitliche Entwicklung von Szenen-elementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche mit einer Startszene beginnt. Aktionen und Ereignisse ebenso wie Ziele und Werte können spezifiziert werden, um diese zeitliche Entwicklung in einem Szenario festzulegen. Im Gegensatz zu Szenen decken Szenarien eine gewisse Zeitspanne ab.“

Der statische Zusammenhang der aufgeführten Begriffe ist in Abb. 3.1 zusammengefasst. Damit ist ein Szenario als Abfolge von Szenen zu verstehen, die in einem Baum-Graphen als Knoten dargestellt werden können. Die dazwischenliegenden Kanten sind folglich Aktionen oder Ereignisse, die eine Szene in eine andere überführt. Aktionen sind z.B. Manöver dynamischer Objekte einer Szene, Ereignisse sind Änderungen der äußeren Umstände, wie z.B. das Ende einer Fahrspur.

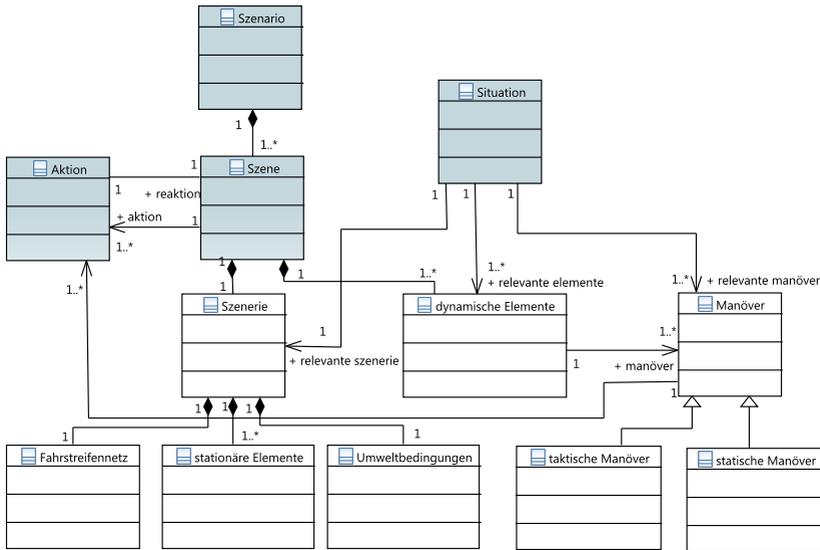


Abbildung 3.1.: Zusammenhänge von Szenario, Manöver und Situation

3.2.5. Manöver

Ein Fahrmanöver, kurz als Manöver bezeichnet, ist eine vorgegebene Abfolge von Tätigkeiten, die ausgeführt werden müssen, um ein Ziel zu erreichen. Als Ziel ist dabei eine neue Verkehrssituation zu verstehen, die durch Aktionen von Verkehrsteilnehmern herbeigeführt wird. Ein Manöver kann von jedem dynamischen Element einer Szene durchgeführt werden. Allerdings hängen verfügbare Manöver von den Möglichkeiten des dynamischen Objekts ab. Hier wird nur auf die Manöver eines Fahrzeugs in der genannten Umgebung eingegangen. Abb. 3.2 zeigt eine Aufstellung der Manöver von [Nag94; Töl96; Sie03; OFK92].

Fahrmanöver lassen sich in implizite und explizite Manöver aufteilen [SKB09]. Während explizite Manöver solche sind, die aktiv aufgerufen werden müssen, kommen implizite immer dann zum Einsatz wenn ein explizites beendet ist und kein weiteres explizites Manöver ausgewählt ist.

Weiterhin klassifiziert [Sie03] die Manöver in die beiden Klassen:

- strategische Fahrmanöver
- taktische Fahrmanöver

Strategische Manöver erstrecken sich dabei über einen längeren Zeithorizont und stellen damit eine weitreichende Planung, wie z.B. die Wahl der kürzeren Route, dar. Folglich wäre ein *Abbiegen* oder *Autobahn verlassen* Manöver auf Grund von Verkehr ein strategisches Manöver, da langfristig die andere Straße schneller zum Ziel führt. Im Gegensatz dazu ist ein *Überholen* oder *Spurwechseln* Manöver ein taktisches, da es lediglich in der aktuellen Situation und damit auf kurzfristige Sicht zum schnelleren Vorankommen führt.

3.2.6. Fahrzeugumfeld

Der Begriff Fahrzeugumfeld wird gleichbedeutend mit Fahrzeugumgebung im Folgenden auch einfach als Umfeld oder Umgebung verwendet. Als Fahrzeugumfeld wird die Menge aller Elemente eines Szenarios bezeichnet, welche zur Erfüllung der Fahraufgabe erforderlich sind. Dabei zählen sowohl statische Elemente aus der Szenerie wie die Fahrspuren oder Verkehrsschilder, als auch dynamische Elemente wie andere Verkehrsteilnehmer zum Fahrzeugumfeld.

Nagel [Nag94]	Tölle [Töl96]	Siedersberger [Sie03]	Okuno et al. [OFK92]
Anfahren	Anfahren	Stillstand	Geschwindigkeit halten
Straßenzug folgen	Folgen	Folgefahrt	Fahrspur folgen
Eine Kreuzung überqueren	Annähern	Stop	Vermeidung eines Zusammenstoßes mit anderen Verkehrsteilnehmern
Fahrspurwechsel nach links/rechts	Passieren	Spurwechsel	Fahrspur wechseln
Links/rechts abbiegen	Kreuzung überqueren	Spurfahrt	Einem Fahrzeug folgen
Am rechten Straßenrand anhalten	Fahrspurwechsel	Abbiegen	Ein Fahrzeug überholen
Rückwärts fahren	Abbiegen	Überqueren	Überholt werden
Kehre links/rechts	Umkehren	Abfahren	Vorausfahren
Fahrtrichtung umkehren	Parken	Auffahren	Unfallvermeidung von vorn
Annähern an einen sich vor dem Fahrzeug befindenden Gegenstand		Wegpunktfahrt	Unfallvermeidung von hinten
Überholen		Ausweichen	Ausweichen im Notfall
Vor einem Gegenstand anhalten		Stop&Go	
Links/rechts an einem Gegenstand vorbeifahren		Notstop	
Hinter einem anfahrenen Fahrzeug anfahren			
Einem Fahrzeug folgen			
In eine Parklücke einfahren			
Aus einer Parklücke herausfahren			

Abbildung 3.2.: Aufstellung von Fahrmanövern aus der Literatur

Weiterhin werden die Elemente, die Teil des Fahrzeugumfeldes sind, als Objekte verstanden und sämtliche Eigenschaften dieser Objekte als Attribute bezeichnet.

3.2.7. Strategie

Nach Mintzberg [Min87] ist die allgemeine Auffassung für *Strategie als Plan* wie folgt:

Strategie ist ein Plan - eine Art konsequent beabsichtigte Vorgehensweise, ein Leitfaden (oder eine Zusammenstellung von Leitfäden), um mit einer Situation umzugehen

Eine Strategie im Kontext der Fahraufgabe wird somit als ein langfristiger, über einen Zeitraum von mehreren Sekunden bis über mehrere Stunden vorausschauender Plan verstanden, um ein übergeordnetes Ziel (z.B. Minimierung des durchschnittlichen Energiebedarfs) zu erreichen. Für Fahraufgaben mit diesem ausgedehnten Zeithorizont sind keine zeitkritischen Anforderungen an eine Regelfunktion gestellt. Es ist ausreichend Zeit, um Entscheidungen treffen zu können und daher irrelevant, ob diese eventuell wenige Millisekunden bis Sekunden Verzögerung besitzen.

3.2.8. Taktik

Taktiken stellen kurzfristige Handlungen innerhalb des vorgegebenen Handlungsrahmens dar, um ein in der Strategie übergeordnetes Ziel zu erreichen [Kas13]. Diese umfassen einen deutlich kürzeren Planungs- und Handlungszeitraum im Vergleich zur Strategie. Die Zeitintervalle in Bezug auf die Fahraufgabe bewegen sich zwischen einer und mehreren Sekunden [Don12].

3.2.9. Verkehrsfluss

Der Verkehrsfluss ist definiert als der Quotient von Anzahl Fahrzeuge ΔN pro Zeiteinheit Δt , die eine bestimmte Stelle x überqueren und wird in Fahrzeuge pro Stunde oder pro Minute angegeben. [TK10]

3.2.10. Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte gibt eine Aussage über die Anzahl der Fahrzeuge ΔN auf einer bestimmten Strecke Δs und wird in der Einheit Fahrzeuge pro Meter oder Kilometer angegeben. [TK10]

3.2.11. Simulation

Unter dem Begriff Simulation ist im technischen Sinne die Nachahmung (von lat. simulare: nachbilden, nachahmen) von technischen Abläufen und Zusammenhängen zu verstehen, die i.d.R. zu komplex für eine analytische Betrachtung sind. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert in der Richtlinie *VDI 3633* den Begriff wie folgt:

„Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ [Log13]

Es steht somit die Ausführbarkeit von technischen Modellen im Vordergrund, wobei diese durch mathematische Gleichungen, programmatische Abfolgen oder andere Verhaltensbeschreibungen beschrieben werden können. Die Simulation bildet das dynamische Verhalten eines realen Systems meist nicht vollständig, sondern nur ausschnittsweise ab, und zwar mit dem ausgewählten Fokus, der untersucht werden soll. Daher lassen sich Simulationen auch in den unterschiedlichsten Domänen wiederfinden, z.B. im Bereich von Finanz- und Wirtschaftsanalysen, in Untersuchungen zu Populationsentwicklungen, im Umfeld von Statik- und Kräfteanalysen.

Im Bereich der Fahrzeugentwicklung sind Simulationen heutzutage ebenfalls in mehrere Sparten aufgeteilt. Es existieren Steifigkeits- und Aerodynamikanalysen in der mechanischen Entwicklung von Fahrzeugen, die z.B. mithilfe von Simulationen der angreifenden Kräfte durchgeführt werden. Im Bereich Elektrik und Elektronik werden einzelne elektronische Bauteile oder Steuergeräte während der Entwicklung simuliert, um ihr Verhalten in kritischen Fällen zu untersuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Methode Simulation eingesetzt, um erstens das Fahrzeugumfeld (Strecke, andere Verkehrsteilnehmer etc.) und zweitens

das physikalische Verhalten (fahr-dynamische Bewegungen) eines Fahrzeugs nachzuahmen. Dabei kommen Methoden und Tools, die auf Grund inzwischen verfügbarer Rechenleistung immer mehr Einsatz in der automobilen Entwicklung finden [Zof+14; DP85], aus den Domänen Fahrdynamiksimulation und Verkehrssimulation zur Geltung.

3.3. Stand der Wissenschaft und Technik zur Simulation von Fahrscenarien

Die Simulation von Fahrscenarien verbindet zwei unterschiedliche Domänen. Zum einen ist das die Verkehrssimulation und zum anderen die Fahrzeugsimulation. Ersteres kommt von einer sehr abstrakteren Sichtweise, bei der die Verkehrsobjekte nur als Punkte betrachtet werden, und führt zu einer detaillierteren Betrachtung (vgl. Granularitätsstufen aus Abschn. 3.3.1). Bei letzterem wird vom Konkreten (physikalische Größen und Signale) immer weiter abstrahiert, um eine allgemeine Beschreibung von Fahrscenarien für die Entwicklung und den Test von Fahrzeug und Fahrzeugkomponenten zu erhalten (vgl. Abschn. 3.3.4). Nun besteht eine Herausforderung darin, beide Welten so miteinander zu verknüpfen, dass Fahrfunktionen, etwa ein Energieeffizienz-Assistent (vgl. Kap. 6), in einer gemeinsamen Simulation entwickelt und getestet werden können. Somit stellt dieser Abschnitt einen Überblick über Simulationen aus beiden Bereichen dar.

3.3.1. Verkehrssimulation

Das Ziel von Simulationen im Verkehrswesen besteht darin, den Verkehr effizient und nachhaltig mithilfe von Simulationsmethoden und -modellen zu gestalten [Vor88; FV00]. Dies wird immer dann benötigt, wenn z.B. neue Verkehrswege geplant, bestehende umgestaltet werden oder auch wenn zeitlich begrenzten Änderungen in der Verkehrsführung z.B. durch längere Baumaßnahmen bevorstehen. Durch eine Simulation kann so im Voraus abgeschätzt werden, ob die geplante Veränderung ihren Zweck erfüllt oder ob ein Verkehrschaos zu erwarten ist. Dabei wird in die drei Granularitätsstufen unterteilt: makroskopisch, mikroskopisch und submikroskopisch. [TK10]

Die makroskopische Betrachtung

Die makroskopische Sicht der Verkehrssimulation basiert auf Mittelwerten für einzelne Streckenabschnitte zur Simulation großer Verkehrsnetze. Relevante Größen sind hierbei die Verkehrsdichte und der Verkehrsfluss. Diese Art der Betrachtung wird eingesetzt, wenn z.B. das gesamte Straßennetz einer Stadt oder das Autobahnnetz von Europa simuliert werden soll, um beispielsweise die Auswirkungen einer Straßensperrung zu analysieren. [Höf06; TK10]

Die mikroskopische Betrachtung

Die mikroskopische Sicht hingegen betrachtet jedes Verkehrsobjekt einzeln [Höf06]. Von Relevanz für jedes Objekt sind dabei die Größen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstand, sowie die Zuordnung auf diskrete Fahrspuren [TK10]. Dazu werden unterschiedlich stark vereinfachte Modelle für das Verhalten der Verkehrsobjekte eingesetzt. Beispiele solcher Modelle sind IDM und MOBIL, welche in Abschn. 3.3.2 im Detail erläutert werden.

Die submikroskopisch Betrachtung

In der submikroskopischen Sichtweise wird detaillierter auf das Bewegungsverhalten der einzelnen Objekte eingegangen. Modelle dieser Granularität „bilden beispielsweise auch Elemente des Antriebsstrangs wie Motor und Getriebe nach“, [Har07]. Im Vergleich zum Mikroskopischen werden hierbei detailliertere Modelle mit Differentialgleichungen für das physikalische Verhalten der einzelnen Objekte hinterlegt und bei einer Simulation berechnet. Diese benötigen dementsprechend deutlich höhere Berechnungsressourcen im Vergleich zur mikroskopischen Simulation. Daher werden submikroskopische Modelle in der Regel nur zur Simulation einzelner Fahrzeuge oder Fahrzeuganteile verwendet und nicht für eine große Anzahl an Fahrzeugen. Bezogen auf die Fahrzeugbewegung bei einem Fahrspurwechsel, findet dieser nicht mehr diskret durch ein Sprung von einer Spur auf eine andere statt (mikroskopisch), sondern das Fahrzeug bewegt sich kontinuierlich von einer Spur auf die andere (submikroskopisch). [Har07]

3.3.2. Verhaltensmodelle aus der Verkehrssimulation

Ab einer mikroskopischen Granularität der Verkehrssimulation wird für jedes Verkehrsobjekt ein s.g. Verhaltensmodell benötigt, um dessen Bewegungsverhalten in einer Simulation nachzubilden [Höf06]. Dabei handelt es sich um „Rechenvorschriften zur Nachbildung des Fahrverhaltens“, [Har07], die beispielsweise eine Entscheidung zur Durchführung eines Fahrmanövers, wie etwa ein Spurwechsel, treffen. Diese sind für mehrspurige Straßen in ihre unterschiedlichen Aufgaben unterteilt [Har07]:

- Fahrzeugfolgemodell
- Fahrstreifenwechselmodell
- Routenwahlmodell

Das Fahrzeugfolgemodell und das Fahrstreifenwechselmodell werden der Bahnführungsebene zugeordnet, während das Routenwahlmodell in der Navigationsebene untergebracht wird. Da im Weiteren eine Fokussierung auf die Bahnführungsebene nach der Aufteilung des IDAL-Modells (vgl. Abschn. 2.4) stattfindet, wird lediglich auf die ersten beiden Modelle näher eingegangen und das Routenwahlmodell nicht weiter ausgeführt. In den beiden folgenden Unterabsätzen werden daher einerseits als Fahrzeugfolgemodell das *IDM* und als Fahrstreifenwechselmodell *MOBIL* im Detail beschrieben.

Intelligent Driver Model (IDM)

Bei IDM handelt es sich um ein zeitkontinuierliches Fahrzeugfolgemodell, welches die Beschleunigung abhängig von Sicherheitsabstand, Differenz- und Wunschgeschwindigkeit berechnet. Nach Treiber et al. [THH00] ist es das einfachste unfallfreie und vollständige Fahrzeugfolgemodell zur Beschreibung der Längsdynamik eines Fahrzeugs. Ein vollständiges Modell bedeutet, dass es auf sämtliche Verkehrssituationen nach Abschn. 3.2.3, wie die Fahrgasse, die freie Fahrt, das Annähern an ein langsames oder stehendes Fahrzeug/Hindernis, angewandt werden kann. Unfallfreiheit besteht allerdings nur dann, wenn sich alle Fahrzeuge nach diesem gleichen Modell bewegen und verhalten. Die

Soll-Beschleunigung eines Fahrzeugs errechnet sich nach Gl. (3.1). [THH00; TK10]

$$a = a_{max} \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Mit Hilfe des Parameters a_{max} wird das maximale Beschleunigungsvermögen des modellierten Fahrzeugs festgelegt. Der Quotient $\left(\frac{v}{v_0}\right)^\delta$ nimmt Einfluss auf die Beschleunigung, die abhängig von der Momentangeschwindigkeit v im Verhältnis zur Wunschgeschwindigkeit v_0 ist. Die Gewichtung des Geschwindigkeitswunsches fließt über den Beschleunigungsexponent δ mit in Gl. (3.1) ein.

Der vom Modell vorgeschlagene Abstand $s^*(v, \Delta v)$ zum vorausfahrenden Fahrzeug lässt sich mit Gl. (3.2) berechnen. Wobei Δv die Differenzgeschwindigkeit zwischen einem Fahrzeug F im taktischen Fahrzeugumfeld und dem vorausfahrenden Fahrzeug V repräsentiert, wie in Gl. (3.3) dargestellt.

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left(0, v \cdot T_{folge} + \frac{v \cdot \Delta v}{2\sqrt{a_{max} \cdot b_{komf}}} \right) \quad (3.2)$$

$$\Delta v = v_F - v_V \quad (3.3)$$

In Gl. (3.2) werden mit s_0 ein fester Minimalabstand und mit $v \cdot T_{folge}$ eine geschwindigkeitsabhängigen Lücke eingestellt. Hinzu kommt in Gl. (3.2) ein Distanzanteil, der abhängig von der Momentangeschwindigkeit, der Differenzgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug, dem Parameter Komfortverzögerung und dem Parameter Maximalbeschleunigung ist. Mit Gl. (3.1) lässt sich für jedes Fahrzeug in einer Verkehrssimulation eine Beschleunigung vorgeben.

Bei freier Fahrt, ergo es befindet sich kein weiteres Fahrzeug auf der gleichen Fahrspur voraus, wird der abstandsabhängige Anteil aus Gl. (3.1) null und die ermittelte Beschleunigung hängt nur noch von der Differenz zwischen

Momentan- und Wunschgeschwindigkeit ab. Bei Annäherung der aktuellen Geschwindigkeit v an die Wunschgeschwindigkeit v_0 , geht die Beschleunigung gegen Null.

Im zweiten Fall, einer Annäherung an einen anderen Verkehrsteilnehmer oder ein Hindernis, ist die Abstands-abhängige Komponente aus Gl. (3.1) maßgeblich. Aus Gl. (3.2) wird ersichtlich, dass bei geringen Differenzgeschwindigkeiten Δv nur eine geringe Verzögerung a und bei sehr großer Differenz der Geschwindigkeit Δv eine starke erwirkt wird.

Minimize Overall Braking Induced by Lane Changes (MOBIL)

Bei MOBIL handelt es sich um ein Entscheidungsmodell für Fahrspurwechsel von Fahrzeugen in der mikroskopischen Verkehrssimulation [TK09]. Im Vergleich zu IDM, welches die Fahrzeuglängsrichtung beeinflusst, wird damit eine Steuerung der Querrichtung realisiert. Es handelt sich hierbei nicht um eine kontinuierliche Bestimmung einer Größe für die Querrichtung, sondern um eine diskrete Entscheidung, ob ein Spurwechsel von der aktuellen Fahrspur auf die linke oder rechte davon durchgeführt werden soll. Als Basis des Vergleichs werden die Beschleunigungen der betroffenen Fahrzeuge herangezogen. Nach [KTH06] gehen das Ego-Fahrzeug und das jeweils nachfolgende Fahrzeug auf der hypothetischen Zielspur mit in die Berechnungen ein. Ziel des Modells ist die Minimierung der Verzögerungen bei gleichzeitiger Maximierung der Beschleunigungen. [KTH06; TK09; TK10]

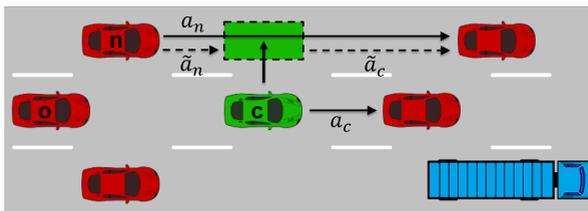


Abbildung 3.3.: Minimize Overall Braking Induced by Lane Changes nach [KTH06]

Für die Berechnung der Fahrzeugbeschleunigungen kommt IDM zum Einsatz. Damit werden die Beschleunigungen für das Ego-Fahrzeug (a_c und \tilde{a}_c) und die des nachfolgenden Fahrzeugs auf der hypothetischen Zielspur (a_n und \tilde{a}_n) abgeschätzt, was in Abb. 3.3 durch die linke Fahrspur dargestellt ist. Gleiches lässt sich ohne Beschränkung der Allgemeinheit auch für die rechte Fahrspur als hypothetische Zielspur durchführen. Die Beschleunigungen a_* repräsentieren den Fall, dass das Ego-Fahrzeug die aktuelle Fahrspur beibehält, die Beschleunigungen \tilde{a}_* repräsentieren den hypothetischen Fall, dass das Ego-Fahrzeug die Fahrspur gewechselt hat. Über die Konstante Δa_{th} wird der notwendige Vorteil eingestellt, der nach Gl. (3.4) erreicht sein muss, damit ein Spurwechsel entschieden wird. Der Wert dafür sollte größer null sein, um eine übermäßig häufige Anzahl an Spurwechsel zu vermeiden [TK10]. Wenn die Ungleichung Gl. (3.4) erfüllt ist, wird ein Spurwechsel nach MOBIL vorgeschlagen.

$$\tilde{a}_c - a_c + p \cdot (\tilde{a}_n - a_n + \tilde{a}_o - a_o) > \Delta a_{th} \quad (3.4)$$

„Die zentrale Komponente des MOBIL-Kriteriums ist der Höflichkeitsfaktor, welcher das Maß an – über die Sicherheit hinausgehende – Rücksichtnahme auf andere Verkehrsteilnehmer angibt ... Für $p = 1$ werden die Bedürfnisse der anderen ebenso gewichtet wie die eigenen.“ [TK10]

Mit Hilfe des Parameters p (Höflichkeitsfaktor) kann somit eine Gewichtung anderer Verkehrsteilnehmer vorgenommen werden. Wird dieser auf $p = 0$ gesetzt, werden die Belange anderer Fahrzeuge ignoriert. Für $p = 1$ ist die Gewichtung aller Teilnehmer gleich und wird $p > 1$ werden die Belange anderer stärker berücksichtigt, als die des Ego-Fahrzeugs.

Da auf europäischen Straßen ein Rechtsüberholverbot und ein Rechtsfahrgebot besteht, sind Spurwechselvorgänge nach links und nach rechts unterschiedlich zu behandeln. Dafür führt Kesting [KTH06] einen weiteren Parameter Δa_{bias} ein, welcher zusätzlich zur Hemmschwelle Δa_{th} addiert bzw. subtrahiert wird. Addiert wird dieser für einen hypothetischen Spurwechsel nach links, subtrahiert für einen Spurwechsel nach rechts. Dies bedeutet, dass der Vorteil auf der linken Spur um Δa_{bias} größer sein muss, um einen Spurwechsel dorthin zu veranlassen und weiterhin reicht es aus, wenn der Vorteil um

Δa_{bias} geringer ist, um einen Spurwechsel nach rechts durchzuführen. Damit das Rechtsfahrgebot auch auf leeren Straßen korrekt eingehalten wird, muss Δa_{bias} stets größer als Δa_{th} sein [KTH06].

Parameter	Wert
Höflichkeitsfaktor p	0,2
Hemmschwelle Δa_{th}	$0,1m/s^2$
Rechtsfahrgebot Δa_{bias}	$0,3m/s^2$

Tabelle 3.1.: Vorgeschlagene Modellparameter des MOBIL nach [TK10]

Mit dieser Modellerweiterung hinsichtlich des europäischen Rechtsfahrgebots ergeben sich Gl. (3.5) für den Wechsel der Fahrspur nach rechts und Gl. (3.6) für den umgekehrten Fall. Für die Autobahn und vergleichbare mehrspurige Straßen werden die Werte aus Tabelle 3.1 vorgeschlagen.

$$L \rightarrow R : \tilde{a}_c - a_c + p \cdot (\tilde{a}_n - a_n + \tilde{a}_o - a_o) > \Delta a_{th} - \Delta a_{bias} \quad (3.5)$$

$$R \rightarrow L : \tilde{a}_c - a_c + p \cdot (\tilde{a}_n - a_n + \tilde{a}_o - a_o) > \Delta a_{th} + \Delta a_{bias} \quad (3.6)$$

3.3.3. Verkehrssimulationswerkzeuge

SUMO

Simulation of Urban Mobility (SUMO) ist ein quelloffenes Verkehrssimulationsprogramm, das ursprünglich 2001 vom Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) initiiert wurde. Auf Grund seiner Quelloffenheit kann es beliebig weiterentwickelt werden und adressiert damit den Einsatz in Forschung und Entwicklung. Es bietet sowohl die Möglichkeit, wie im Namen bereits erkennbar ist, der Simulation von Stadtverkehr, aber auch Überlandstrecken und Autobahnen sind damit simulierbar. SUMO führt mikroskopische Verkehrssimulationen durch, in denen unterschiedliche Verhaltensmodelle für die

sich bewegenden Objekte hinterlegt sind. Es bestehen bereits Verhaltensmodelle, die zusammen mit dem Simulationskern verfügbar sind. Es können aber auch eigene entwickelt und entsprechend hinterlegt werden. Die beiden in Abschn. 3.3.2 erläuterten Verhaltensmodelle sind in SUMO bereits enthalten. Weiterhin bietet dieses Simulationswerkzeug mehrere Hilfsmittel an, die das Erstellen und Konvertieren von Streckennetzen in unterschiedlichen Formaten erleichtern. Durch die offene Verfügbarkeit von SUMO existiert eine umfangreiche Community und damit eine gemeinschaftlich gepflegte Dokumentation¹ im Internet.

VISSIM

Verkehr in Städten Simulation (VISSIM) ist eine kommerzielle Werkzeugumgebung der PTV Group² zur mikroskopischen Verkehrssimulation. Die Fokussierung des Produktes liegt besonders auf einer innerstädtischen Verkehrsbeachtung, welche neben dem automobilen Verkehr auch den ÖPNV, Fahrräder und Fußgänger beinhaltet. Für die Bewegungsmodellierung von Fahrzeugen kommen Verhaltensmodelle basierend auf dem psycho-physischen Abstandsmodell von Wiedemann [Wie74] und dem Fahrstreifenwechselmodell von Sparmann [Spa78] zum Einsatz. Die Simulationssoftware kann über proprietäre Schnittstellen durch vom Nutzer selbst entwickelte Fahrverhaltensmodelle erweitert werden, welche die integrierten ersetzen.

3.3.4. Fahrzeugsimulation

Während in der Verkehrssimulation bis zur mikroskopischen Sicht die Bewegungen vieler Fahrzeuge betrachtet werden, wird in der Fahrzeugsimulation aus submikroskopischer Sicht, der Fokus auf ein einzelnes Fahrzeug gerichtet und dessen Bewegung sowie internes Verhalten betrachtet. Hierbei steht ein genaues und realistisches Bewegungsverhalten eines einzigen Fahrzeugs im Mittelpunkt, um z.B. die Fahrdynamik eines Fahrwerks oder die Eigenschaften eines Antriebsstrangs analysieren und bewerten zu können. Dafür konnte in der Vergangenheit auf eine umfangreiche Simulation des Fahrzeugumfeldes

¹ http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation_of_Urban_MObility_-_Wiki (Abruf: 04.06.2016)

² <http://www.ptv.de> (Abgerufen am: 04.06.2016)

verzichtet werden, da der Untersuchungsgegenstand vollkommen losgelöst von z.B. anderen Verkehrsteilnehmern war.

Im Zuge der Automatisierung der Fahraufgabe (vgl. Abb. 2.3) kommen immer mehr Einflüsse durch andere Verkehrsteilnehmer und Verkehrsobjekte nach der Definition des Fahrzeugumfeldes aus Abschn. 3.2.6 hinzu. Das bedeutet, dass immer mehr Fahrzeugkomponenten, wie etwa Fahrfunktionen zum assistierten und automatisierten Fahren, mithilfe von Simulationen in Kombination mit einem virtuellen/simulierten Fahrzeugumfeld getestet werden [NS10; Zof+14; Miq14; Bac+15]. Dieses Vorgehen reduziert nicht nur die Kosten, da bereits im frühen Entwicklungsstadium die Funktionalität getestet werden kann, sondern erlaubt es auch eine große Anzahl an unterschiedlichen Szenarien abzudecken [Str12]. Gleichzeitig besteht dadurch aber auch eine Reproduzierbarkeit der Szenarien, so dass z.B. unterschiedliche Entwicklungsstände unter gleichen Voraussetzung getestet werden können [Bac+15].

Es existieren dazu mehrere Simulationswerkzeuge, die eine virtuelle Testfahrt ermöglichen und eine Kopplung zu unterschiedlichen in-the-Loop-Tests (vgl. Abschn. 2.2.4) erlauben. Darunter sind exemplarisch TASS Prescan³, IPG CarMaker⁴, CarSim⁵, VIRES Virtual Test Drive⁶ und OpenDS⁷ zu nennen. Im weiteren Verlauf basiert die prototypische Realisierung auf dem Tool CarMaker von IPG.

IPG CarMaker

Das Simulationswerkzeug CarMaker der Firma IPG stammt aus dem Genre der Fahrdynamiksimulation. Den Kern dieses Simulationswerkzeugs bilden mathematische Modelle basierend auf Differentialgleichungen, welche die Physik der Fahrzeugbewegungen beschreiben. Es bietet einen modellbasierten Austausch einzelner Komponenten aus dem Antriebsstrang oder der Fahrwerkskomponenten wie z.B. Feder-Dämpfer-System. Diese können als eigenständige Modelle aufgebaut und eingebunden werden. Für alle Komponenten liefert das Simulationswerkzeug CarMaker bereits Standardkomponenten mit.

³ <https://www.tassinternational.com/prescan>

⁴ <http://www.ipg.de>

⁵ <http://carsim.com>

⁶ <https://www.vires.com>

⁷ <http://www.opensds.eu>

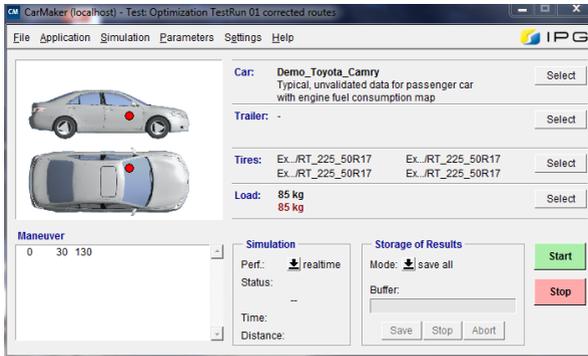


Abbildung 3.4.: Hauptansicht des Fahrscenariensimulators IPG CarMaker

Ab Version 4 wird vor dem Hintergrund der simulativen Erprobung von Fahrerassistenzfunktionen verstärkt Wert auf eine Simulation des Fahrzeugumfeldes gelegt, so dass dieses Werkzeug nicht nur für Fahrscenariensimulationen, sondern auch für die Entwicklung und den Test von Fahrerassistenzfunktionen genutzt werden kann. Dieses Vorgehen erweitert die bisherige rein submikroskopische Simulation eines einzelnen Fahrzeugs in Richtung einer vereinfachten mikroskopischen Verkehrsbetrachtung in Kombination mit weiteren Fahrzeugen (vgl. Abschn. 3.3.1). In Version 5 wurde zusätzlich der Funktionsumfang und die Flexibilität in Bezug auf die Streckendefinitionen ausgedehnt, so dass auch diese detaillierter beschrieben und somit für weitere Analysen genutzt werden können. Auf Grund dieser Möglichkeiten kommt dieses Werkzeug für das weitere Vorgehen als Simulationskern zum Einsatz.

Da CarMaker eine Co-Simulation mit Matlab Simulink unterstützt, lassen sich Teile durch eigenentwickelte Simulink Modelle ersetzen. Dies gilt auch z.B. für die Steuerung der Verkehrsobjekte im Fahrzeugumfeld. Für diesen Fall existiert eine Schnittstelle, über welche ein Zugriff auf alle internen Simulationsvariablen von CarMaker zugegriffen werden kann. Diese werden als *UserQuantities* bezeichnet. Da Matlab Simulink auf einer signalflussorientierten Modellierung basiert, bietet sich diese Kombination aus CarMaker und Simulink optimal für die Entwicklung und Analyse von Regelkreisen an. Allerdings ist es daher ungeeignet für dynamische Datenstrukturen, die vielmehr ein objektorientiertes Vorgehen voraussetzen.

3. Taktisches Fahrzeugumfeld und dessen Simulation

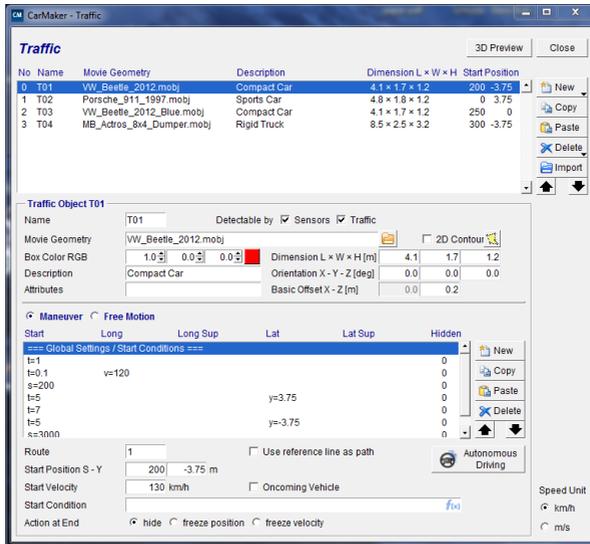


Abbildung 3.5.: Konfiguration der umgebenden Verkehrsteilnehmer in IPG CarMaker

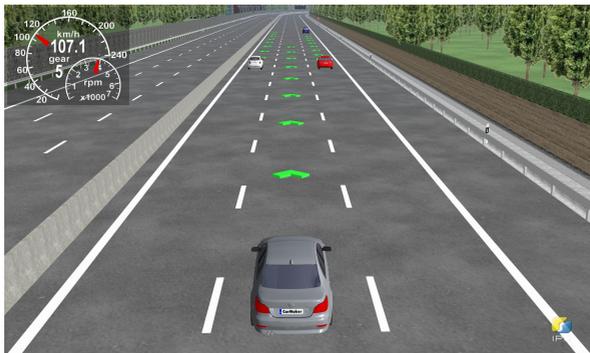


Abbildung 3.6.: Beliebige Perspektive eines Szenarios in IPG CarMaker mit IPGMovie

Das bedeutet, dass ein Simulationslauf logisch (zeitlich und strukturell) wie ein Abbild der Realität aufgebaut wird. Zuerst wird ein Fahrzeug konfiguriert (Antriebsart, Getriebe, Fahrwerk etc.), danach eine Strecke (Fahrbahn, Kurven, Markierungen, Steigung, Schilder etc.), auf der sich das Fahrzeug bewegen soll sowie weitere Elemente in der Umgebung (z.B. Verkehrsteilnehmer wie weitere Fahrzeuge oder Passanten, vgl. Abb. 3.5). Schließlich wird das Verhalten des Fahrzeugs in Form von kleinen Manövern, wie etwa in x Sekunden auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigen, beschrieben. Zusätzlich verfügt CarMaker über eine 3D Visualisierung des Simulationslaufs, welche mit entsprechender Anzeige das Gefühl vermittelt, aus der Egoperspektive ein Fahrzeug zu fahren oder es erlaubt das simulierte Szenario aus einer beliebigen Perspektive Abb. 3.6 zu beobachten.

3.3.5. Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft und Technik

Aus dem Bereich der Verkehrssimulation existieren Modelle auf mikroskopischer Granularität (vgl. Abschn. 3.3.2 und Abschn. 3.3.2) zur Nachbildung der Fahrbewegung. Während in Längsrichtung die Bewegung mit den Größen *Beschleunigung*, *Geschwindigkeit* und *Distanz* detailliert nachgebildet wird, ist in Querrichtung für Spurwechselmodelle lediglich die Entscheidungsfindung im Fokus. So wechseln die Verkehrsobjekte in den Verkehrssimulationen sprunghaft die Fahrspur.

Soll aber nun eine Fahrfunktion simulativ erprobt und getestet werden, reichen die mikroskopischen Modelle der Verkehrssimulation auf Grund ihrer sprunghaften Bewegungsvorgänge nicht mehr aus. Daher kommen für derartige Untersuchungen Methoden und Werkzeuge zur Fahrzeugsimulation zum Einsatz. Die in Abschn. 3.3.4 genannten Ansätze [NS10; Zof+14; Miq14] verfolgen das Ziel, ausgehend von Sensordatenaufzeichnungen, simulierte Umgebungen für den Test von Fahrfunktionen abzuleiten. Dabei wird beim Übergang in die Simulation stets jedes erkannte Objekt überführt, allerdings ist nicht sichergestellt, dass auch alle real vorhandenen Objekte in einem definiertem Umkreis im simulierten Szenario repräsentiert werden.

Es fehlt demzufolge an einer Definition der Systemgrenze, welche den Umfang des Fahrzeugumfeldes für die entsprechende Fahrfunktion bestimmt. Aus

diesem Grund findet im folgenden Abschn. 3.4 eine Definition des Betrachtungshorizonts statt, welcher als *taktisches Fahrzeugumfeld* betitelt wird.

3.4. Das taktische Fahrzeugumfeld

Die simulative Betrachtung von modernen Fahrfunktionen erfordert eine angemessene Berücksichtigung des dazugehörigen Umfelds um das betrachtete Fahrzeug herum. Abhängig von der Fahrfunktion und auf welcher Ebene des Drei-Ebenen-Modells nach Abb. 2.2 sie sich befindet, ist das zu berücksichtigende Fahrzeugumfeld auf die relevanten Umfeldobjekte anzupassen.

So war es in der Vergangenheit, in der lediglich grundlegende stabilisierende Fahrdynamikregelungen im Fahrzeug als elektronische Helfer integriert waren, überhaupt nicht erforderlich das Fahrzeugumfeld oder eine Prädiktion zu betrachten, während allerdings aktuelle und zukünftige Systeme immer mehr den vorausschauenden Aspekt mit einbeziehen. Erste Ideen, die den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug und damit Teile des Fahrzeugumfeldes in eine Fahrzeugregelung einbinden, sind bereits in einem US-Patent [LC95] aus dem Jahre 1995 zu finden. Darin wird ein konventionelles Adaptive Cruise Control (ACC) erläutert, das einen Fernbereichsradar nach vorne gerichtet zur Abstandsbestimmung einsetzt [Bos14].

Bei einem simulativen Test einer ACC Funktionalität ist es beispielsweise ausreichend, nur das Objekt, das sich vor dem Fahrzeug befindet, abzubilden. Wird aber z.B. ein erweitertes ACC mit Spurwechselfunktion (Economic Cruise Control (ECC) aus Abschn. 4.4.4) simuliert, erfordert dieses auch die Objekte neben und teilweise hinter dem Ego-Fahrzeug zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf die Erstellung eines Konzepts für einen kollektiven Energieeffizienz-Assistenten in Kap. 6, bei dem mehrere Fahrzeuge vor und hinter dem Ego-Fahrzeug in die Entscheidungen mit einfließen, wird ein noch größeres Fahrzeugumfeld, als das am nächsten befindliche Objekt voraus und seitlich dahinter, benötigt. Vergleichbares gilt auch für zukünftige Funktionen zum automatisierten Fahren, wie es die zugehörigen Erfassungsbereiche der dargestellten Sensorik aus Abb. 2.14 zeigen. Aus diesem Grund wird für Fahrfunktionen, die sich in der Bahnführungsebene nach dem IDAL-Modell aus

Abschn. 2.4 befinden, das *taktische Fahrzeugumfeld* für Straßenfahrzeuge im nächsten Abschnitt definiert.

3.4.1. Definition: Taktisches Fahrzeugumfeld

In Abschn. 3.2.7 und Abschn. 3.2.8 wurden die Begriffe Strategie und Taktik erläutert. Während die Strategie eine langfristige Planung bedeutet, reagiert die Taktik auf kurzfristige, unmittelbar bevorstehende Ereignisse. Weiterhin wird von den drei Ebenen der Fahraufgabe (vgl. Abschn. 2.2.3) die Bahnführungsebene, in welcher sich die Funktionalität des zu entwerfenden Energieeffizienz-Assistenten wiederfindet, auch als taktische Ebene bezeichnet [Sch09].

Für ein allgemeines Verständnis über den genauen Umfang des betrachteten Fahrzeugumfeldes für Fahrfunktionen in der Bahnführungsebene, wie es in Abb. 3.7 zu sehen ist, wird das *taktische Fahrzeugumfeld* für Straßenfahrzeuge wie folgt definiert:

Das taktische Fahrzeugumfeld von Straßenfahrzeugen auf mehrspurigen Straßen umfasst einen Bereich, welcher sich auf eine Distanz von d_{taktisch} Metern vor und hinter dem eigenen Fahrzeug aufspannt und sich dabei über alle befahrbaren Fahrspuren in der Breite erstreckt.

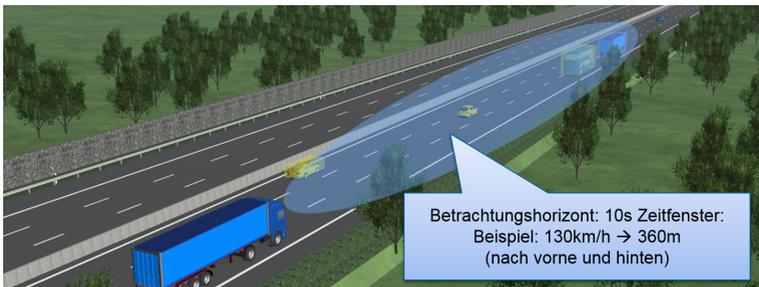


Abbildung 3.7.: Einflussbereich des taktischen Fahrzeugumfelds

Nach Donges [Don12] liegt der zeitliche Übergang zwischen strategischen und taktischen Entscheidungen im Bereich mehrerer Sekunden bis zu einer Minute. Hier wird im weiteren Verlauf als fester Zeithorizont zehn Sekunden gewählt, wodurch bei einer Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs von $v_{ego} = 130\text{km/h}$ nach Gl. (3.7) eine Distanz $d_{taktisch}$ von 360 Meter nach vorne und hinten entsteht. Mit heutiger seriennaher Sensorik sind Erfassungsdistanzen bis zu ca. 200 Meter möglich (vgl. Abb. 2.14) und in Kombination mit fahrzeugübergreifender Kommunikation ist eine Vervollständigung der Informationen über die Umgebung möglich.

$$d_{taktisch} = v_{ego} \cdot 10\text{s} \tag{3.7}$$

3.4.2. Abschätzung der Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld

Die Anzahl der weiteren Verkehrsteilnehmer, die sich in dem definierten Bereich befinden, kann sehr unterschiedlich sein. Für eine Maximalabschätzung werden daher zwei repräsentative Konstellationen beleuchtet.

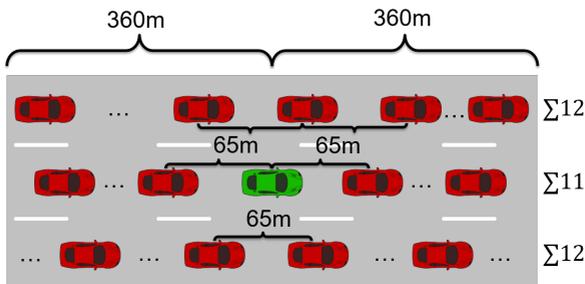


Abbildung 3.8.: Schematische Darstellung des Szenario 1 zur Abschätzung der Fahrzeuganzahl im taktischen Fahrzeugumfelds

Das erste Szenario (Abb. 3.8) besteht aus einer dreispurigen Autobahn auf der sich auf jeder Fahrspur Fahrzeuge mit dem gesetzlich vorgeschriebenen

Abstand von einem *halben Tachowert*⁸ mit jeweils 130 km/h bewegen. Der *halbe Tachowert* entspricht somit einem Abstand von 65 Metern. Aus Gl. (3.7) erhält man bei dieser Geschwindigkeit für das taktische Fahrzeugumfeld eine Distanz d_{taktisch} von 360 Metern sowohl nach vorne, als auch nach hinten und somit insgesamt $2 \cdot d_{\text{taktisch}} = 720\text{m}$. Daraus ergibt sich, ohne die Längen der Fahrzeuge selbst zu berücksichtigen, für die Fahrspur des Ego-Fahrzeugs (incl. dessen selbst) max. 11 Fahrzeuge, für jede weitere Fahrspur eine maximale Anzahl von 12 Fahrzeugen und insgesamt damit max. 35 Fahrzeugen.

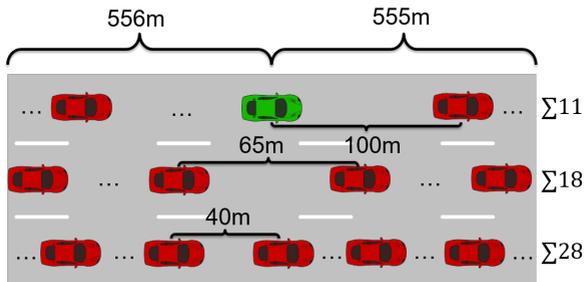


Abbildung 3.9.: Schematische Darstellung des Szenario 2 zur Abschätzung der Fahrzeuganzahl im taktischen Fahrzeugumfelds

Das zweite Szenario (Abb. 3.9) setzt ebenfalls eine dreispurige Autobahn voraus, wobei sich jedoch alle Fahrzeuge auf der linken Spure mit 200 km/h und auf der rechten mit 80 km/h fortbewegen. Das Ego-Fahrzeug befindet sich auf der linken Fahrspur, was zu einem taktischen Fahrzeugumfeld von insgesamt $2 \cdot d_{\text{taktisch}} = 1111\text{m}$ führt. Wird ebenfalls mit einer Zeitlücke von 1,8 Sekunden die maximale Anzahl an Fahrzeugen für jede Fahrspur ermittelt, ergeben sich für die linke Spure ebenfalls wieder 11, für die mittlere 18 und für die rechte 28 Fahrzeuge. Dies führt zu einer Summe von insgesamt 57 Fahrzeugen im taktischen Fahrzeugumfeld.

Durch die beiden Abschätzungen wird deutlich, dass für Funktionen in der Bahnführungsebene mit dem Umfang des taktischen Fahrzeugumfelds bis zu ca. 60 Fahrzeuge zu berücksichtigen sind. Im Vergleich zu einem herkömmlichen Abstandsregeltempomat, der lediglich ein vorausfahrendes Fahrzeug

⁸ Der Abstand *halber Tachowert* entspricht einer Zeitlücke von 1,8 Sekunden

berücksichtigt, entsteht hierdurch die neue Herausforderung, eine dynamische und große Anzahl an Umgebungsfahrzeugen zu verarbeiten.

3.5. Zusammenfassung des Kapitels

Um eine neue Fahrfunktion, egal ob assistierend oder eingreifend, während der Entwicklung analysieren, bewerten und testen zu können, ist ein umfangreiches virtuelles/simuliertes Umfeld erforderlich. Dazu muss einerseits das Fahrzeugumfeld und andererseits das eigene Fahrzeug in einem ausreichenden Umfang modelliert sein, so dass die Funktion die gleichen Bedingungen, wie im späteren Fahrzeug vorfindet.

Aus diesem Grund wurden zu Beginn dieses Kapitels die grundlegenden Begriffe und die Grundlagen von der makroskopischen Verkehrssimulation bis hin zur submikroskopischen Fahrzeugsimulation eingeführt. Im anschließenden Abschnitt Stand der Wissenschaft und Technik wurden mikroskopische Verhaltensmodelle für die Längs- und Querführung (IDM und MOBIL) sowie der Übergang zur submikroskopischen Fahrzeugbetrachtung dargelegt. Den eigenen Beitrag dieses Kapitels bildet die Definition des *taktischen Fahrzeugumfelds* für Straßenfahrzeuge als Systemgrenze für Fahrfunktionen der Bahnführungsebene. Abschließend erfolgte anhand der erarbeiteten Grundlagen eine Abschätzung der maximalen Fahrzeuganzahl in diesem Umfeld.

4. Das Paradigma *Connected Efficiency*

In Kapitel 3 wurde das taktische Fahrzeugumfeld auf mehrspurigen Straßen definiert. Weiterhin wurden verschiedene Möglichkeiten der Abstraktion für die Simulation von Fahrzeug und Verkehr gegeben. Dieses Kapitel führt das Paradigma *Connected Efficiency* ein, das eine energetische Bewertungsmöglichkeit für verschiedene Fahrsituationen darstellt. Das Paradigma und der Begriff *Connected Efficiency* wurden erstmals im betrachteten Kontext Automotiv durch den Autor der vorliegenden Arbeit im Rahmen einer internationalen Veröffentlichung auf dem 16. Stuttgarter Symposium vorgestellt und definiert [Kra+16a]. Im Detail wird dieses nun hergeleitet und erläutert.

4.1. Aufbau des Kapitels

Zu Beginn dieses Kapitels wird auf die Grundlagen zur Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen eingegangen sowie ein grundlegendes Energiebedarfsmodell in Abhängigkeit der Fahrzeugbewegung dargestellt. Anschließend wird der Stand der Wissenschaft und Technik von Assistenzfunktionen zur Minderung des Energiebedarfs erläutert. Im Kern dieses Kapitels steht das Paradigma *Connected Efficiency*, welches den Gedanken einer gesamtwirtschaftlichen, fahrzeugübergreifenden Energieeffizienz betitelt und dazu ein Energiebedarfsmodell als Metrik definiert. Am Ende dieses Kapitels wird das zuvor definierte Energiebedarfsmodell prototypisch als Matlab Simulink Modell realisiert.

4.2. Grundlagen zur Energieeffizienz in Kraftfahrzeugen

Im Rahmen dieser Arbeit werden unter dem Begriff *Kraftfahrzeuge* zusammengefasst Straßenfahrzeuge verstanden, die auf mehrspurigen Straßen vorzufinden sind. In erster Linie handelt es sich dabei (nach den statistischen Erhebungen des Bundesamtes für Verkehrswesen [FNS14]) um PKWs und LKWs. Sowohl PKWs als auch LKWs können in verschiedenen Ausführungen bzw. Varianten auftreten. Das bedeutet, dass PKWs in unterschiedlichen Klassen (Kleinwagen, SUV etc.), LKWs als Sattelzug, mit oder ohne Anhänger etc. auftreten können. In Anh. A ist eine Übersicht der Verkehrsanteile der einzelnen Klassen aufgeführt, die erkennen lässt, dass die PKWs mit über 75% die dominanteste Klasse darstellen und somit auch den Fokus dieser Arbeit auf die PKWs legt. Alle diese Verkehrsteilnehmer haben gemeinsam, dass sie ausgehend von einem Energiespeicher (z.B. Kraftstofftank oder Batterie) durch Energiewandlung (chemisch/physikalisch) einen Teil der mitgeführten Energie in die Fortbewegung des Fahrzeugs umsetzen.

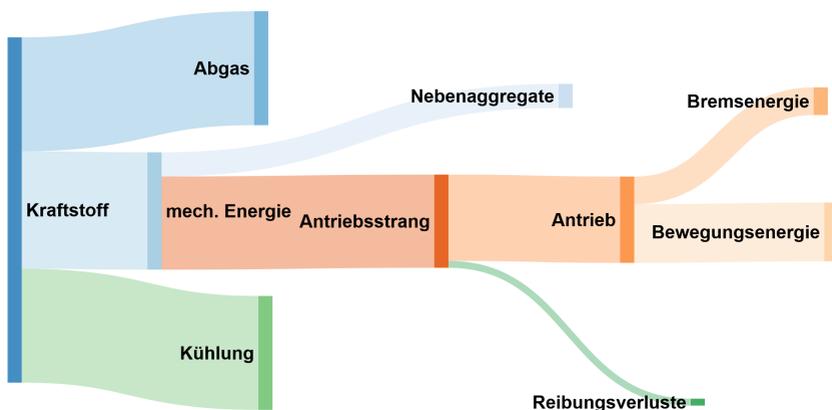


Abbildung 4.1.: Qualitativer Energiefluss eines PKWs mit Verbrennungskraftmaschine (abgeleitet aus [Hol+14; PV13])

Je nach Antriebsart und weiterer Komponenten im Fahrzeug ist der *Gesamtwirkungsgrad* des Fahrzeugs unterschiedlich. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungs-

kraftmaschine (VKM) kann lediglich ca. ein Drittel der Energie in mechanische Energie umgewandelt werden (vgl. Abb. 4.1). Ein beachtlicher Anteil geht durch Wärme (Abgas/Abgasnachbehandlung/Kühlung der VKM) ungenutzt in die Umgebung über [Hol+14; PV13]. Die mechanische Energie teilt sich auf in die Nebenaggregate (Pumpen, Lüfter, Generatoren für sämtliche elektrische Senken) und in den tatsächlichen Vortrieb des Fahrzeugs. Der Anteil, der zur Fortbewegung genutzt wird, ist ebenfalls *verlustbehaftet*, da zur mechanischen Übertragung auf dem Weg bis zu den Reifen durch Reibung in Lagern und Getrieben gleichermaßen mechanische Energie in Wärme umgewandelt wird.

Bei elektrischen Antrieben spielen die Wirkungsgrade der Leistungswechsler und elektrischen Maschinen eine entscheidende Rolle bezüglich der Umwandlung in mechanische Energie [Sie13]. Der Anteil der Energie, der benötigt wird, um das gesamte Antriebssystem zu kühlen/heizen ist deutlich geringer als bei der VKM, ebenso entfällt der zweite große Anteil, der durch die Wärme im Abgas ungenutzt bleibt. Dies führt im Vergleich zum Energiegehalt von Diesel oder Benzin dazu, dass lediglich ein Drittel der benötigten Antriebsenergie als elektrische Energie vorhanden sein muss, da der thermodynamische Prozess zur Energiewandlung beim Elektrofahrzeug ggf. außerhalb stattfindet [PV13]. Die Nebenaggregate besitzen bei diesem Antriebskonzept in der Regel ihre eigenen elektrischen Antriebe, so dass diese mit ihren Wirkungsgraden unabhängig betrachtet werden können. Elektrische Senken wie Steuergeräte, Innenraumfunktionen etc. werden über einen DC/DC-Wandler versorgt, dessen Wirkungsgrad ebenfalls unabhängig ist.

Hybride Antriebssysteme kombinieren die beiden erläuterten Antriebskonzepte auf verschiedene Arten und Weisen (serieller/paralleler Hybrid etc.). Nebenaggregate können hierbei teils mechanisch und teils elektrisch mit eigenen Motoren realisiert sein. Folglich existieren an verschiedenen Stellen Ansatzpunkte, um den Energiebedarf zu reduzieren, welche im nachfolgenden Abschnitt aufgegriffen werden.

4.2.1. Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs

Nach [HNK11] hängt der Energiebedarf bei Fahrzeugen von der Fahrweise, dem Fahrwiderstand und dem Wirkungsgrad ab. Die Faktoren Fahrwiderstand und Wirkungsgrad wurden bereits vielfach untersucht und durch

technische Maßnahmen, wie z.B. Optimierungen der Aerodynamik oder der Antriebsstrang-Verluste, verbessert. Der Faktor Fahrweise bietet bisher nur eingeschränkt Möglichkeiten, den Energiebedarf zu senken, da dies bisher nur über Anleitung des menschlichen Fahrers möglich ist, obwohl hierbei ein Potential von 20 bis 30 Prozent besteht [GES12; BGR14]. Mit zunehmender Automatisierung der Fahraufgabe können inzwischen allerdings erste Erfolge z.B. durch eine vorausschauende Längsführung mithilfe der Kenntnis des voraus liegenden Straßenabschnitts erzielt werden (vgl. Abschn. 4.4.5).

4.2.2. Angabe des Energiebedarfs

Der Energiebedarf für Kraftfahrzeuge wird üblicherweise mit einer spezifischen Kennzahl als *benötigter Kraftstoff bezogen auf eine definierte Entfernung* angegeben, z.B. Liter Kraftstoff pro 100 gefahrene Kilometer, oder als *erzielte Strecke bezogen auf einen definierten Verbrauch*, z.B. gefahrene Meilen pro Gallone benötigter Kraftstoff. Bei Baumaschinen oder Schiffen wird häufig der *benötigte Kraftstoff bezogen auf ein Zeitintervall*, z.B. Liter Kraftstoff pro Betriebsstunde, verwendet. Bei elektrischen Antrieben wie etwa reinen Elektrofahrzeugen kann der Energiebedarf direkt in der physikalischen Einheit Ws (Wattsekunde) bzw. kWh (Kilowattstunde) bestimmt und auf eine Entfernung bezogen werden. Sämtliche Angaben stellen einen Bezug zu einer Vergleichsgröße her (zurückgelegte Strecke, Zeitintervall), um so eine objektive Vergleichbarkeit zu schaffen. Allerdings ist dabei nicht festgelegt, wie die Nebenbedingungen (z.B. in welcher Zeit oder unter welchen Bedingungen wie etwa Steigung und Gefälle wird die gefahrene Strecke zurückgelegt) aussehen und ob sie einheitlich berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt standardisierte Fahrzyklen entwickelt, welche diese allgemeinen Nebenbedingungen einschränken. Im Zuge dessen wurden Fahrzyklen zur Messung der Abgase entwickelt (vgl. Abschn. 4.4.7), welche eine feste Vorgabe des Fahrprofils beinhalten [EG70]. Das bedeutet, es werden Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Zeiten vorgegeben und die dafür benötigte Menge an Kraftstoff gemessen. Durch derartige Fahrzyklen lässt sich der Energiebedarf nur ganz speziell für den jeweiligen Zyklus bestimmen (vgl. Abschn. 4.4.7 z.B. NEFZ), während Maßnahmen durch taktische Entscheidungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, keine Berücksichtigung finden.

4.3. Grundlegendes Energiebedarfsmodell für ein einzelnes Fahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Optimierung des Energiebedarfs von Fahrzeugen auf mehrspurigen Straßen dadurch erfolgen, dass Entscheidungen und Reaktionen auf taktischer Ebene getroffen werden. Langfristige Planung auf strategischer Ebene, wie etwa das Ein- und Ausschalten von Nebenverbrauchern oder eine Berücksichtigung der Streckensteigung in mehreren Kilometern Entfernung, ist nicht Umfang der Betrachtungen. Aus diesem Grund gehen angelehnt an [SB13] nur die Energie-beeinflussenden Größen basierend auf der Fahrbewegung in die Überlegungen ein. Es wird daher ein grundlegendes Energiemodell auf Basis der folgenden Kräfte verwendet:

- Luftwiderstand $F_L(t)$
- Rollwiderstand $F_{Ro}(t)$
- Steigungswiderstand $F_{St}(t)$
- Beschleunigungswiderstand $F_B(t)$
- Bremswiderstand $F_{Br}(t)$

In Abb. 4.2 sind die Kräfte, welche die Fahrbewegung beeinflussen, mit ihrer Wirkrichtung dargestellt.

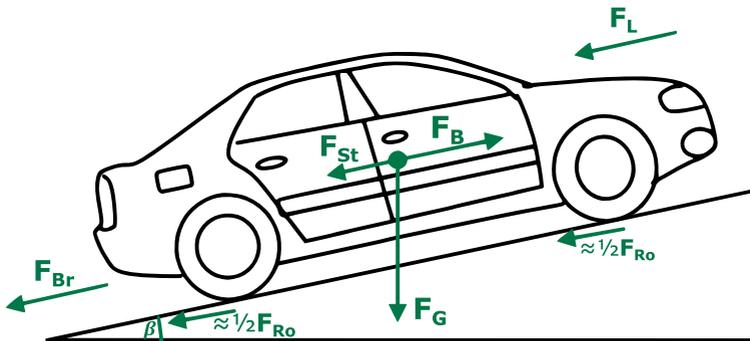


Abbildung 4.2.: Gesamtfahrwiderstand nach [SB13]

4.3.1. Krafteinwirkung durch den Luftwiderstand

Die Luftreibung ist abhängig von den fahrzeugspezifischen Parametern: Querschnittsfläche und Luftwiderstandsbeiwert (c_W -Wert). Typische Werte für den Luftwiderstandsbeiwert liegen bei PKW zwischen 0,25 und 0,4, wohingegen bei Bussen und LKW Werte über 0,4 der Realität entsprechen. Weiterhin geht die umgebungsabhängige Luftdichte in Gl. (4.1) ein. Schließlich ist die Kraft, die dem Fahrzeug auf Grund seiner Querschnittsfläche entgegenwirkt, proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit.

$$F_L(t) = \frac{\rho_L}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v_A(t)^2 \quad (4.1)$$

Diese Berechnung gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- Nur die frontal anströmende Luft beeinflusst den Luftwiderstand, was die Abhängigkeit auf die Querschnittsfläche ohne Seitenflächen begrenzt.
- Der Aerodynamik-Koeffizient (c_W) entspricht einem konstanten Wert, der nicht durch technische Einrichtungen, wie etwa ein ausfahrbarer Heckspoiler o.ä., verändert werden kann.
- Die Luftdichte ρ_L ist konstant.
- A entspricht der frontalen Querschnittsfläche des Fahrzeugs in Fahrtrichtung.
- Für $v_A(t)$ wird die Fahrzeuggeschwindigkeit in Fahrtrichtung eingesetzt.

4.3.2. Einflüsse durch die Rollreibung

Bei der Rollreibung wird ähnlich wie bei der Luftreibung die in der Literatur[SB13] zu findende Berechnungsvorschrift verwendet, bei der als fahrzeugspezifische Größen die Masse m und der Rollreibungskoeffizient c_{Roll} zum Einsatz kommen. Hierbei wird der Rollwiderstandsbeiwert als konstant angenommen, da der Einfluss des geschwindigkeitsabhängigen Anteils der Rollreibung im Vergleich zur Luftreibung zu vernachlässigen ist. Weiterhin wird die vorherrschende Gewichtskraft als konstant mit $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ angenommen. Als letzter Faktor geht in Gl. (4.2) die Steigung der Straße über die

trigonometrische Kosinusfunktion ein, da die Rollreibung in Bezug auf die vorherrschende Gewichtskraft definiert ist.

$$F_{Ro}(t) = c_{Roll} \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta(t) \quad (4.2)$$

4.3.3. Aufzubringende Kraft zur Beschleunigung

Bei der Beschleunigung des Fahrzeuges wirkt die Trägheitskraft der Massen entgegen der Beschleunigungsrichtung. Dafür muss ebenfalls Energie aufgewendet werden, welche nur auftritt, wenn das Fahrzeug seine Geschwindigkeit ändert. Diese kann sowohl positiv als auch negativ ausfallen. Positives Vorzeichen beschreibt den Fall, dass das Fahrzeug an Geschwindigkeit zunimmt, wohingegen bei Verzögerung diese Kraft negativ definiert wird. Das negative Vorzeichen entsteht dadurch, dass diese Energie bereits in Form von kinetischer Energie dem Antrieb zur Verfügung steht. Dieser Anteil kann daher anderen Kräften wie etwa der Luft- und Rollreibung entgegengestellt werden. Besteht anschließend weiterhin eine negative Kräftebilanz, lässt sich bei entsprechenden Fahrzeugen, meist Elektro- oder Hybridfahrzeuge, einen Teil der daraus gewonnenen Energie zurückzuspeichern (Rekuperation). Beeinflusst wird diese Kraft durch die effektive Masse und die Geschwindigkeitsänderung, somit also durch die Beschleunigung.

$$F_B(t) = m \cdot \frac{dv(t)}{dt} = m \cdot a(t) \quad (4.3)$$

Weiterhin müssen bei der Beschleunigung auch die Trägheitsmomente rotierender Teile im Motor und Antriebsstrang, wie Antriebswellen und Räder, beachtet werden. Da diese im Vergleich zu der translatorisch beschleunigten Masse nur etwa zwei Prozent beeinflussen, wird im Fortgang dieser Arbeit auf deren genaue Betrachtung verzichtet, was zu Gl. (4.3) führt. Gegenüber der vorangegangenen Widerständen durch Luft- und Rollreibung geht in diesem Fall die umgesetzte Energie nicht direkt für den weiteren Antrieb in der Umgebung verloren, sondern steckt weiterhin in Form von kinetischer Energie im Fahrzeugsystem und kann gegebenenfalls teilweise zurückgewonnen werden. Erst der aktive Verzögerungsvorgang eines Fahrzeugs gibt die Energie nicht weiter nutzbar an die Umgebung ab.

4.3.4. Einfluss der Streckensteigung

Bei der Überwindung von Steigungen wirkt ein Teil der Gewichtskraft dem Fahrzeug entgegen. Diese wird positiv, wenn das Fahrzeug aufsteigt, und negativ, wenn es an Höhe verliert. Die Kraft zur Steigungsüberwindung hängt von der Masse m des Fahrzeugs, der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ und der Steigung β ab. Vergleichbar mit der Beschleunigung wird zur Überwindung der Steigung zunächst Energie aus dem Antrieb benötigt, bleibt letztlich jedoch dem System Fahrzeug in Form von potentieller Energie erhalten. Auf gleiche Weise, wie bei der kinetischen Energie, kann die potentielle Energie partiell durch Rekuperation zurückgewonnen werden oder dazu beitragen, dass bei Fahrten mit negativer Steigung der Energiebedarf für Roll- und Luftreibung teilweise oder sogar gänzlich gedeckt wird. Dies dazu führt, dass in diesem Fall keine zusätzliche Energie aus dem Energiespeicher (Kraftstoff oder elektrische Energie) benötigt wird.

$$F_{St}(t) = m \cdot g \cdot \sin \beta(t) \quad (4.4)$$

4.3.5. Hilfskraft Bremswiderstand

Die Kraft bezüglich des Bremswiderstands F_{Br} ergibt sich nicht direkt aus der Fahrbewegung selbst, sondern wird aktiv vom Fahrer vorgegeben. Es wäre destruktiv, eine Bremskraft zu erzeugen, die größer ist als die negative Summe aller anderen Kräfte zusammen, da dieses bedeuten würde, dass der Fahrer ohne Nutzen für die Fortbewegung den Energiebedarf zusätzlich erhöht. Diese Kraft ist hierbei also nur eine Hilfskraft, die zur anschaulichen und formalen Darstellung in Gl. (4.6) benötigt wird.

4.3.6. Leistungs- und Energieberechnung

Aus der Summe aller beschriebenen Kräfte multipliziert mit der Momentangeschwindigkeit errechnet sich zu jedem Zeitpunkt die aktuell benötigte Leistung $P(t)$, um die gewünschte Bewegung auszuführen. Weiterhin lässt sich diese durch einen Wirkungsgrad η , der geschwindigkeitsunabhängig in die Berechnung einfließt, für die Verluste im gesamten Antriebsstrang dividieren

(Gl. (4.5)), was die erforderliche Leistung am Motor P_{Motor} ergibt. Daraus resultiert die Gl. (4.6) mit

$$\eta = \eta_M \cdot \eta_{Prozess} \cdot \dots = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (4.5)$$

zu

$$P_{Motor}(t) = \frac{1}{\eta} \cdot [F_L(t) + F_{Ro}(t) + F_B(t) + F_{St}(t) + F_{Br}(t)] \cdot v(t) \quad (4.6)$$

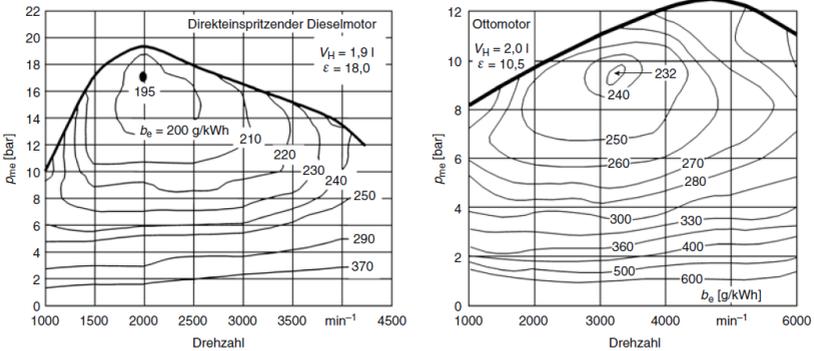


Abbildung 4.3.: Verbrauchskennfeld typischer Pkw-Motoren [SB13]

Zur Ermittlung des momentanen Kraftstoffverbrauchs $B_m(t)$ (Gl. (4.7)) ist die Multiplikation mit dem spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e erforderlich [SB13], welcher jedoch stark motorabhängig ist [Sie13]. Dabei spielen der verwendete Kraftstofftyp, die Einspritztechnologie, die Geometrie und viele weitere Faktoren bei der Auslegung einer Verbrennungskraftmaschine eine entscheidende Rolle. Die Angabe dieser spezifischen Größe findet in der Regel durch s.g. Verbrauchskennfelder statt, wie sie in Abb. 4.3 dargestellt sind. Auf der x-Achse der Kennfelder ist die Drehzahl und auf der y-Achse der Kompressionsdruck p_{me} aufgetragen, wodurch die Abhängigkeit von Geschwindigkeit, verwendeter Übersetzung und benötigter Leistung erkennbar ist. Wird der spezifische Kraftstoffverbrauch b_e als ein konstanter Wert angegeben, gilt dieser

für einen bestimmten Motor und nimmt Bezug auf den Bestwert des Kennfeldes. Aus Gl. (4.6) und der Angabe des spezifischen Kraftstoffverbrauchs lässt sich nun der momentane Kraftstoffverbrauch errechnen, wie in Gl. (4.7) zu sehen ist.

$$B_m(t) = P_{Motor}(t) \cdot b_e \quad (4.7)$$

4.4. Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Unterkapitel wird auf den Stand der Wissenschaft und Technik besonders in Bezug auf die Energieeffizienz von Straßenfahrzeugen eingegangen. Dabei werden von baulichen Veränderungen, wie z.B. Änderungen am Antriebsmotor, Anpassungen an der Aerodynamik oder Optimierungen des Rollwiderstandes der Reifen etc., abgesehen und lediglich diejenigen Maßnahmen betrachtet, die durch intelligente Nutzung von Informationen über das Fahrzeugumfeld den Energiebedarf senken können. Diese werden jeweils in einem eigenen Abschnitt erläutert und anschließend gegenüber der vorliegenden Arbeit abgegrenzt.

4.4.1. Zwei-Ebenen Ansatz eines vorausschauenden Cruise Control

Bauer und Gauterin stellen in ihrem SAE¹ Artikel einen Ansatz für einen vorausschauenden optimalen Abstandsregelassistenten vor, welcher auf zwei getrennten Ebenen arbeitet. Die Aufteilung hat zum Ziel, die sicherheitskritischen Funktionen mit Echtzeitanforderungen von den funktional aufwendigeren vorausschauenden Anteilen zu entkoppeln. Somit beinhaltet die untere Ebene den grundlegenden Abstandsregelalgorithmus, welcher mit hoher Präzision und der dafür notwendigen kurzen Zykluszeit ausgeführt wird. Die Reaktionszeit der übergeordneten Ebene kann deutlich geringer ausfallen und erlaubt damit aufwendigere Berechnungsaufgaben und Vorhersagen über den zukünftigen Verkehrsverlauf. Als Anwendung wird ein Modell-prediktiver Regler beschrieben, der aus einem Strategieplaner mit geringer Wiederholrate

¹ Society of Automotive Engineers (SAE)

und einem mit hoher Wiederholungsrate ausgeführten Stabilisierungsplaner besteht. [BG16]

4.4.2. EDSS - Eco-Driving Support System

Nach Hiraoka et al. [HNK11] ist der Energiebedarf maßgeblich vom Fahrverhalten des Fahrers selbst abhängig. Um den Fahrer zu motivieren energieeffizient zu fahren, haben Hiraoka et al. ein prototypisches Fahrerassistenzsystem entwickelt, welches den Fahrer visuell unterstützen soll. Zur Instrumententafel wurde eine Anzeige hinzugefügt (vgl. Abb. 4.4), die dem Fahrer die aktuelle Energieeffizienz - ähnlich einer Momentanverbrauchsanzeige - in Balkendarstellung und eine Energieeffizienzhistorie anzeigt.

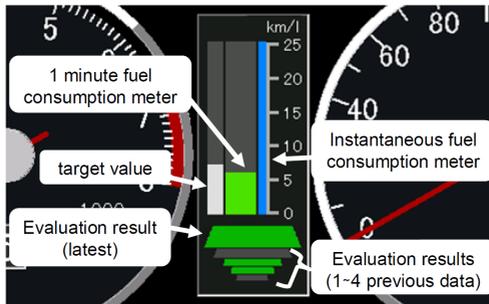


Abbildung 4.4.: Anzeige des EDSS [HNK11]

Die Berechnung zur Anzeige findet über einen Zeitbereich von einer Minute diskretisiert statt und bezieht als Größe nur den aktuellen Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu historischen Ein-Minuten-Werten ein. Es wird demzufolge aus einer gespeicherten Historie ein Zielwert errechnet und mit dem aktuellen Wert verglichen. Wird der Zielwert im aktuellen Ein-Minuten-Intervall unterschritten, ist das Effizienzziel erreicht und taucht mit einer grün leuchtenden Visualisierung in der Historie auf. Andernfalls erscheint kein Licht.

4.4.3. Eco-ACC für Elektro und Hybridfahrzeuge

Das von der Robert Bosch GmbH² prototypisch entwickelte Eco-ACC richtet sich speziell an Fahrzeuge mit einem elektrischen Antrieb, wodurch die Möglichkeit der Energierückgewinnung durch Rekuperation besteht. Dies umfasst sowohl rein Batterieelektrische Fahrzeuge als auch hybride Antriebsarten, die einen Elektromotor besitzen. Bei diesem speziellen Ansatz wird gezielt auf die Annäherungsfahrt an ein vorausfahrendes Fahrzeug eingegangen. Es findet nicht wie bei einem *Standard-ACC* eine zügige Annäherung und anschließend eine schnelle Reduzierung der Geschwindigkeit auf das vorausfahrende Fahrzeug statt, sondern es wird frühzeitig in einen Segelbetrieb³ gewechselt. Dabei wird auf die beiden Zielgrößen Zeit und Energiebedarf eingegangen und diese mithilfe der dynamischen Programmierung optimiert. Laut den Autoren sollen Einsparungen von bis zu 25% möglich sein, abhängig von der Differenzgeschwindigkeit und der Vorausschauweite des ACC-Sensors. [Fle+14]

4.4.4. ECC - Economic Cruise Control

Unter dem Namen Economic Cruise Control hat die Firma IAV GmbH⁴ einen Ansatz mit seriennahen und Serien-Sensoren vorgestellt, welcher ebenfalls eine Erweiterung eines Standard-ACCs in Richtung Energieoptimierung darstellt. Das adressierte Szenario (vgl. Abb. 4.5) bezieht sich auf eine mehrspurige Straße ohne Gegenverkehr, so dass ein Spurwechsel zum Überholen durchgeführt werden kann, solange sich dort auf gleicher Höhe oder knapp dahinter kein anderes Fahrzeug befindet.

Die funktionale Erweiterung ist dadurch gegeben, dass zusätzlich zu den beiden bestehenden Systemzuständen (Geschwindigkeitsregelung und Abstandsregelung) die Funktion Spurwechsel (C) hinzukommt. Ebenfalls wird bei den bestehenden Zuständen in Längsrichtung (A) die Spurhalten-Funktion

² <http://www.bosch.com> (abgerufen am 15.11.2016)

³ Der Segelbetrieb eines Fahrzeuges beschreibt den Zustand, in dem das Fahrzeug rollt und nicht aktiv durch z.B. eine Schubabschaltung des Verbrennungsmotors oder Rekuperation eines Elektroantriebs verzögert wird.

⁴ <https://www.iav.com> (abgerufen am 15.11.2016)

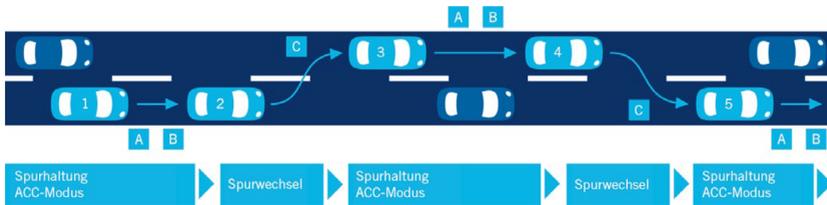


Abbildung 4.5.: Durch ECC abgedeckte Szenarien A-C [SS15]

(B) in Querrichtung aktiviert, so dass insgesamt eine Längs- und Querregelung des Fahrzeugs im aktivierten ECC-Modus stattfindet. [SS15]

4.4.5. Porsche ACC Innodrive

Unter dem Titel ACC Innodrive hat Porsche⁵ ein Innovation vorgestellt, das die Funktionalität eines Standard-ACCs in Richtung Energieeffizienz erweitert. Im Vergleich zu baulichen Maßnahmen an Aerodynamik und Motor ermöglicht das System, durch eine automatisierte strategische Längsregelung das Fahrzeug in puncto Energieeffizienz zu optimieren. Mit Hilfe von Sensorik und digitalen Straßenkarten kennt das Fahrzeug die bevorstehende Strecke und ermöglicht es damit, eine optimale Längsbewegung zu präzisieren. Durch die Kenntnis von Geschwindigkeitslimits, Kurvenradien und Steigungen wird eine energieoptimierte Beschleunigung bzw. Verzögerung errechnet, welche in den optimalen Fahrmodus und die entsprechende Wahl des Ganges überführt wird. Laut den Angaben des Herstellers soll damit bei alltäglicher Fahrweise eine Reduzierung des Kraftstoffbedarfs um zehn Prozent im Mittel möglich werden. [Mar+12; Mar13]

4.4.6. Der „Wirkungsgrad“ des Fahrzeugs

Arning et al. vom Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) haben eine *Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl* entwickelt, die

⁵ <http://www.porsche.com> (abgerufen am 15.11.2016)

sich an den Motorwirkungsgrad anlehnt. Diese Kennzahl soll als Energie-Vergleichsgröße von verschiedenen Fahrzeugen anhand deren Transportgewicht dienen und somit einen antriebsunabhängigen Vergleich zulassen. Dabei verwenden die Autoren den Quotienten aus Zuladungsenergiebedarf und Gesamtfahrzeugenergiebedarf. Diese Beziehung erlaubt es nun eine energetische Beurteilung durchzuführen, welches Transportmittel für welches Transportgut am geeignetsten ist.

Einfluss auf den Energiebedarf des Gesamtfahrzeugs nehmen die Rollreibung, die Luftreibung, die Energie zur Beschleunigung des Fahrzeugs und die Energie zur Überwindung von Steigungen. Der Zuladungsenergiebedarf wird lediglich aus der Beschleunigung der zusätzlichen Masse (Zuladung) errechnet. Einflüsse in Bezug auf den Rollwiderstand und die Energie zur Überwindung von Steigungen, welche ebenfalls von der Masse abhängen, werden nicht berücksichtigt. [AMW07]

4.4.7. Test- / Fahrzyklen

Ein entscheidendes Differenzierungsmerkmal von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine (VKM) ist der Kraftstoffverbrauch bzw. bei Elektrofahrzeugen die Reichweite pro Akkumulatorladung. Da der Verbrauch allerdings von einer Vielzahl unterschiedlicher Eigenschaften wie der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung abhängt (vgl. dazu Abschn. 4.3), wurden normierte Fahrzyklen eingeführt, welche ein festgelegtes Fahrprofil vorgeben und dadurch eine Vergleichbarkeit schaffen. In Europa existiert seit 1991 der *Neue europäische Fahrzyklus* (NEFZ) als Grundlage für die Messung des Energiebedarfs. Er ist für die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und die Messung von Abgaswerten von PKWs gesetzlich vorgeschrieben [EG91]. Ähnlich zum europäischen Fahrzyklus entstanden auf anderen Kontinenten weitere Messzyklen.

Neuer europäischer Fahrzyklus

Der *Neue europäische Fahrzyklus* NEFZ erlaubt eine Vergleichbarkeit von Fahrzeugen untereinander, bietet allerdings den Fahrzeugherstellern gleichzeitig

viel Spielraum zur speziellen Optimierung auf diesen Zyklus (z.B. rollwiederstandsreduzierte Reifen, Deaktivierung von Nebenaggregaten, Entkopplung der Lichtmaschine etc.). Dadurch entstehen jedoch starke Diskrepanzen im Kraftstoffverbrauch zwischen Zyklus und Alltagswerten. Für die Beschleunigungsphasen stehen jeweils sehr lange Zeitfenster zur Verfügung (25 Sekunden für die Beschleunigung von 0 km/h auf 50 km/h) und Geschwindigkeiten werden nur bis 120 km/h berücksichtigt. Höhere Geschwindigkeiten mit einem stärkerem Einfluss der Luftreibung bleiben unbeachtet. [EG70; EG91]

Federal Test Procedure

Parallel zum NEFZ hat sich in den USA die *Federal Test Procedure (FTP)* mit ihren Spezialisierungen (SFTP US06, SFTP SC03, etc.) entwickelt, welche ebenfalls ein Fahrprofil vorgeben, das zur Ermittlung von Verbrauchs- und Abgaswerten herangezogen wird. Inzwischen wird an einer Internationalisierung der Testprozedur gearbeitet, welche unter der Bezeichnung *Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)* zu finden ist. Diese soll viele der gesammelten Erkenntnisse aus den verschiedenen Testprozeduren und -zyklen beinhalten und mehrere Fahrprofile abhängig von der Höchstgeschwindigkeit des zu untersuchenden Fahrzeugs bieten. [Bar+09]

Real Driving Emissions

Derart strikte Vorgaben der einzuhaltenden Messzyklen und zunehmende gesetzliche Rahmenbedingungen hinsichtlich erlaubter Schadstoffausstöße veranlassen jedoch die Fahrzeughersteller dazu im Rahmen ihrer Möglichkeiten (spezielle reibungsarme Reifen, ausgeschaltete elektrische Verbraucher, etc.), teils auch mit undurchsichtigen Mitteln, die Verbrauchsangaben und Abgaswerte zu beschönigen (vgl. Abgasaffäre bei Volkswagen⁶). Um dem entgegen zu wirken, wurde mit einer europäischen Verordnung zur Beschreibung der zukünftigen Prozedur zur Typengenehmigung der Real Driving Emissions (RDE) eingeführt [Kom17].

⁶ http://www.spiegel.de/thema/abgasaffaere_bei_volkswagen/ (abgerufen am 28.12.2016)

Mit dem RDE soll der Unterschied zwischen den auf dem Prüfstand gemessenen Werten und der Realität verringert werden, indem mit mobilen Abgasmessanlagen die Schadstoffmengen bei realen und zufälligen Fahrten gemessen werden. Damit soll auch verhindert werden, dass z.B. spezifische Steuerungen einen Messzyklus erkennen und die Verbrennung sowie den Schadstoffausstoß nur im erkannten Messzyklus optimal einstellen. Die Fahrzeuge sollen damit anwendungstypisch und nicht zyklenspezifisch bewegt und bemessen werden.

4.4.8. Abgrenzung der eigenen Arbeit

Die Recherche zum Thema Energieeffizienzbestimmung und -optimierung durch intelligente Fahrerassistenzsysteme oder Regelungen in Kraftfahrzeugen hat gezeigt, dass bereits mehrere Ansätze existieren, die den Fahrer dabei unterstützen sich energieeffizient zu verhalten [Hnk11], oder bereits die Aufgabe der Effizienzoptimierung komplett übernehmen [Mar+12; Fle+14; SS15]. Ein Teil der vorgestellten Assistenzsysteme ist bereits in Serienfahrzeugen zu erwerben; ein anderer Teil existiert bisher als prototypischer Technologieträger. Sämtliche Ansätze, sowohl die Systeme zur Energieeinsparung, als auch die Messzyklen und Kennzahlen, haben alle das Ziel, den eigenen Energiebedarf des Ego-Fahrzeugs ohne Rücksicht auf ihre Umwelt zu reduzieren.

Aus technischer Sicht wird allerdings die Fahraufgabe, gerade im Zuge der zunehmenden Automatisierung, immer mehr zu einer vernetzten Aufgabe. Die Kenntnis über und die Rücksichtnahme auf das sich ständig ändernde Fahrzeugumfeld, zu welchem nicht nur die statische Strecke, sondern besonders auch die dynamischen Verkehrsteilnehmer zählen, ist eine entscheidende Aufgabe nicht zuletzt in Hinblick auf Energieeinsparungen. Um eine kollektive Optimierung der Energieeffizienz realisieren zu können, müssen Interaktionen und Beziehungen zwischen den Fahrzeugen bei der Entwicklung und Evaluation neuer interagierender Fahrfunktionen ganz bewusst einbezogen werden.

Aus diesen Gründen wird in erster Linie eine Energieeffizienz-Bewertungsmetrik benötigt, welche eine Optimierung über alle Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld (s. Abschn. 3.4) erlaubt. Diese Metrik muss den Energiebedarf anderer Verkehrsteilnehmer einbeziehen. Es wird somit möglich, dass sich ein einzelnes Fahrzeug kurzfristig nicht in seinem Optimum bewegt, wenn in

der Summe, d.h. über alle Fahrzeuge hinweg, eine Einsparung erreicht wird. Eine derartige Metrik im Sinne einer vernetzten Energieeffizienz (*Connected Efficiency*) bezieht sich nicht weiter auf ein einzelnes Fahrzeug, sondern sie bewertet kollektiv das taktische Verhalten der Verkehrsteilnehmer innerhalb eines Verkehrsszenarios.

4.5. Connected Efficiency (CE) Energiebedarfsmodell

Auf der Grundlage des Energiebedarfsmodells aus Abschn. 4.3 wird in diesem Kapitel ein analytisches Energiebedarfsmodell für Kraftfahrzeuge abgeleitet, welches allgemeingültig für die weitergehenden Untersuchungen und Methoden verwendet werden kann. Dabei liegt der Fokus weniger auf der Exaktheit der Energiebedarfsermittlung als auf der Breite des Einsatzgebietes und der damit verbundenen Vergleichbarkeit verschieden angetriebener Fahrzeuge. Es ist für das weitere Vorgehen essentiell, dass aktuelle Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebsarten und verschiedenen Größen/Massen relativ zueinander betrachtet werden können, ohne dabei die Nachteile der Fahrzyklen (Verbrauchswert absolut, eingeschränkte Vergleichbarkeit zwischen elektrisch- und kraftstoffbetriebenen Antrieben, keine Beachtung von taktischen Entscheidungen etc.) hinnehmen zu müssen. Daher wird im weiteren Verlauf für eine allgemeingültige Betrachtung die benötigte Energie losgelöst von Antriebsart und Wirkungsgrad der Antriebsmaschine betrachtet. Die verwendete Schnittstelle ist der Übergang in mechanische Energie. Ob die ursprüngliche Energieform chemisch, elektrisch oder in einer anderen Art vorliegt, muss somit nicht weiter ausgeführt werden, da dieses keine Differenzierung der betrachteten Energiemenge darstellt. Lediglich als Vergleichsgröße wird an einigen Stellen der Kraftstoffverbrauch beispielhaft angeführt.

Die erforderliche Energie ergibt sich aus dem zeitlichen Integral über der Leistung, die der Motor bereitstellen muss. Wird die benötigte Leistung aus Gl. (4.6) negativ, was einem Energiefluss zurück in den Motor entsprechen würde, so wird diese rechnerisch auf Null begrenzt. Dies hat den Hintergrund, dass je nach Antriebsart keine Energie zurückgewonnen werden kann. In der Realität wird im Schubbetrieb bei Fahrzeugen mit elektrischer Antriebskomponente im generatorischen Betrieb die negative Leistung aufgenommen und in elektrische

Energie zurück gewandelt. Bei der Verbrennungskraftmaschine kann bis zum maximalen Motorschleppmoment⁷ ebenfalls negative Leistung aufgenommen werden, wodurch die konventionellen Bremsen entlastet werden. Alles andere muss durch die Bremskraft F_{Br} in Gl. (4.6) bereits begrenzt sein.

Im Unterschied zu einem Normzyklus wie dem NEFZ oder FTP sollen zudem ausgehend vom gleichen Basisszenario Aussagen über unterschiedliche Reaktionen getroffen werden können. Dies bedeutet, dass simulativ eine vordefinierte Ausgangssituation (festgelegte Konstellation mehrerer Fahrzeuge zueinander) mit gleichen Anfangsbedingungen wie z.B. gleichen Anfangsgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Endsituationen analysiert und bewertet werden kann. Da i.d.R. verschiedene Endsituationen zu erwarten sind, weichen ggf. auch die Anfangs- und Endgeschwindigkeit sowie die absolute Höhe zu Beginn und am Ende voneinander ab. Im Vergleich dazu ist bei den erwähnten Normzyklen keine Steigung vorgesehen. Weiterhin sind Anfangs- und Endgeschwindigkeit identisch und gleich null. Um diese Energiebilanz für kinetische (E_{kin}) und potenzielle (E_{pot}) Energie zu berücksichtigen, werden jeweils die Differenzen zwischen Ende (E_{ende}) und Anfang (E_{beginn}) von der resultierenden Energie subtrahiert [Hen15; Str16]. Formal ist dies in Gl. (4.8) mathematisch dargestellt, wobei t_{beginn} den Startzeitpunkt des betrachteten Szenarios, und t_{ende} den Endzeitpunkt bezeichnen.

$$\begin{aligned} E_{bilanziert} &= \int_{t_{beginn}}^{t_{ende}} P_{Motor}(t) dt + E_{beginn} - E_{ende} \\ &= E_{Motor} + E_{beginn} - E_{ende} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$E_{beginn} = E_{pot,beginn} + E_{kin,beginn} \quad (4.9)$$

$$E_{ende} = E_{pot,ende} + E_{kin,ende} \quad (4.10)$$

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (4.11)$$

⁷ Das maximale Moment, das der Motor im Schleppbetrieb aufweist.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (4.12)$$

Die Abb. 4.6 zeigt qualitativ die mathematisch beschriebenen Energieflüsse grafisch in Form eines Sankey-Diagramms. Im dargestellten Fall ist die potentielle Energie zu Beginn größer als am Ende des Szenarios. Das Fahrzeug wird im Verlauf des Szenarios schneller und besitzt somit am Ende (E_{ende}) mehr kinetische Energie als zu Beginn (E_{beginn}). Bei einer Betrachtung der reinen Energie aus dem Motor (E_{Motor}) ohne eine Bilanzierung der im System *Fahrzeug* verfügbaren mechanischen Energien (Gl. (4.9) und Gl. (4.10)) würde hier auch der Anteil, der das Fahrzeug schneller werden lässt, in den Vergleich einfließen. Es wären somit nur Vergleiche von Szenarien, welche die gleichen Anfangs- und Endbedingungen besitzen, möglich. Dementgegen soll mit der Bilanzierung ein Vergleich mit einem Szenario, das z.B. am Ende mehr potentielle und weniger kinetische Energie oder insgesamt weniger mechanische Energie zu Beginn besitzt, möglich sein.

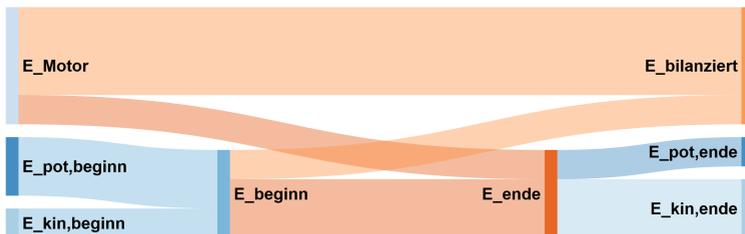


Abbildung 4.6.: Energieflüsse eines Pkws zur Berechnung der CE

Im konkreten Fall heißt das, dass bei der Betrachtung eines Überholvorgangs auf einer dreispurigen Straße (vgl. Beispiel aus Abb. 7.7) der Vergleich zwischen einem Abbremsmanöver und einem Spurwechselmanöver ermöglicht wird, bei denen am Ende z.B. die Geschwindigkeiten oder Abstände verschieden sind.

4.5.1. Zusammenfassung der Modelleigenschaften

Das in diesem Kapitel erläuterte Energiebedarfsmodell kommt nur innerhalb der in Kap. 3 erläuterten Systemgrenzen zum Einsatz. Dies bedeutet, dass Entscheidungen und Reaktionen ausschließlich auf taktischer Ebene (vgl. Abschn. 2.2.3) stattfinden und keine langfristige Planung auf strategischer Ebene berücksichtigt wird. Aus diesem Grund basiert das eingesetzte Energiebedarfsmodell auf den im Stand der Technik zu findenden Gleichungen (Abschn. 4.3) und damit auf folgenden Eigenschaften:

- Aerodynamische Eigenschaften
 - Luftwiderstandsberechnung nur über frontale Anströmung
 - Witterungsbedingungen (Wind, Regen, Schnee, etc.) bleiben unberücksichtigt
 - Keine Strömungseffekte durch vorausfahrende Fahrzeuge
- Rollreibungstechnische Eigenschaften
 - Verwendung eines konstanten Rollwiderstandsbeiwert
 - Gleicher Rollwiderstandsbeiwert für alle Fahrzeuge
- Longitudinale Eigenschaften
 - Keine Trägheitsmomente rotierender Teile
- Verwendung einer konstanten Erdbeschleunigung
- Einsatz eines konstanten Wirkungsgrads für den gesamten Antriebstrang (ohne Differenzierung bzgl. Einzelkomponenten)
- Keine Berücksichtigung von Nebenverbrauchern wie Klimatisierung, Unterhaltung etc.
- Rekuperation ist nicht modelliert
- Keine Verluste durch querdynamisches Verhalten
- Verbrauchsabschätzung findet über konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauch statt

Die darin enthaltenen Vereinfachungen wurden derart gewählt, dass sie dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik entsprechen, dabei aber keine Einschränkungen in Bezug auf die zu untersuchenden Forschungsfragen (vgl. Abschn. 1.2) darstellen. Für die konstant angenommenen Größen, wie etwa für den Rollwiderstandsbeiwert oder die Erdbeschleunigung, haben rechnerische Vergleiche gezeigt, dass eine Veränderung dieser Werte in ihrem sehr kleinen Wertebereich lediglich einen marginalen Einfluss (zwei oder

mehr Größenordnungen kleiner) auf den Effizienzwert besitzen und dieser vernachlässigbar gering ausfällt.

4.5.2. Die Energienormierung und taktische Energieeffizienz

Bevor die Connected Efficiency mit Bezug auf das gesamte taktische Fahrzeugumfeld nach der Definition in Abschn. 3.4 als *connected* betrachtet werden kann, muss eine Metrik für die Betrachtung der Energieeffizienz eines einzelnen Fahrzeugs entwickelt werden, welche es erlaubt, das Fahrverhalten in Bezug auf taktische Entscheidungen (egal ob diese durch einen menschlichen Fahrer oder automatisiert durchgeführt werden) zu bewerten und vergleichbar zu machen. Als Randbedingungen werden kurze Szenarien mit definierten Anfangs- und Endbedingungen festgelegt. Sowohl die Anfangs- als auch Endbedingungen können anschließend durch Variation des grundlegenden Szenarios verändert werden. Der Beginn wird in jeder Variante fest vorgegeben und stellt die Ausgangssituation dar. Wohingegen das Ende auf unterschiedliche Weise festgelegt werden kann. Entweder wird es basierend auf der zurückgelegten Strecke oder der benötigten Zeit definiert. Je nach Festlegung kann die jeweils andere Größe bei einer Variation des Szenarios am Ende unterschiedlich sein, da die Bewegungen der beteiligten Fahrzeuge i.d.R. voneinander abweichen. Auf Grund dessen ist die Dauer oder Strecke nicht fest für das betrachtete Fahrzeug in den unterschiedlichen Varianten eines Szenarios vorgegeben. Diese Tatsache zeigt auch den größten Unterschied zu den bisher bestehenden Energiebetrachtungen für Fahrzeuge. Die Angaben sind für gewöhnlich in Verbrauch pro Strecke, z.B. Liter pro 100km, oder zurückgelegte Strecke bezogen auf einen gewissen Verbrauch, wie etwa Meilen pro Gallone, angegeben (vgl. Abschn. 4.2.2). Die neu eingeführte Definition erlaubt eine Aussage relativ zur zurückgelegten Strecke und der dafür benötigten Zeit. Dies führt dazu, dass nicht automatisch ein Fahrzeug, welches mit sehr geringer Geschwindigkeit fährt, auch besser bewertet wird. Es wird stets dem Transportwunsch/-auftrag nachgekommen, die gewünschte Strecke in einer akzeptablen (nicht unendlichen) Zeit zurückzulegen und daher nicht auf das Ergebnis einer sehr geringen (z.B. 1km/h) Geschwindigkeit zu optimieren.

Die erläuterten Anforderungen führen zu einer Normierung, welche darauf beruht, dass der mittlere Energiebedarf (E_{norm}) ins Verhältnis zum bilanzierten Energiebedarf ($E_{bilanziert}$) gesetzt wird (vgl. Gl. (4.13)). Hierbei ist der analytische (mittlere) Energiebedarf derjenige, der benötigt werden würde, wenn das Fahrzeug gleichförmig (d.h. ohne Geschwindigkeitsänderung) und in der gleichen, tatsächlich benötigten Zeit vom Startpunkt zum Endpunkt führe. Es wird aus dem zurückgelegten Weg und der dafür benötigten Zeit eine mittlere Geschwindigkeit (Gl. (4.19)) ermittelt. Weiterhin wird aus der Höhendifferenz eine gleichmäßige, konstante mittlere Steigung zwischen Anfang und Ende bestimmt. Aus diesen mittleren Größen errechnen sich die mittleren Energiebedarfe für Luftreibung, Rollreibung und zur Überwindung der Steigung. Bilanziert mit kinetischer und potentieller Energie von Anfang und Ende entsteht daraus eine hypothetische (analytische) Abschätzung, welche die Normierung darstellt. Dieser Quotient wird als *Single Efficiency* (SE) definiert und gibt (angelehnt an die Definition eines Wirkungsgrades mit Werten im Intervall $[0,1]$) an, wie nahe die tatsächlich benötigte Energie an die normierte herankommt [Hen15], und lässt damit eine Bewertung des Szenarios zu.

$$SE = \frac{E_{norm}}{E_{bilanziert}} \quad (4.13)$$

$$E_{norm} = \bar{P} \cdot t + E_{beginn} - E_{ende} \quad (4.14)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{\eta} \cdot [\bar{F}_L + \bar{F}_{Ro} + \bar{F}_{St}] \cdot \bar{v} \quad (4.15)$$

$$\bar{F}_L = \frac{\rho_L}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \bar{v}^2 \quad (4.16)$$

$$\bar{F}_{Ro} = c_{Roll} \cdot m \cdot g \cdot \cos \bar{\beta} \quad (4.17)$$

$$\overline{F_{St}} = m \cdot g \cdot \sin \overline{\beta} \quad (4.18)$$

$$\overline{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (4.19)$$

$$\overline{\beta} = \arcsin \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (4.20)$$

Mit Hilfe der eingeführten Normierung lässt sich eine Energieeffizienz für Fahrentscheidungen bestimmen. Nach dem bisherigen Stand der Technik findet eine Normierung entweder durch einen normierten Fahrzyklus (NEFZ) und somit in Bezug auf eine Strecke oder z.B. auf dem Fahrzeuggewicht und Luftwiderstand (vgl. Transporteffizienz [AMW07]) statt. Eine Bewertungsmöglichkeit von Fahrentscheidungen bleibt jedoch bisher unbeachtet. Es spielt keine Rolle, ob es sich dabei um eine Fahrentscheidung eines menschlichen Fahrers oder die einer autonomen Fahrfunktion handelt, was zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen wird.

Mithilfe der mittleren Geschwindigkeit \overline{v} und der mittleren Steigung $\overline{\beta}$ sowie den Gleichungen (4.1) bis (4.4) erhält man zur Berechnung der Energienormierung die Gleichungen für die mittleren Fahrwiderstände in Gl. (4.16) bis Gl. (4.18). Auf eine mittlere Bremskraft $\overline{F_{Br}}$ sowie eine mittlere Beschleunigung und ihre dazugehörige Kraft $\overline{F_B}$ kann in Gl. (4.15) auf Grund der Bewegung mit einer mittleren Geschwindigkeit verzichtet werden, bzw. diese ergeben sich definitionsgemäß zu null ($\overline{F_B} = \overline{F_{Br}} = 0$), da keine Geschwindigkeitsänderung stattfindet.

4.5.3. Energieeffizienz im taktischen Fahrzeugumfeld

Es lässt sich mit der Single Efficiency (SE) die Energieeffizienz eines einzelnen Fahrzeugs ermitteln. Da allerdings die Entscheidungen des Einzelnen immer von den anderen Verkehrsteilnehmer abhängen, wird ein fahrzeugübergreifender bzw. kollektiver Aspekt eingeführt. Dies bedeutet, dass alle

Fahrzeuge, die sich im taktischen Fahrzeugumfeld (vgl. Abschn. 3.4) eines einzelnen Fahrzeugs befinden, ebenfalls in die Bewertung eingehen müssen. Das Ziel ist somit, die Fahrentscheidungen einer aktuellen Situation analysieren und bewerten zu können, um darauf weitere kollektive Optimierungen anzuwenden. Diese Erkenntnisse sollen anschließend dazu verwendet werden, Fahrempfehlungen abzuleiten.

Daher werden sämtliche Fahrzeuge, die sich im taktischen Fahrzeugumfeld befinden, in die Energieeffizienz-Berechnungen einbezogen. Einerseits kann die Berücksichtigung darüber stattfinden, dass die SE eines jeden Fahrzeugs berechnet und am Ende aufsummiert wird. Das Ergebnis liegt allerdings nicht mehr zwischen null und eins, sondern hängt von der Anzahl der Fahrzeuge in der Umgebung ab. Es lässt sich durch eine Division durch die Anzahl der Fahrzeuge wieder auf den gewünschten Wertebereich zurückführen, um einem normierten Wirkungsgrad zu entsprechen. Dies ist zur Bewertung und für den Vergleich mit anderen Szenarien notwendig. Allerdings ergeben sich folgende Herausforderungen dabei:

- Erstens handelt es sich beim taktischen Fahrzeugumfeld um ein sehr dynamisches Umfeld. Das heißt, es ändert sich kontinuierlich, wobei Fahrzeuge, die sich momentan innerhalb des Umfelds befinden, dieses verlassen und wiederum andere, die sich zunächst außerhalb befinden, hineinfahren können. Weiterhin ist es abhängig von der Verkehrsdichte und der eigenen Geschwindigkeit, wie viele Verkehrsteilnehmer sich im taktischen Fahrzeugumfeld befinden können (vgl. Definition in Abschn. 3.4). Dennoch dürfen Fahrzeuge immer nur für den Zeitraum in die Betrachtungen einbezogen werden, während sie sich im besagten Umfeld befinden. Verlassen sie dieses und kehren nach kurzer Zeit zurück, werden sie wie ein vollkommen neues Fahrzeug behandelt.
- Zweitens entspricht eine einfache Aufsummierung und Division durch die Anzahl der Fahrzeuge nicht der tatsächlichen Energieeffizienz. Durch die separate Normierung für jedes Fahrzeug werden alle Fahrzeuge gleich behandelt, egal was der tatsächliche Energiebedarf ergibt. Dieser Ansatz bietet allerdings Vorteile bezüglich der Nutzerakzeptanz. Geht der Energiebedarf absolut in die Berechnungen ein, werden auf Grund der kinetischen Energie sehr schwere und sehr schnelle Fahrzeuge immer im Vorteil gegenüber leichten und langsameren Fahrzeugen sein. Hinsichtlich der verschiedenen Fahrzeugausprägungen ist somit eine Ge-

wichtung, welche zwar die energetischen Unterschiede berücksichtigt, aber diese in einem ausgewogenen Verhältnis, erforderlich.

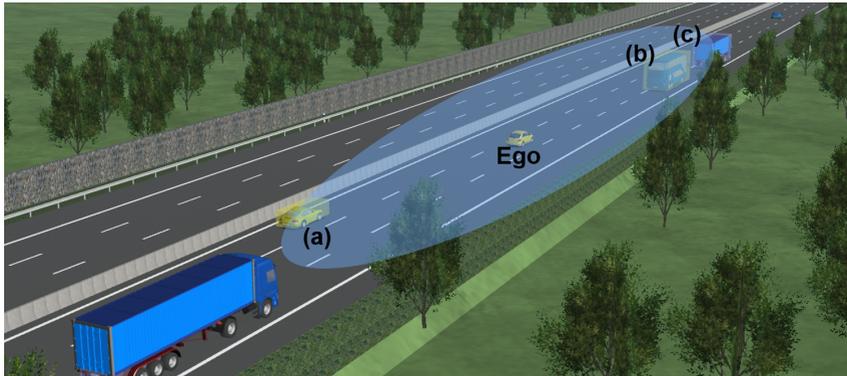


Abbildung 4.7.: Beispielszenario zur Connected Efficiency mit taktischem Fahrzeugumfeld

Mit Bezug auf das Beispielszenario aus Abb. 4.7 wird die entwickelte Metrik zur Energieeffizienzbestimmung angewandt. Dabei ist das gelbe Fahrzeug auf der mittleren Spur als Referenzfahrzeug (auch als Ego-Fahrzeug bezeichnet) zu sehen, in dessen taktischem Fahrzeugumfeld sich drei weitere Fahrzeuge befinden. Diese sind (a) der Sportwagen auf der linken Fahrspur, (b) der Reisebus und (c) der vorausfahrende Sattelzug auf der rechten Fahrspur. Der hintere LKW (links in der Abbildung zu sehen) ist auf Grund seiner Distanz zum Referenzfahrzeug nicht mehr Teil des taktischen Fahrzeugumfeldes des Ego-Fahrzeugs. Er kann allerdings Teil des taktischen Fahrzeugumfeldes eines anderen Fahrzeugs sein, wie etwa des gelben PKWs (a) auf der linken Fahrspur. Somit bildet jedes Fahrzeug zwar seine subjektive Sicht auf das Verkehrsgeschehen, jeweils mit einem eigenen taktischen Fahrzeugumfeld. Dieses ist allerdings nach der Definition aus Abschn. 3.4 so gewählt, dass die sich direkt beeinflussenden Fahrzeuge jeweils in dessen anderen Umfeld enthalten sind.

Eine Veränderung innerhalb des taktischen Fahrzeugumfeldes löst ggf. eine Aktion des Ego-Fahrzeugs aus, welche wiederum eine Veränderung im taktischen Fahrzeugumfeld eines anderen Fahrzeugs verursachen kann und somit

eine Reaktion dessen zur Folge hat. Da nicht davon auszugehen ist, dass alle Fahrzeuge ohne jegliche Übergangszeit mit einem derartigen Assistenten ausgestattet sein werden, entspricht diese Betrachtungsweise der Analogie zum menschlichen Fahrer (wenn beispielsweise ein Fahrzeug keinen Assistenten, wie er in dieser Ausarbeitung erläutert wird, besitzt), der ebenfalls *nur* auf Ereignisse in seinem Wahrnehmungshorizont reagieren kann.

4.5.4. Die *Connected Efficiency* Energieeffizienz-Metrik

Als *Connected Efficiency* wird das Konzept der vernetzten Energieeffizienz innerhalb des taktischen Fahrzeugumfelds bezeichnet. Sie stellt eine Quantifizierung dieser über einen betrachteten Zeitraum dar. Der Zeitraum kann einerseits durch ein vorgegebenes Szenario begrenzt sein, andererseits sich auf einen festen Zeitraum, der in die Vergangenheit reicht, beziehen. Der erste Fall liegt vor, wenn explizit ein Szenario wie z.B. das Szenario aus Abb. 4.7 analysiert und bewertet werden soll, was vorzugsweise in einer simulierten Umgebung stattfindet. Hierbei sind der Zeitpunkt, zu dem die Berechnung der *Connected Efficiency* beginnt, ebenso wie die Bedingungen (z.B. gleiche Geschwindigkeit, wie zu Beginn des Szenarios), die das Ende des Szenarios und somit auch der Berechnung kennzeichnen, festgelegt.

Im zweiten Fall kann die Quantifizierung ähnlich einer Momentan- und Durchschnittsverbrauchsanzeige verstanden werden. Dazu wird ein definierter Zeithorizont von z.B. 10 Sekunden festgelegt, welcher vom momentanen Zeitpunkt an, alle Werte in die Vergangenheit innerhalb dieses Zeitraums berücksichtigt. Diese Berechnung kann dazu verwendet werden, einem menschlichen Fahrer oder einer automatisierten Fahrfunktion (z.B. im Hinblick auf lernfähige Systeme) unmittelbar rückzumelden, wie energieeffizient seine Fahrweise im vergangenen Intervall gewesen ist. Dies bietet ein direktes, quantifizierbares Feedback über eine unmittelbar durchgeführte Entscheidung.

$$CE_{\text{Akzeptanz}}(t_{\text{beginn}}, t_{\text{ende}}) = \frac{SE_{\text{ego}} + \sum_{n=1}^N SE_n}{N + 1} \quad (4.21)$$

$$CE_{Energie}(t_{beginn}, t_{ende}) = \frac{E_{norm,ego} + \sum_{n=1}^N E_{norm,n}}{E_{bilanziert,ego} + \sum_{n=1}^N E_{bilanzier,n}} \quad (4.22)$$

Die Quantifizierung ist in zwei Ausführungen in Gl. (4.21) und Gl. (4.22) zu finden. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert, gilt für $CE_{Energie}$ eine Berechnung, die die Fahrzeuge auf Basis des absoluten Energieumsatzes gewichtet. Wohingegen bei $CE_{Akzeptanz}$ alle Fahrzeuge gleich behandelt werden, um damit z.B. LKWs nicht auf Grund ihrer hohen Masse zu bevorteilen, was ggf. für eine breitere Nutzerakzeptanz aus Sicht der PKWs spricht. Einem 40 Tonnen schweren LKW reicht bereits ein Geschwindigkeitsüberschuss von $7km/h$ zu einem vorausfahrenden Fahrzeug aus, um einen Kleinwagen von $130km/h$ auf die Geschwindigkeit des LKWs ($90km/h$) auszubremsten⁸. Bei der Berechnung der CE befinden sich sowohl das Ego-Fahrzeug selbst als auch N weitere Verkehrsteilnehmer im taktischen Fahrzeugumfeld des Ego-Fahrzeugs. Es wird somit in Gl. (4.21) für $CE_{Akzeptanz}$ die Summe der SE nach Gl. (4.13) aller Fahrzeugs gebildet und durch die Anzahl aller Fahrzeuge geteilt ($N + 1$). Für die rein energetische Betrachtung wird die $CE_{Energie}$ nicht auf Basis der SE der jeweiligen Fahrzeuge, sondern durch eine Normierung über das gesamte taktische Fahrzeugumfeld durchgeführt. Dies geschieht in Gl. (4.22) durch die Aufsummierung der normierten Energien $E_{norm,*}$ aller Fahrzeuge inklusive des Ego-Fahrzeugs und einer anschließenden Division durch die bilanzierten Energien $E_{bilanzier,*}$ aller Fahrzeuge. Demzufolge sind die absoluten Energien bereits in der Gewichtung der Verkehrsteilnehmer untereinander enthalten.

Der Wert der CE ist im Intervall $[0,1]$ definiert. Wenn der CE -Wert gegen eins strebt, bedeutet dies, dass kein Fahrzeug im taktischen Fahrzeugumfeld von einem anderen in seiner Wunschbewegung gestört wird. Es muss folglich kein Fahrzeug wegen eines anderen bremsen oder beschleunigen. Geht der Wert wiederum gegen null, bedeutet dies, dass jedes Fahrzeug seine Bewegung an die Umstände der anderen Fahrzeuge anpassen muss und daher insgesamt eine energetisch ineffiziente Bewegung aller beteiligten Fahrzeuge vorliegt.

⁸ Vergleich kann mit einer Abschätzung rein über die kinetischen Energie: $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ nachvollzogen werden. $E_{LKW} = \frac{1}{2} \cdot 40000kg \cdot (1,95 \frac{m}{s})^2 = 76,1kW s$; $E_{PKW} = \frac{1}{2} \cdot 1000kg \cdot (11,1 \frac{m}{s})^2 = 61,6kW s$

4.6. Simulative Evaluation der *Connected Efficiency* mithilfe von Matlab Simulink

Die theoretischen Grundlagen zur *Connected Efficiency* aus Abschn. 4.5.4 konnten mithilfe von Matlab Simulink modellbasiert umgesetzt und in einem weiteren Schritt durch automatisierte Code-Generierung in *C++*-Quellcode überführt werden (Abb. 4.8 *generieren*). Dieser wurde anschließend zusammen mit dem Quellcode und den Objekt-Bibliotheken des Fahrdynamiksimulators IPG CarMaker (vgl. Abschn. 3.3.4) in einen eigenständigen, ausführbaren Simulationskern übersetzt (Abb. 4.8 *kompilieren* und *linken*), um die Simulationsausführung erheblich zu beschleunigen.

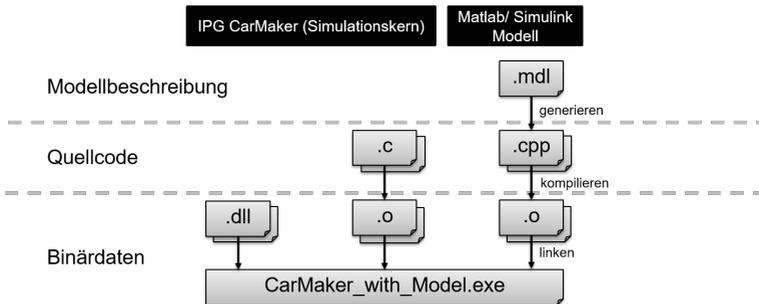


Abbildung 4.8.: Integration des Matlab Simulink Modells in den ausführbaren Simulationskern IPG CarMaker

Diese beiden Tools zur Realisierung wurden ausgewählt, da eine direkte Schnittstelle zwischen IPG CarMaker und Matlab Simulink existiert, welche es erlaubt, das Modell zur Berechnung der CE bereits ab dem Beginn der Entwicklungsphase direkt auszuführen und zu testen. Eine automatisierte Code-Generierung bietet im Anschluss den Vorteil, dass das selbst entwickelte Modell direkt in den Simulationskern des Tools CarMaker integriert werden kann. Dadurch wird eine deutliche Beschleunigung der Simulation gegenüber der Co-Simulation mit Matlab Simulink bewirkt. Der Geschwindigkeitszugewinn (Verkürzung der Simulationszeit auf Grund einer geringeren Rechenzeit) eines kompilierten und integrierten Modells gegenüber seiner simultanen

Ausführung innerhalb von Matlab Simulink entspricht dabei je nach Modellumfang in etwa dem Faktor vier bis fünf.

In Abb. 4.9 ist eine Gesamtübersicht der modellbasierten Simulink-Modellierung dargestellt. Diese beinhaltet auf der linken Seite sämtliche für die Berechnung der CE erforderlichen Variablen, welche zu jedem Simulationsschritt aus dem IPG CarMaker aktualisiert werden. Auf der rechten Seite sind diejenigen Variablen zu sehen, die nach jedem Berechnungsdurchlauf in den Simulator CarMaker zurückgeschrieben werden. In der Mitte befindet sich schließlich für jedes Verkehrsobjekt ein eigenes Berechnungsmodul zur Ermittlung der Single Efficiency nach Gl. (4.13), welches als Eingangsgrößen die Variablen aus Tabelle 4.1 und Konstanten (z.B. für die Luftdichte, den Rollwiderstandsbeiwert etc.) gemäß Tabelle 4.2 besitzt.

In dieser prototypischen Realisierung werden alle Verkehrsobjekte der Simulation berücksichtigt, da im Szenario lediglich die Objekte des taktischen Fahrzeugumfelds definiert werden. In Abb. 4.9 werden exemplarisch das Referenzfahrzeug (*EgoVehicle*) und zwei weitere Verkehrsobjekte (*TrafficObject01* und *TrafficObject02*) dargestellt. Werden weitere Berechnungsblöcke für zusätzliche Verkehrsobjekte benötigen, entsprechen diese bis auf die Benennung den beiden exemplarisch (*TrafficObject01* und *TrafficObject02* dargestellten). Weitere Fahrzeuge werden somit durch das Einfügen von *TrafficObject* Berechnungsblöcken in das Simulink Modell und das Verknüpfen mit den Summationsblöcken hinzugefügt werden. Auf Grund der statischen Strukturen des Simulink Modells lässt sich die Anzahl der Fahrzeuge nicht während der Laufzeit variieren.

Nicht alle benötigten Größen sind als Simulationsvariablen aus CarMaker verfügbar. Es gibt Größen, die sich i.d.R. auch während der Simulation nicht ändern und die nur in der Szenariobeschreibung eines Simulationslaufs festgelegt sind. Diese können mit einem Tcl⁹-Skript während des Starts eines Simulationslaufs automatisch in benutzerdefinierte Simulationsvariablen übertragen werden, so dass letztendlich ebenfalls aus Simulink heraus auf sie zugegriffen werden kann. In der vorliegenden Implementierung handelt es sich um die Variablen aus Tabelle 4.2, welche zur Berechnung der Single Efficiency nach Gl. (4.13) und deren Hilfsgrößen nach Gl. (4.6) erforderlich sind.

⁹ Skriptsprache: Tool command language (Tcl)

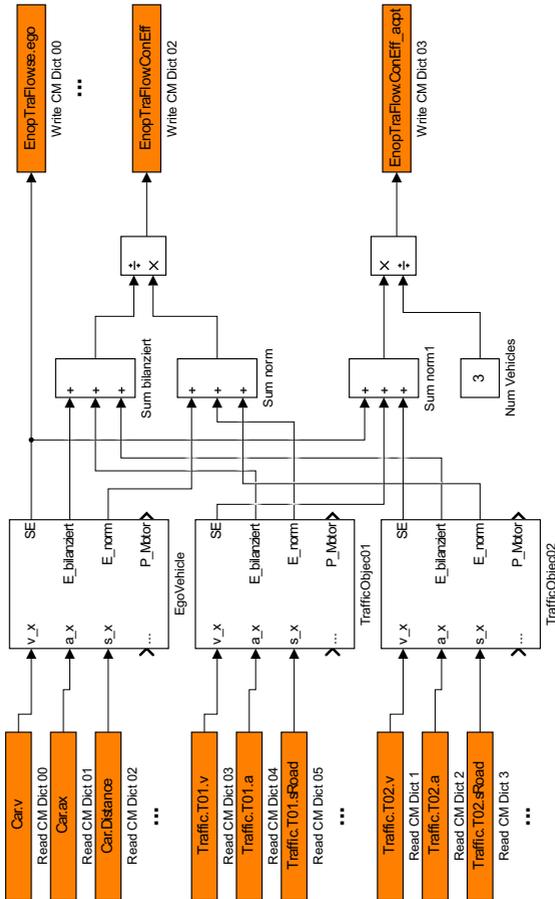


Abbildung 4.9.: Oberste Ebene des Matlab Simulink-Modells zur Berechnung der Connected Efficiency

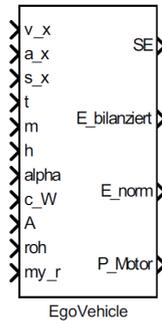


Abbildung 4.10.: Subsystemgrenze und -schnittstelle eines einzelnen Fahrzeugsystems der CE-Realisierung in Matlab Simulink

Die Ausgänge eines Berechnungsblocks (Abb. 4.10) werden bei jedem Simulationsschritt im Verzeichnis der Simulationsvariablen des CarMakers aktualisiert, so dass auch innerhalb von CarMaker die berechneten Variablen verwendbar sind. Sie können in CarMaker z.B. direkt in einen Graphen (vgl. Abb. 4.11) eingebunden und parallel zu internen Größen wie z.B. der Geschwindigkeit angezeigt werden, wodurch der Anwender unmittelbar bei der Tätigkeit einen Simulationslauf auszuwerten und zu analysieren unterstützt wird.

Das aufgebaute Simulink-Modell stellt somit eine Analysemetrik auf Basis von Gl. (4.21) und Gl. (4.22) bereit, welche es erlaubt, in CarMaker simulierte Szenarien zu bewerten. Da der Ablauf eines Szenarios durch die Manöver der einzelnen Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird, lassen sich auch die Manöver bewerten. Letztendlich ermöglicht die Connected Efficiency nicht nur Aussagen bezüglich der zugrundeliegenden Szenarien, sondern auch über eine moderne assistierende oder autonome Fahrfunktion in Bezug auf ihre Verkehrsflusstauglichkeit und ihr Energieeffizienzverhalten. Da CarMaker ebenfalls ein umfangreiches Funktionsangebot zum Testen von Fahrfunktionen (z.B. virtuelle Sensoren zur Fahrspurerkennung, virtuelle Radarsensoren zur Fahrzeugdetektion etc.) bietet, können diese mithilfe des entstandenen CE-Modells in Matlab Simulink direkt in CarMaker analysiert werden. Dazu werden die berechneten Werte zur Single Efficiency und zur Connected Efficiency sowie deren Hilfsgrößen (berechnete Leistungen und Energien aus Abschn. 4.5) direkt in der graphischen Oberfläche von CarMaker zur Verfügung gestellt.

Eingangsgröße	Symbol	Einheit
momentane Geschwindigkeit in Fahrtrichtung	v_x	m/s
momentane Beschleunigung in Fahrtrichtung	a_x	m/s^2
gefahrte Strecke	s_x	m
globale Simulationszeit	t	s
Fahrzeugmasse	m	kg
momentane, absolute Höhe	h	m
momentane Streckensteigung	α	rad
Ausgangsgröße	Symbol	Einheit
single efficiency	SE	<i>einheitslos</i>
bilanzierter Energieverbrauch	$E_{bilanziert}$	Ws
Normierungsenergie	E_{norm}	Ws
momentane Motorleistung	P_{Motor}	W

Tabelle 4.1.: Ein- und Ausgangsgrößen eines Simulink-Berechnungsblocks zur SE

Zur Verdeutlichung der Analysefähigkeiten des mit CarMaker gekoppelten CE Energiebedarfsmodells wurde ein Beispielszenario erstellt und simuliert, das den Streckenverlauf der Bundesautobahn (BAB) 8 zwischen Karlsruhe und Stuttgart auf einer Distanz von 20km nachempfunden ist. Dazu wurde das Kufen- und Höhenprofil (Abb. 4.11 in blau) mit Sensoren, bestehend aus GPS und Barometer, ermittelt und der Simulation zugrunde gelegt.

Der Bewegungsablauf eines in der Simulation fahrenden PKWs ist in Fahrtrichtung aufgeteilt in zwei sich wiederholende, alternierende 1km-Abschnitte (vgl. Abb. 4.12). Während ein Abschnitt aus einer Geschwindigkeitsänderung von 200km/h auf 120km/h mit einer Verzögerung von $a = 4m/s^2$ besteht, führt der jeweilige andere Abschnitt eine Beschleunigung von 120km/h auf 200km/h mit $a = 3m/s^2$ durch. Bei beiden Abschnitten wird, sobald die Zielgeschwindigkeit erreicht ist, diese konstant gehalten, bis der Abschnitt von einem Kilometer zu Ende ist. Im ersten Beschleunigungsabschnitt (zwischen Sekunde 30 und 60) konnte aufgrund des Streckenprofils (Übergang von BAB 5 auf BAB 8) die gewünschte Geschwindigkeit von 200km/h nicht

Eingangsgröße	Symbol	Einheit
Luftwiderstandsbeiwert	c_W	dimensionslos
Fahrzeugquerschnittfläche	A	m^2
Luftdichte	ρ_{Luft}	$\frac{kg}{m^3}$
Rollwiderstandsbeiwert	μ_R	dimensionslos

Tabelle 4.2.: Feste Simulationsvariablen aus CarMaker-Szenariobeschreibung

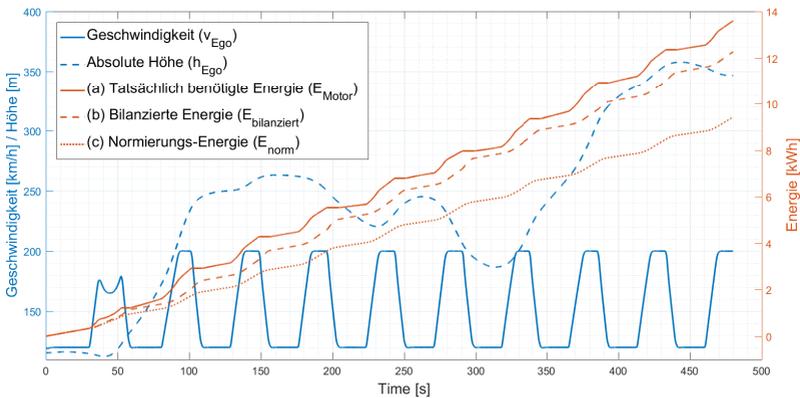


Abbildung 4.11.: Geschwindigkeitsprofil und Energiewerte aus Abschn. 4.5

vollständig erreicht werden, was aber für das betrachtete Beispiel keinerlei Einschränkungen zur Folge hat.

Das Ergebnis eines Simulationslaufes des beschriebenen Beispiels gekoppelt mit dem CE Energiebedarfsmodell zeigt in Abb. 4.11 die Werte für (a) den tatsächlichen Energiebedarf E_{Motor} , (b) den bilanzierten Energiebedarf $E_{bilanziert}$ und den Norm-Energiebedarf (c) E_{norm} zusammen mit dem gefahrenen Geschwindigkeits- und Höhenprofil. Ausgehend von den ermittelten Energiewerten berechnet sich die Connected Efficiency ($CE_{Energie}$ in Abb. 4.12), welche in diesem Fall der SE entspricht, da zur Energieberechnungs-Evaluation zunächst nur ein Fahrzeug betrachtet wird.

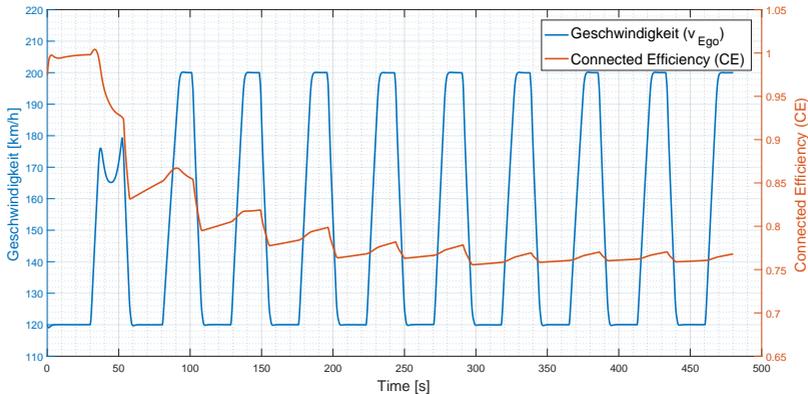


Abbildung 4.12.: Geschwindigkeitsprofil und Connected Efficiency des Beispielszenarios

Die alternierenden 1km-Abschnitte aus dem Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs lassen sich bei den Energiebedarfen (Abb. 4.11) und letztendlich bei der CE (Abb. 4.12) wiedererkennen.

Der tatsächliche Energiebedarf (E_{Motor}), den der Antriebsmotor bereitstellen muss, liegt stets knapp über dem bilanzierten Energiebedarf ($E_{bilanziert}$), da das verwendete Streckenprofil durchweg am Ende eine größere absolute Höhe (h_{Ego} in Abb. 4.11) als zu Beginn besitzt, wodurch die potentielle Energie ein negatives Delta aufweist. Aus diesem Grund besteht eine Differenz zwischen den Werten von (a) und (b), auch wenn die Endgeschwindigkeit der Anfangsgeschwindigkeit entspricht. Die Differenz zur Norm-Energie (E_{norm}) nimmt bei fortschreitender Zeit ebenfalls zu, da dieser unter gleichen Anfangs- und Endbedingungen eine gleichförmige Bewegung ohne Beschleunigen und Verzögern zugrunde liegt. Die Single Efficiency bzw. Connected Efficiency fängt bei einem Wert nahe eins an und nimmt in den vorderen 1km-Abschnitten drastisch ab. Gegen Ende sind nur noch geringe Auswirkungen erkennbar. Da die CE als eine Bewertungsmetrik für taktische Entscheidungen (vgl. Abschn. 4.5.2) entwickelt wurde, entspricht dies dem gewünschten Verhalten.

Die berechneten Werte für die Energien und die CE zeigen ein nach den Gleichungen aus Abschn. 4.5 beschriebenes Verhalten auf, das sich in Abhängigkeit von der Beschleunigung und Verzögerung verändert, aber unabhängig von dem Streckenprofil einen Vergleich zulässt. Um präzisere Aussagen über die Einflussfaktoren treffen zu können, werden die aufgezeichneten Parameter, die einen direkten Einfluss auf die Energieberechnungen der CE nehmen, im nachfolgenden Kapitel mithilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

4.7. Zusammenfassung des Kapitels

Das Kap. 4 erläuterte zu Beginn die Grundlagen und den Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf Energiebetrachtungen für Straßenfahrzeuge. Es wurde ein Überblick darüber gegeben, wie mit aktuellen Methoden bzw. Fahrzyklen eine Bewertung des Energiebedarfs eines isolierten Fahrzeuges stattfindet. Anschließend wurden prototypische Assistenzsysteme aus Wissenschaft und Industrie vorgestellt, welche zum Ziel die Energiebedarfsoptimierung aufweisen. Im Zuge dessen wurde ein grundlegendes Energiebedarfsmodell zur simulativen Ermittlung des Energiebedarfs und Kraftstoffverbrauchs eingeführt. Auf dessen Basis entstand letztendlich das Paradigma einer vernetzten Effizienz (Connected Efficiency). Damit einhergehend wurde eine Energieeffizienz-Metrik für eine gesamtwirtschaftliche, kollektive Analyse und Bewertung von taktischen Fahrscenarien entwickelt. Am Ende des Kapitels wurde die Metrik in ein Matlab Simulink-Modell in Kombination mit dem Fahrdynamik-Simulationswerkzeug IPG CarMaker integriert und analysiert. Aus der prototypischen Realisierung wurde ersichtlich, dass sich die CE Metrik eignet, um energetische Bewertungen auf aufgezeichneten oder simulierten Werten (nach Ablauf eines Szenarios) durchzuführen. Sie ist jedoch aus heutiger Sicht als Entscheidungsgrundlage für einen Energieeffizienz-Assistenten nur bedingt geeignet, da die Berechnung im Nachhinein erfolgt und die zu dieser Berechnung benötigten Größen nur mit unverhältnismäßigem Aufwand zu prognostizieren sind. Deshalb wird in Kap. 5 untersucht, auf welche Einflussgrößen das Konzept eines kollektiven Energieeffizienz-Assistenten reduziert werden kann.

5. Sensitivität der Einflussgrößen

Im vorherigen Kapitel wurde eine Metrik zur Bewertung von Manöverentscheidungen auf mehrspurigen Straßen bezüglich Fahrsituationen vorgestellt. Diese Metrik ist über Größen wie Differenzabstände und Differenzgeschwindigkeiten von der bestehenden Situation und Konstellation aller umliegenden Verkehrsteilnehmer abhängig. Die Situationsbeschreibung lässt sich allerdings auf messbare Größen reduzieren, welche einen direkten Einfluss auf die Connected Efficiency-Metrik besitzen, die s.g. Parameter. Mithilfe einer Analyse zur Sensitivität wird nun der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Connected Efficiency bestimmt. Auf Grund der statistisch dominierenden Häufigkeit von PKWs auf Autobahnen (vgl. Anh. A) werden zur Analyse deren Wertebereiche herangezogen.

Zu Beginn dieses Kapitels wird das Vorgehen der Sensitivitätsanalyse erläutert. Im Anschluss werden die Szenarien, die als Grundlage für Simulationen verwendet werden und auf die die Analyse angewandt wird, beschrieben. Darauf folgend werden die zu variierenden Parameter und deren Variationsbereiche bestimmt, mit deren Hilfe die Sensitivität ermittelt wird. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse interpretiert und die Anforderungen an einen Energieeffizienz-Assistenten abgeleitet.

5.1. Aufbau der Sensitivitätsanalyse

Als Grundlage für die Durchführung der Sensitivitätsanalyse sind Simulationsszenarien der Fahrzeugbewegung und die Bestimmung der zu untersuchenden Einflussgrößen erforderlich. Die Definition der Szenarien ist in Abschn. 5.2 zu finden. Der Aufbau dieser Szenarien zur Simulation stellt somit den ersten Schritt zur Analyse dar. Im Anschluss werden die zu variierenden Parameter bestimmt, was in Abschn. 5.3 beschrieben ist. Danach erfolgt die Bestimmung

eines Normalwerts und des Variationsbereichs für jeden der im vorangegangenen Schritt identifizierten Parameter.

Mit diesen Informationen kann die Sensitivität ermittelt werden, indem alle Parameter auf ihren Normalwert eingestellt werden und nur ein einziger davon innerhalb seines Bereiches variiert wird [Fra76]. Für jeden Wert, den ein Parameter innerhalb seines Variationsbereichs annimmt, wird eine Simulation der entsprechenden Szenarien durchgeführt. Dieser Vorgang, der in Abschn. 5.4 im Detail beschrieben wird, ist für jeden Parameter und dessen zugehörigen Bereich zu wiederholen, bis alle Parameter differenziert wurden. Nachdem alle Simulationsläufe abgeschlossen sind, werden die ermittelten Simulationsergebnisse in Diagrammen konsolidiert. Für einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Methoden zur Sensitivitätsanalyse wird auf die Literatur verwiesen [Fra76].

5.2. Betrachtete Szenarien

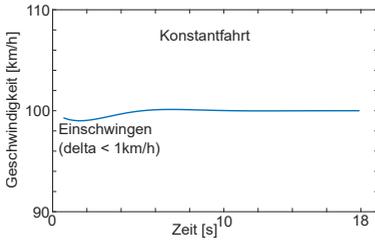
Zur Untersuchung der Einflüsse mithilfe der Sensitivitätsanalyse werden zunächst Szenarien mit nur einem einzigen PKW eingesetzt, da die variierten Größen unabhängig von anderen Fahrzeugen den Energiebedarf beeinflussen. Keine Größe (z.B. Differenzgeschwindigkeit, -beschleunigung etc.) eines weiteren Fahrzeugs nimmt direkten Einfluss auf die Energieeffizienzberechnung eines spezifischen Fahrzeugs (s. Gl. (4.13)). Es sind immer nur die eigenen Größen des spezifischen Fahrzeugs, die eine Auswirkung haben. Andere Fahrzeuge nehmen lediglich Einfluss auf den möglichen Wertebereich eines Parameters bzw. legen diesen fest. So lässt sich z.B. die Variation des Abstandes zwischen zwei Fahrzeugen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf die Variation der Verzögerung bzw. den Zeitpunkt, ab dem verzögert wird, zurückführen. Die Resultate für ein einzelnes Fahrzeug können anschließend direkt auf alle anderen Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld übertragen werden. Es erfolgen daher die Untersuchungen mithilfe der vier Bewegungsabläufe:

Fall 1) Konstantfahrt: Konstante Bewegung (Abb. 5.1a)

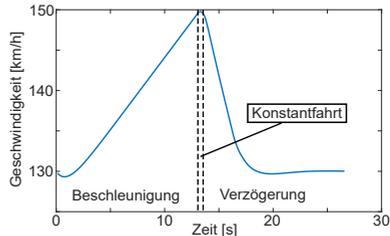
Fall 2) Ausgebremst: Beschleunigte Bewegung → konstante Bewegung → verzögerte Bewegung (Abb. 5.1b)

Fall 3) Überholen: Verzögerte Bewegung → konstante Bewegung → beschleunigte Bewegung (Abb. 5.1c)

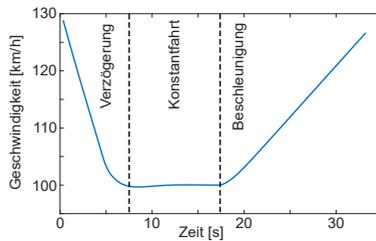
Fall 4) Ausgebremst mit Steigung: Beschleunigte Bewegung (Abb. 5.1b) mit Streckensteigung/-gefälle



(a) Fall 1



(b) Fall 2 und Fall 4



(c) Fall 3

Abbildung 5.1.: Simulierte Geschwindigkeitsprofile in der Grundkonfiguration

Die ersten drei Fälle bilden typische Manöver auf einer mehrspurig, baulich getrennten Straße ab. Bei keiner Störung ist eine Konstantfahrt (Fall 1) mit der *eigenen* Wunschgeschwindigkeit möglich. Stattdessen wird durch eine Störung z.B. eine Verzögerung erzwungen und es kann erst nach einiger Zeit wieder auf die Wunschgeschwindigkeit beschleunigt werden (Fall 2). Der Fall 3) ist in gleicher Weise z.B. durch einen Überholvorgang begründet, bei dem zunächst auf eine höhere Geschwindigkeit beschleunigt wird und anschließend, nach dem Überholen, wieder auf die ursprünglich Geschwindigkeit reduziert wird. Die ersten drei Bewegungsvorgänge finden auf einer geraden und ebenen Strecke statt. Um ebenfalls den Einfluss einer Steigung analysieren zu können, wird ein weiteres Szenario (Fall 4) betrachtet, welches Beschleunigungsablauf aus Fall 2) als Grundlage auf einer gleichförmig steigenden/fallenden Strecke verwendet. In Fall 4) wird somit die Steigung variiert. Die Geschwin-

digkeitsprofile, deutlich am Beispiel der Konstantfahrt (Abb. 5.1a) erkennbar, weisen zu Beginn ein Einschwingen auf die geforderte Geschwindigkeit auf, was sich auf den Regelkreis, der die Fahrbewegung in der Simulation ausführt, zurückführen lässt.

5.3. Auswahl der zu variierenden Parameter

Basierend auf den Gleichungen zur Connected Efficiency aus Abschn. 4.5.4 werden diejenigen Parameter bestimmt, deren Einfluss durch die Sensitivitätsanalyse ermittelt werden soll. Es werden die Einflussgrößen aus Gl. (4.1), Gl. (4.2), Gl. (4.3) und Gl. (4.4) als variierbare Parameter ausgewählt, die in den folgenden Unterabschnitten zu fahrzeugspezifischen, streckenabhängigen und fahrbewegungsabhängigen Parametern gruppiert sind.

5.3.1. Fahrzeugspezifische Parameter

Hierbei handelt es sich um die Größen aus Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2, die durch das gewählte Fahrzeug und seine Insassen bzw. Beladung festgelegt sind und sich über den gesamten Betrachtungszeitraum nicht verändern. Modifizieren lassen sie sich in der Regel nur durch bauliche Veränderungen, die aber nicht durch taktische Entscheidungen während der Fahrt zur Energieeffizienzsteigerung genutzt werden können. Somit ergibt sich die Zusammenstellung der fahrzeugspezifischen Parameter in Tabelle 5.1. Die Wertebereiche wurden basierend auf Herstellerangaben, statistischen Erhebungen und Literaturwerten ausgewählt (vgl. Anh. B). Folglich beschränken sich diese Bereiche auf die Werte für PKWs, da z.B. bei der Verwendung einer größeren Masse, wie die eines LKWs, auch ein anderes Antriebsstrangmodell eingesetzt werden muss, welches allerdings nicht mit der vorgestellten Analysemethode realisiert ist.

5.3.2. Streckenabhängige Parameter

Bei streckenabhängigen Parametern handelt es sich um diejenigen, die abhängig von der gewählten Route sind, sowie diejenigen, die die feste Umgebung repräsentieren und somit der Szenerie (s. Abschn. 3.2.1) entstammen. Diese

Parameter	min	norm	max	Einheit
Fahrzeugmasse	800	1300	3500	kg
Luftwiderstandsbeiwert (c_W)	0,1	0,2	0,4	einheitslos
Rollwiderstandsbeiwert	0.005	0.008	0.015	einheitslos
Wirkungsgrad des Antriebsstrangs	90	95	97	%

Tabelle 5.1.: Fahrzeugspezifische Parameter und ihre Werte

sind für alle Verkehrsteilnehmer an der entsprechenden Stelle gleich und ändern ihren Zustand zu dem jeweiligen Zeitpunkt nicht. Dazu zählen folgende Parameter:

- Steigung
- Straßenbedingungen (Rollreibung)

Die Straßenbedingungen gehen über den Rollwiderstandsbeiwert aus den fahrzeugspezifischen Parametern in die Analyse ein und müssen daher nicht erneut bei den streckenabhängigen Parametern betrachtet werden. Die Steigung wird im Fall 4) von -4 bis +5 Grad variiert, was einem Gefälle bzw. einer Steigung von bis zu 8% entspricht (nach [TENSMT02] ist auf Autobahnen von weniger als 7% auszugehen).

Zusätzlich sind noch Rahmenbedingungen für die Streckenlängen, auf die ein Szenario beschränkt ist, erforderlich, die im Vergleich zu den zuvor genannten Parametern in der Sensitivitätsanalyse variiert werden. Dazu zählen diejenigen, die in Tabelle 5.2 zu finden sind. Auf Basis vorangegangener Simulationen ist ein asymptotisches Verhalten der CE Metrik bekannt, so dass ab einer Distanz von 2500 Metern konstanter Fahrt keine Veränderungen mehr zu erwarten sind. Aus diesem Grund wurden die Variationsgrenzen für die Distanzen auf 250 und 2500 Meter festgesetzt.

Parameter	min	norm	max	Einheit
Steigung	-4	0	5	Grad
Distanz Beschleunigungsabschnitt	250	500	2500	m
Distanz Bremsabschnitt	250	500	2500	m
Distanz Gesamtstrecke	250	500	2500	m

Tabelle 5.2.: Streckenabhängige Parameter und ihre Werte

5.3.3. Fahrbewegungsabhängige Parameter

Weiterhin sind die Parameter, welche abhängig von der Fahrbewegung selbst sind, einzubeziehen. Hierbei handelt es sich um diejenigen, auf die im Rahmen taktischer Entscheidungen Einfluss genommen werden kann. Sie sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Abhängig von den umgebenden Bedingungen muss die Geschwindigkeit und die Beschleunigung verändert werden.

Parameter	min	norm	max	Einheit
Anfangsgeschwindigkeit	100	130	160	km/h
Zwischengeschwindigkeit	70	100	130	km/h
Endgeschwindigkeit	100	130	160	km/h
Maximalbeschleunigung	0,2	0,5	1	m/s ²
Maximalverzögerung	-3	-1,5	-0,2	m/s ²

Tabelle 5.3.: Fahrbewegungsabhängige Parameter und ihre Werte

In Fall 1) (Abb. 5.1a) wird für die Konstantfahrt der Parameter *Anfangsgeschwindigkeit* verwendet. In den Fällen 2) bis 4) (Abb. 5.1b, Abb. 5.1c) kommen zusätzlich noch die *Endgeschwindigkeit*, als diejenige, auf die am Ende des Szenarios beschleunigt bzw. verzögert wird, und die *Zwischengeschwindigkeit*, die in dem Konstantfahrtabschnitt zwischen den Beschleunigungs- und Verzögerungsabschnitten gehalten wird.

5.4. Durchführung der Analyse

Die Durchführung der Analyse, welche eine Aussage über die Einflüsse der einzelnen Parameter zulässt, wurde analog zu dem in [Str16] beschriebenen Vorgehen durchgeführt und findet mit den erläuterten Szenarien mithilfe des Fahrdynamik-Simulationswerkzeugs IPG CarMaker (s. Abschn. 3.3.4) nacheinander statt. Dabei werden die Grundszenarien manuell mit ihrer jeweiligen Grundkonfiguration erstellt, wie sie in den Tabellen 5.1 bis 5.3 zu finden sind. Danach werden die aufgelisteten Parametervariationen eingelesen, im vorgegeben Bereich variiert und für jeden Schritt ein Simulationslauf durchgeführt. Die dazugehörige Übersicht über den grundlegenden Ablauf ist dem

Aktivitätsdiagramm in Abb. 5.2 zu entnehmen. Als Eingangsobjekte zur Aktivität *Sensitivitätsanalyse* sind die Szenarien für Fall 1) bis 4) aus Abschn. 5.2 in der Form einer IPG Testfallbeschreibung (vgl. Anh. E), eine Liste der Variationsparameter und deren Konfiguration erforderlich (vgl. Lst. 5.1).

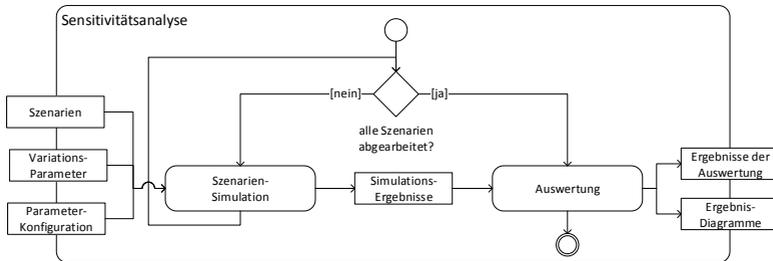


Abbildung 5.2.: Aktivitätsdiagramm der Sensitivitätsanalyse

Die detaillierten Objekt- und Kontrollflüsse zur *Szenarien-Simulation* sind in Abb. 5.3 zu erkennen und in folgende Schritte untergliedert:

1. Zunächst wird das zu simulierende Basisszenario ausgewählt (*Szenario auswählen*).
2. Im Anschluss wird der zu variierende Parameter selektiert und alle übrigen Parameter auf ihren *Mean* Wert gesetzt (*Parameter auswählen*).
3. Der selektierte Parameter erhält aus seiner *Parameter-Konfiguration* den Anfangswert.
4. Schließlich findet ein Simulationslauf in der ausgewählten Konstellation statt und die Ergebnisse werden für den Auswerteschritt abgespeichert (*Simulation durchführen*).
5. Anschließend wird der Parameter anhand seiner *Parameter-Konfiguration* vollständig variiert (*Parameter variieren*) und erneut jeweils eine Simulation durchgeführt.
6. Die Schritte 2. bis 5. werden für jeden definierten Parameter wiederholt.
7. Gleiches gilt für die Schritte 1. bis 6. für jedes weitere Basisszenario.

```
1 Env.Variations.0.Mean      = 130
2 Env.Variations.0.Name     = startSpeed
3 Env.Variations.0.Values   = 100:2:160
4 Env.Variations.1.Mean     = 1300
5 Env.Variations.1.Name     = mass
6 Env.Variations.1.Values   = 800:50:3500
7 Env.Variations.2.Mean     = 0.2
8 Env.Variations.2.Name     = cw
9 Env.Variations.2.Values   = 0.1:0.01:0.4
10 Env.Variations.3.Mean    = 0.008
11 Env.Variations.3.Name    = roll
12 Env.Variations.3.Values  = 0.005:0.0005:0.015
13 ...
```

Listing 5.1: Beispiel einer Parameterkonfiguration

In der Definition des Testlaufs (Beispiel: Anh. E), gleichbedeutend mit Simulationsszenario, werden die zu variierenden Parameter, inkl. ihrer Grenzen und Schrittweiten festgelegt (vgl. Lst. 5.1). Für jeden Variations-Parameter existieren in Lst. 5.1 jeweils drei Zeilen, wobei eine Zeile (`Env.Variations.*.Mean`) den Standardwert, wenn der Parameter nicht variiert wird, beinhaltet. Eine weitere (`Env.Variations.*.Name`) legt die Parameterbezeichnung fest und eine dritte (`Env.Variations.*.Values`) definiert den minimalen und maximalen Wert sowie die Schrittweite für die Parametervariation. In Lst. 5.1 ist ein Auszug dargestellt, welcher die vier Parameter: Startgeschwindigkeit, Fahrzeugmasse, Luftwiderstandskoeffizient und Rollwiderstandsbeiwert variiert. Dabei wird die Startgeschwindigkeit in 2 km/h-Schritten von 100 km/h bis 160 km/h variiert, während die Masse bei 1300kg, der c_w -Wert bei 0,2 und der Rollreibungskoeffizient bei 0,008 verbleiben, bis der nächste Parameter variiert wird.

Nach Ablauf der Aktion *Szenarien-Simulation* (Abb. 5.2) liegen die *Simulations-Ergebnisse* in einer hierarchischen Datenstruktur nach Abb. 5.4 vor. Diese eignet sich für die Weiterverarbeitung mithilfe von Matlab-Skripten, um daraus kumulierte Ergebnisdiagramme zu erzeugen. Abb. 5.5 zeigt die erforderlichen Schritte zur Auswertung der Ergebnisse und Diagrammerzeugung. Zur *Ergebnisauswertung* werden zunächst alle erzeugten *Simulations-Ergebnisse* aus der in Abb. 5.4 dargestellten Datenstruktur in Matlab eingelesen (*Datenstruktur einlesen* und *Simulations-Ergebnisse einlesen*). Anschließend werden die Daten nach Variationsparameter zusammengefasst und jeweils ein *Ergebnis-*

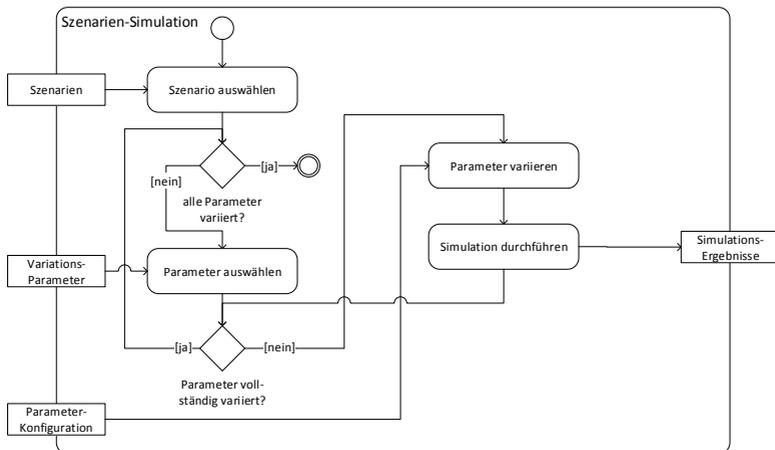


Abbildung 5.3.: Aktivitätsdiagramm der Aktivität Szenarien-Simulation

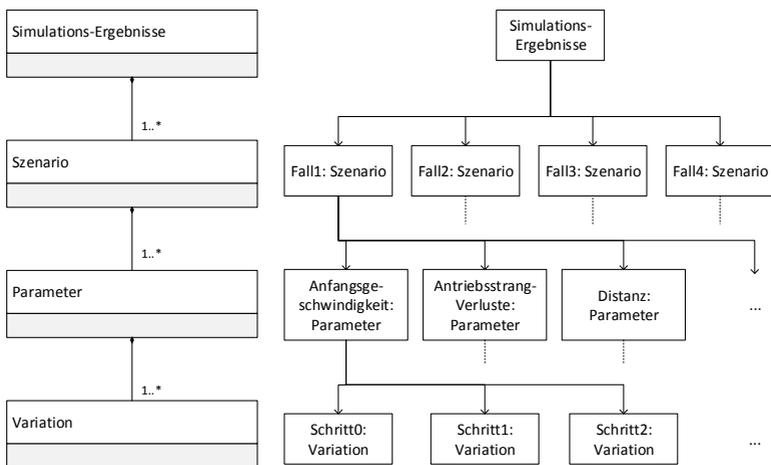


Abbildung 5.4.: Klassen-/Objektdiagramm zur Datenstruktur der Simulations-Ergebnisse

Diagramm erzeugt. Die entstandenen Diagramme werden in Abschn. 5.5 dargestellt und erläutert.

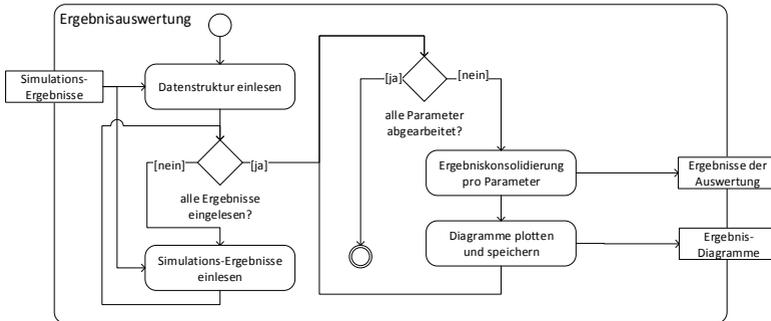


Abbildung 5.5.: Aktivitätsdiagramm der Ergebnisauswertung

5.5. Ergebnisse der Analyse und Interpretation

In den Ergebnisdiagrammen sind die Werte mehrere Simulationsläufe zusammengeführt. Ein Diagramm beinhaltet immer den jeweiligen Endwert der CE Metrik eines simulierten Szenarios für alle Variationen eines Parameters. Wird z.B. die Anfangsgeschwindigkeit von 100 km/h bis 160 km/h mit einer Schrittweite von 2km/h variiert, führt das zu 31 vollständigen Simulationsläufen, die für ein Diagramm durchgeführt werden müssen.

5.5.1. Fall 1 - Konstante Fahrt auf gerader Strecke

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse der Analyse für den ersten Fall (Konstantfahrt) dargestellt, in welchem ein Fahrzeug mit gleichbleibender Geschwindigkeit eine gerade Strecke abfährt. Für jeden variierten Parameter ist ein Diagramm zu sehen.

5. Sensitivität der Einflussgrößen

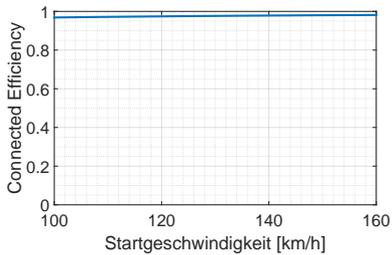


Abbildung 5.6.: Konstantfahrt: CE über Anfangsgeschwindigkeit

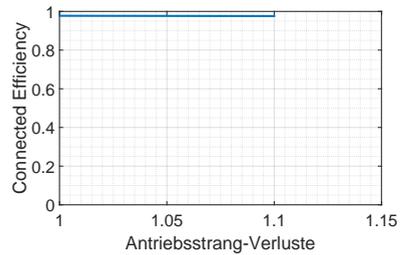


Abbildung 5.7.: Konstantfahrt: CE über Antriebsstrang-Verluste

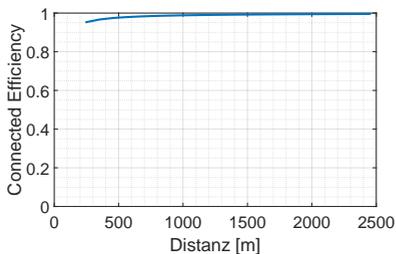


Abbildung 5.8.: Konstantfahrt: CE über Distanz

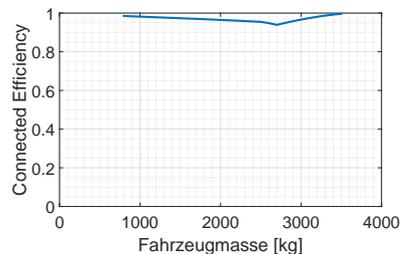


Abbildung 5.9.: Konstantfahrt: CE über Fahrzeugmasse

Die Unstetigkeit in Abb. 5.9 bei einer Masse von (in dieser spezifischen Konfiguration) ca. 2,7 Tonnen lassen sich durch nicht mehr erreichte Soll-Geschwindigkeiten auf Grund einer zu geringen Motorleistung erklären.

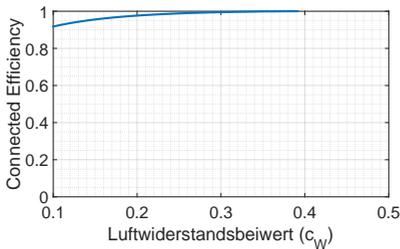


Abbildung 5.10.: Konstantfahrt: CE über Luftwiderstandsbeiwert

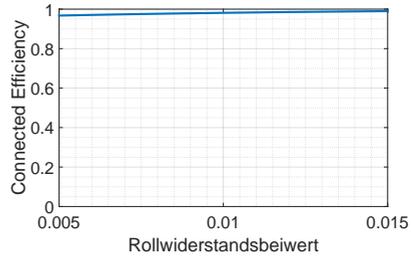


Abbildung 5.11.: Konstantfahrt: CE über Rollwiderstandsbeiwert

Zusammenfassend für den Fall 1) ist aus allen Diagrammen ersichtlich, dass der CE-Wert nahe eins liegt. Nach der Definition ist dies auch zu erwarten, da die Normierung des Energiebedarfs in Bezug auf die Konstantfahrt stattfindet. Dennoch ist die Tendenz zu erkennen, dass bei geringeren entgegenwirkenden Kräften, also fallender Rollreibung und abnehmendem Luftwiderstand, die CE kleiner als eins wird und damit die Energieeffizienz fällt. Dies lässt sich damit begründen, dass im Geschwindigkeitsprofil (vgl. Abb. 5.1a) der Konstantfahrt zu Beginn ein Einschwingen der Geschwindigkeiten auf Grund des eingesetzten (Tool-spezifischen) Fahrzeugmodells mit Abweichungen von bis zu 2 km/h stattfindet. Dadurch ist bei sehr niedrigen Widerstandskräften (Luft-/Rollwiderstand) und keinen weiteren Verlusten durch Beschleunigen/-Verzögern ein Einfluss der geringen Geschwindigkeitsschwankung in Abb. 5.10 und Abb. 5.11 erkennbar.

5.5.2. Fall 2 - Überholvorgang

Bei diesem Fall wurden die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter, die bei einem Überholvorgang auftreten, untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf der Beschleunigung und Verzögerung sowie auf der Distanz zwischen Beschleunigen und Bremsen, da diese Größen im vorangegangenen Fall nicht variiert werden konnten.

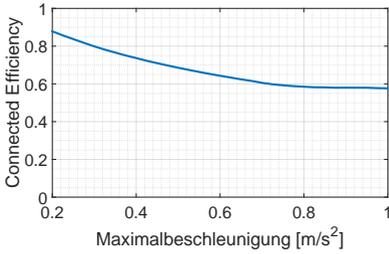


Abbildung 5.12.: Überholvorgang: CE über Maximalbeschleunigung in m/s^2

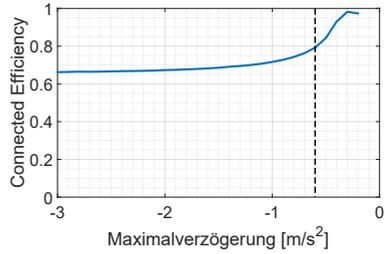


Abbildung 5.13.: Überholvorgang: CE über die maximale Verzögerung in m/s^2

Aus Abb. 5.12 geht hervor, dass die Energieeffizienz mit zunehmender Maximalbeschleunigung schlechter wird. Dies deutet darauf hin, dass es effizienter ist, mit der minimal notwendigen Beschleunigung das Fahrzeug zu beschleunigen. Beim Verzögerungsvorgang (Abb. 5.13) nähert sich die CE ab einer Verzögerung von $a \approx -0,6m/s^2$ dem Wert eins sehr schnell an. Das lässt sich dadurch erklären, dass ab diesem Punkt kein aktives Bremsen mehr notwendig ist, da die entgegenwirkenden Kräfte dies übernehmen. Das heißt, es wird keine Energie aus dem System Fahrzeug abgeführt, die über den Luftwiderstand und die Rollreibung hinausgeht, was einem Fahrbewegungszustand entspricht, der als *Segeln* bezeichnet wird.

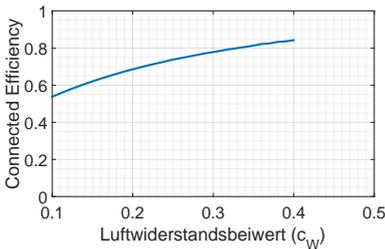


Abbildung 5.14.: Überholvorgang: CE über den Luftwiderstandsbeiwert

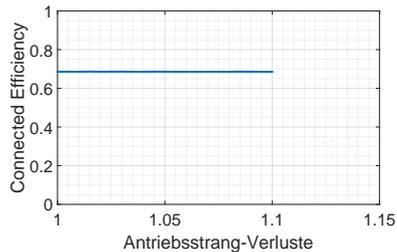


Abbildung 5.15.: Überholvorgang: CE über die Antriebsstrangverluste

Die Antriebsstrangverluste (s. Abb. 5.15) besitzen keinen Einfluss, da diese in den bilanzierten und normierten Energiebedarf gleichermaßen einfließen. Weil diese Verluste nicht durch taktische Entscheidungen während der Fahrt verändert werden können, werden diese auch nicht weiter betrachtet. Bei steigendem Luftwiderstand, ist ein steigender CE-Wert erkennbar (s. Abb. 5.14). Erklären lässt sich die zunehmende Energieeffizienz dadurch, dass beim Verzögern durch eine schlechtere Aerodynamik weniger Energie über die konventionellen Bremsen abgeführt wird, wodurch die Norm-Energie (vgl. Gl. (4.14)) größer und somit die SE bzw. CE kleiner wird.

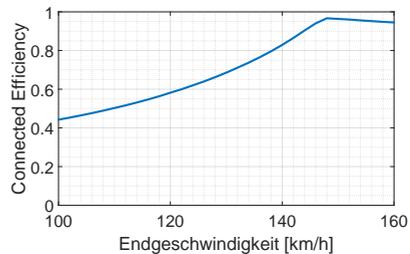
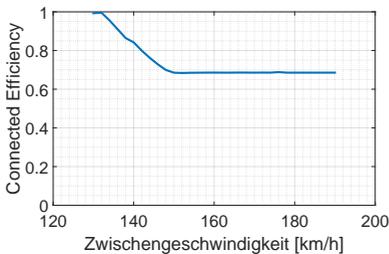


Abbildung 5.16.: Überholvorgang: CE über Zwischengeschwindigkeit in km/h
Abbildung 5.17.: Überholvorgang: CE über die Endgeschwindigkeit in km/h

Die Variationen der Geschwindigkeiten, einerseits der Endgeschwindigkeit (s. Abb. 5.17) nach dem Abbremsvorgang und andererseits der Zwischengeschwindigkeit (s. Abb. 5.16) zwischen Beschleunigungs- und Verzögerungsphase, zeigt einen Knick in dem jeweiligen Diagramm, der dadurch zustande kommt, dass das simulierte Fahrzeug (vergleichbar zu einem äquivalenten realen Fahrzeug) nicht bis zur vorgegeben Geschwindigkeit beschleunigen konnte. In der vorliegenden Fahrzeugkonfiguration liegt dieser bei ca. 150 km/h. Im Diagramm der variierten Endgeschwindigkeit (s. Abb. 5.17) nimmt die CE bis zum Knick, nahe dem Wert eins, zu, was darauf basiert, dass am Ende der Bremsvorgang umso weniger Energie aus dem System herausführt, je höher die Endgeschwindigkeit ist. Umgekehrt ist es bei der Zwischengeschwindigkeit: Je niedriger diese ist, desto weniger muss am Ende Energie durch Bremsen an die Umgebung abgegeben werden. Daher ist im Diagramm bei 130 km/h der CE-Wert nahe eins und nimmt mit steigender Zwischengeschwindigkeit ab.

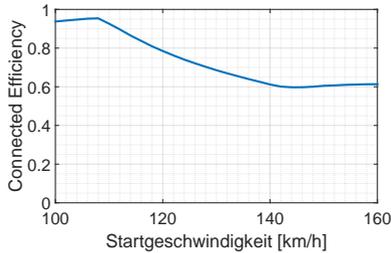


Abbildung 5.18.: Überholvorgang: CE über die Anfangsgeschwindigkeit in km/h

Bei Betrachtung des Diagramms zur Variation der Anfangsgeschwindigkeit (s. Abb. 5.18) ist bei steigender Anfangsgeschwindigkeit ein abnehmender CE-Wert erkennbar. Obwohl mit einer geringeren Geschwindigkeit deutlich länger beschleunigt werden muss, um die Zwischengeschwindigkeit zu erreichen, ist die Effizienz insgesamt besser. Erklären lässt sich diese Kurve dadurch, dass die bereits zu Beginn im Fahrzeug vorhandene kinetische Energie mit der am Ende vorhandenen bilanziert wird.

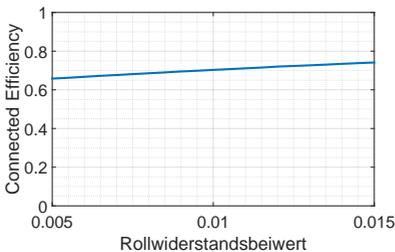


Abbildung 5.19.: Überholvorgang: CE über den Rollwiderstandsbeiwert

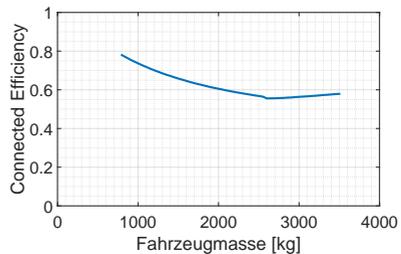


Abbildung 5.20.: Überholvorgang: CE über die Fahrzeugmasse in kg

Bei der Fahrzeugmasse (vgl. Abb. 5.20) ist zu erkennen, dass die Effizienz mit zunehmender Masse abnimmt. Die Werte ab einer Masse von (in dieser spezifischen Konfiguration) ca. 2,5 Tonnen lassen sich, wie bereits in Fall

1 erläutert, durch nicht mehr erreichte Geschwindigkeiten auf Grund einer zu geringen Motorleistung erklären, was sich wie zuvor beschrieben positiv auf die CE auswirkt. Der Einfluss der Rollreibung (vgl. Abb. 5.19) entspricht dem aus der Konstantfahrt, allerdings mit einem Offset nach unten, da eine Verzögerung am Ende des Szenarios vorliegt.

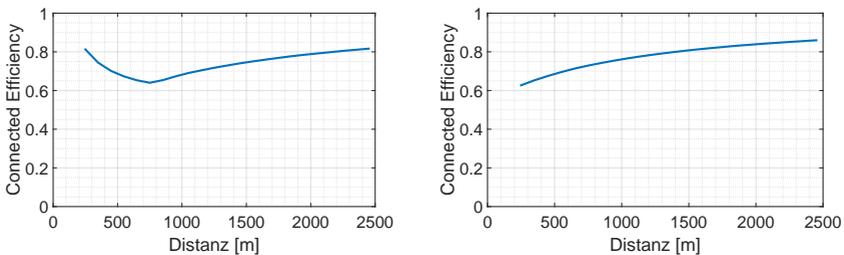


Abbildung 5.21.: Überholvorgang: CE über die Strecke zur Beschleunigung in m
Abbildung 5.22.: Überholvorgang: CE über Strecke zur Bremsung in m

5.5.3. Fall 3 - Ausbremsvorgang

Im Folgenden sind die Ergebnisse für den Ausbremsvorgang, bei dem das Fahrzeug zuerst abbremst und nach einer definierten Strecke bis auf die definierte Endgeschwindigkeit erneut beschleunigt, zu sehen. Wie im vorangegangenen Unterabschnitt, liegt das Augenmerk auf den variierten Größen zur Beschleunigung/Verzögerung, den Geschwindigkeiten und den Distanzen.

5. Sensitivität der Einflussgrößen

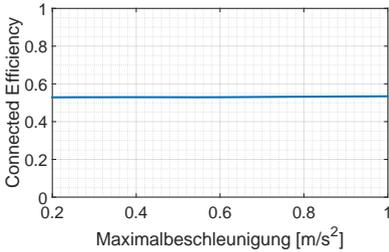


Abbildung 5.23.: Ausbremsvorgang: CE über Maximalbeschleunigung in m/s^2

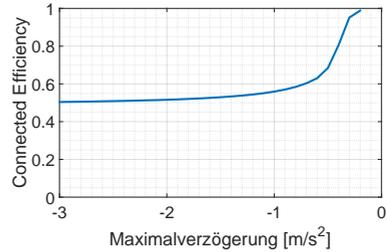


Abbildung 5.24.: Ausbremsvorgang: CE über die maximale Verzögerung in m/s^2

Die Variation der Beschleunigung (s. Abb. 5.23) am Ende des Szenarios nimmt keinen Einfluss auf den Wert der CE, da die Energie lediglich in kinetische Energie umgesetzt wird, aber weiterhin im System Fahrzeug verbleibt. Der Offset gegenüber der Konstantfahrt erklärt sich über die Verzögerung, die zu Beginn des Szenarios durchgeführt wird. Die Ergebnisse im zweiten Diagramm zur Variation der Verzögerung (s. Abb. 5.24) entsprechen denen aus dem vorangegangenen Szenario.

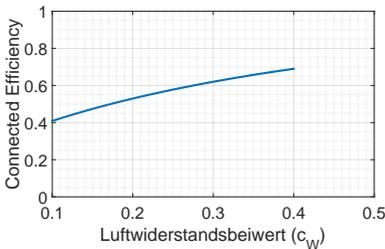


Abbildung 5.25.: Ausbremsvorgang: CE über den Luftwiderstandsbeiwert

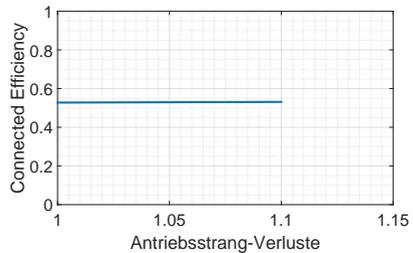


Abbildung 5.26.: Ausbremsvorgang: CE über die Antriebsstrangverluste

Auch die Variationen des Luftwiderstandsbeiwerts und der Antriebsstrangverluste (vgl. Abb. 5.25 und Abb. 5.26) führen zu den gleichen Resultaten wie beim Überholvorgang.

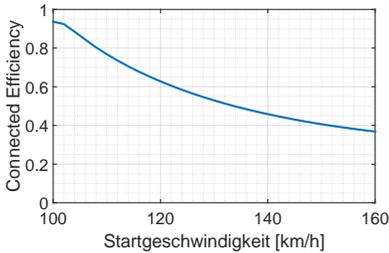


Abbildung 5.27.: Ausbremsvorgang: CE über die Anfangsgeschwindigkeit in km/h

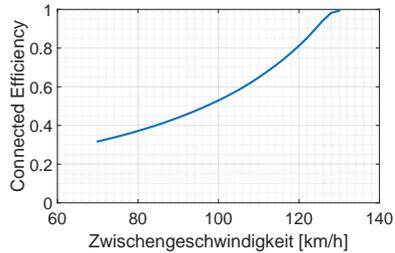


Abbildung 5.28.: Ausbremsvorgang: CE über die Zwischengeschwindigkeit in km/h

Bei der Anfangs- und Zwischengeschwindigkeit (s. Abb. 5.27 und Abb. 5.28) steigt die Energieeffizienz umso höher, je geringer die Differenzgeschwindigkeit ist, d.h. je weniger gebremst wird. Folglich geht bei niedriger Anfangsgeschwindigkeit und bei hoher Zwischengeschwindigkeit die CE gegen eins.

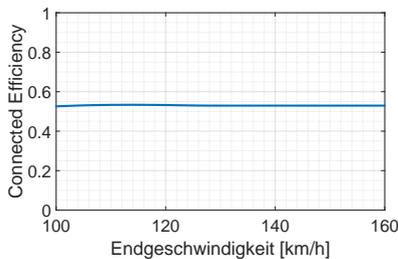


Abbildung 5.29.: Ausbremsvorgang: CE über die Endgeschwindigkeit in km/h

Die Veränderung der Endgeschwindigkeit (s. Abb. 5.29) hat aus den gleichen Gründen wie die Beschleunigung am Ende des Szenarios keinen Einfluss.

5. Sensitivität der Einflussgrößen

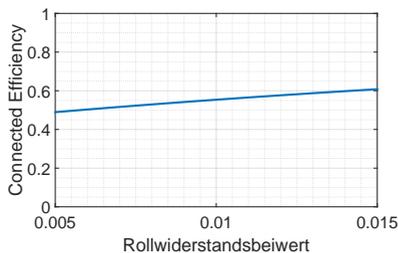


Abbildung 5.30.: Ausbremsvorgang: CE über den Rollwiderstandsbeiwert

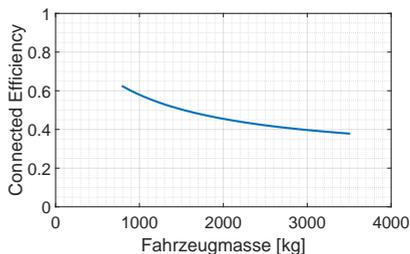


Abbildung 5.31.: Ausbremsvorgang: CE über die Fahrzeugmasse in kg

Ebenfalls verhalten sich die Variationen des Rollwiderstandsbeiwerts und der Masse (vgl. Abb. 5.30 und Abb. 5.31) wie im vorangegangenen Szenario. Steigende Rollreibung und geringere Fahrzeugmasse führen zu einer besseren Energieeffizienz im taktischen Sinne.

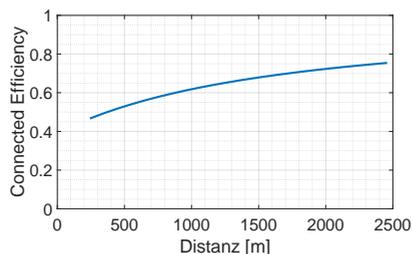


Abbildung 5.32.: Ausbremsvorgang: CE über die Strecke zur Beschleunigung in m

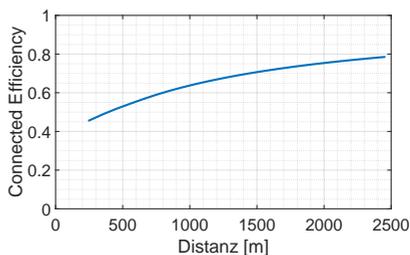


Abbildung 5.33.: Ausbremsvorgang: CE über Strecke zur Bremsung in m

Die Verlängerung der Distanzen (vgl. Abb. 5.32 und Abb. 5.33) führt auch in diesem Szenario auf Grund des zunehmenden Konstantfahranteils zu einer Steigerung der Energieeffizienz.

5.5.4. Fall 4 - Beschleunigungsvorgang mit veränderlicher Streckensteigung

In diesem Fall sind die Ergebnisse zur beschleunigten Bewegung dargestellt. Hierbei wird auch die Streckensteigung variiert.

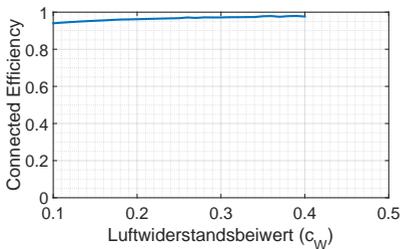


Abbildung 5.34.: Steigungen: CE über den Luftwiderstandsbeiwert

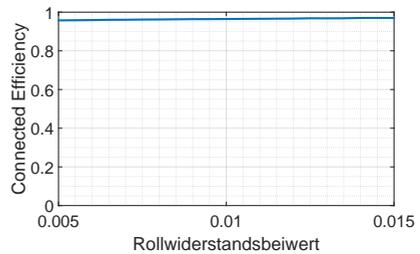


Abbildung 5.35.: Steigungen: CE über den Rollwiderstandsbeiwert

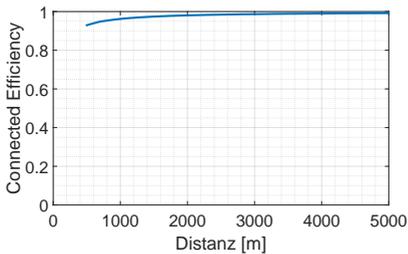


Abbildung 5.36.: Steigungen: CE über die Strecke in m

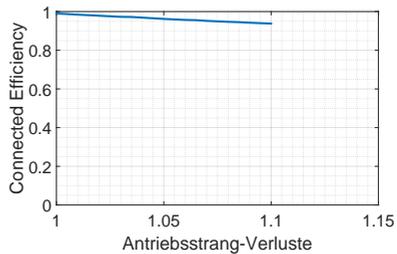


Abbildung 5.37.: Steigungen: CE über die Antriebsstrangverluste

5. Sensitivität der Einflussgrößen

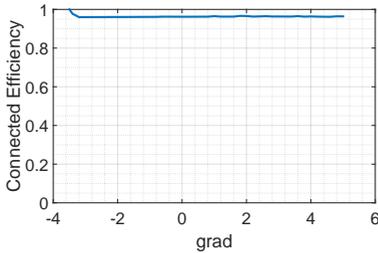


Abbildung 5.38.: Steigungen: CE über Streckensteigung in Grad

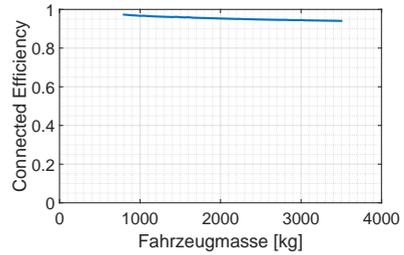


Abbildung 5.39.: Steigungen: CE über die Fahrzeugmasse in kg

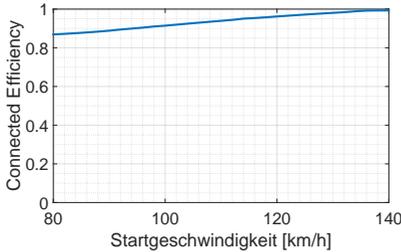


Abbildung 5.40.: Steigungen: CE über die Anfangsgeschwindigkeit in km/h

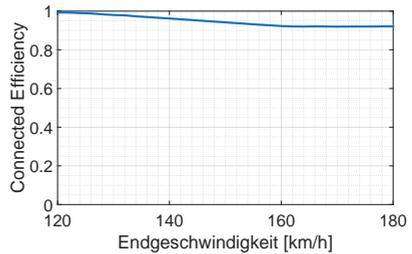


Abbildung 5.41.: Steigungen: CE über die Endgeschwindigkeit in km/h

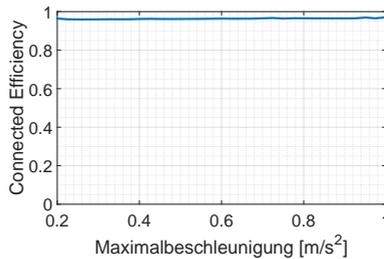


Abbildung 5.42.: Steigungen: CE über Maximalbeschleunigung in m/s²

Die Ergebnisse dieses Szenarios zeigen, dass bei der beschleunigten Bewegung lediglich die Anfangs- und Endgeschwindigkeit (vgl. Abb. 5.40 und Abb. 5.41) einen erkennbaren Einfluss auf den Effizienzwert nehmen. Das lässt sich darauf zurückführen, dass sich das Szenario bei Angleichung der Anfangs- und Endgeschwindigkeit (egal welche der beiden Parameter variiert wird) immer mehr der Konstantfahrt (Fall 1) annähert. Da die Normierung der CE einer exakten Konstantfahrt entspricht, nähert sich die taktische Energieeffizienz dem Wert eins an.

5.6. Konsolidierung der Analyseergebnisse

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse aus Abschn. 5.5 zeigen, dass die baulich veränderlichen Größen (Rollreibungskoeffizient, Aerodynamik, Fahrzeugmasse, Antriebsstrangverluste) in ihrer Tendenz einen nachvollziehbaren Einfluss auf die Energieeffizienz-Metrik der SE bzw. CE aufweisen. Das bedeutet, dass diese Größen in der Konstantfahrt z.B. einen höheren Energiebedarf bei schlechterer Aerodynamik aufweisen, allerdings keine Veränderung des CE-Werts hervorrufen und somit keinen Einfluss auf die taktische Energieeffizienz nehmen. Weiterhin ändern sich diese während der Fahrt nicht dynamisch oder für alle Fahrzeuge gleichermaßen (Rollreibung: anderer Fahrbahnbelag; Luftwiderstand¹: Änderung der Windgeschwindigkeit und -richtung). Daher können diese bei der Konzeptionierung eines taktischen Energieeffizienz-Assistenten ohne Einschränkung der Allgemeinheit als konstant vorausgesetzt werden. Die streckenabhängigen Größen (Streckensteigung, Straßenbedingungen etc.) sind ebenfalls nicht in Form taktischer Entscheidungen beeinflussbar und wirken sich auf alle Fahrzeuge im Umfeld gleichermaßen aus, sodass diese nicht als direkte Einflussfaktoren in den Assistenten eingehen.

Somit ergeben sich als wichtigste Einflussgrößen die Beschleunigungen, Verzögerungen, Geschwindigkeiten und Distanzen. Dennoch ist die Kenntnis über die Einflussnahme der übrigen untersuchten Parameter von Bedeutung, um damit beispielsweise eine Gewichtung einzelner Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld gegenüber anderer durchzuführen. Weiterhin wurde aus den Ergebnisdiagrammen ersichtlich, dass sich der CE-Wert immer weiter dem

¹ Beim Luftwiderstand werden keine Effekte, die durch andere Verkehrsobjekte verursacht oder begünstigt werden, berücksichtigt.

Wert eins annähert, je mehr die Streckenlänge ausgedehnt und dadurch der konstante Fahrtanteil erhöht wird. Folglich ist es zur Steigerung der kollektiven Energieeffizienz erforderlich, die Verzögerungsvorgänge aller Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld möglichst gering zu halten. Im anschließenden Kapitel, welches sich mit dem Konzeptentwurf eines taktischen Energieeffizienz-Assistenten beschäftigt, werden diese Erkenntnisse für einen praktischen Anwendungsfall aufgegriffen.

6. Konzept eines Energieeffizienz-Assistenten im taktischen Fahrzeugumfeld

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Sensitivität der Einflussparameter zur Connected Efficiency und damit einhergehend diejenigen Größen mit den markantesten Auswirkungen bestimmt. Darauf aufbauend wird in diesem Kapitel das Konzept eines Energieeffizienz-Assistenten vorgestellt, der eine kollektive Energieeffizienz im taktischen Fahrzeugumfeld zum Ziel hat und beispielsweise eine Entscheidung für die in Abb. 6.1 dargestellte Situation herbeiführt.

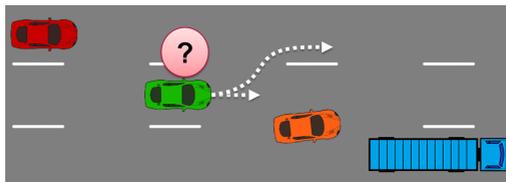


Abbildung 6.1.: Mögliche Fahrzeugkonstellation

Ausgehend von Abschn. 4.6 kann die Connected Efficiency nicht prognostiziert¹, sondern nur nach Ablauf eines Szenarios berechnet werden. Allerdings haben sich aus der Sensitivitätsanalyse (vgl. Abschn. 5.6) die Beschleunigung und die Verzögerung als entscheidende Einflussfaktoren herausgestellt, die auch im Rahmen taktischer Handlungen beeinflussbar sind. Die beiden Faktoren lassen sich im Gegensatz zur CE mithilfe von Prognosemodellen aus

¹ Prognose nur mit erheblichem Rechenaufwand möglich, der in dem erforderlichen Ausmaße nicht im einem Fahrzeug zur Verfügung steht.

den Verkehrswissenschaften unter gegebenen Umständen bedeutend einfacher vorhersagen. Somit kommen bei der Kozeptionierung eines Assistenten Verhaltensmodelle aus einer verwandten Domäne, der mikroskopischen Verkehrssimulation, (Abschn. 3.3.2) zum Einsatz. Zu Beginn dieses Kapitels wird auf die Erweiterungen bzw. Anpassungen der zugrundeliegenden Verkehrssimulationsmodelle *Intelligent Driver Model* und *Minimize Overall Braking Induced by Lane Changes* eingegangen. Unter Verwendung dieser Anpassungen wird ein Konzept für einen kollektiven Energieeffizienz-Assistenten sowie eine zugehörige Evaluierungsumgebung auf Basis eines simulierten Fahrzeugumfeldes entwickelt².

6.1. Erweiterung bestehender Bewegungsmodelle

Für die mikroskopische Beschreibung von Fahrzeugbewegungen existieren in den Wissenschaften zur Verkehrssimulation verschiedene Fahrer- und Fahrzeugmodelle (vgl. Abschn. 3.3.2). Diese besitzen unterschiedliche Aufgabengebiete: So existieren mathematische Modelle für den Stadtverkehr, die Ampeln und Vorfahrtsregeln berücksichtigen, aber auch Modelle für die Fahrzeuglängs- und Querverführung auf mehrspurigen Straßen. Im Fortgang dieser Arbeit werden die Modelle IDM und MOBIL aus Abschn. 3.3.2, welche die notwendigen Grundlagen für die Beschreibung von Längsführung und die Entscheidung für einen Spurwechsel zur Verfügung stellen, als Basis für das Konzept des Energieeffizienz-Assistenten (Abschn. 6.3) verwendet.

Aus Kap. 5 ist bekannt, dass die Reduktion von Verzögerungsvorgängen von wesentlicher Bedeutung für die Energieeffizienzsteigerung durch taktische Handlungen ist (vgl. Abschn. 5.6). Daher erfüllt die Kombination beider Modelle (IDM und MOBIL) die Voraussetzungen für die Optimierung einer kollektiven Energieeffizienz durch Minimierung der Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgänge. Allerdings sind Anpassungen dieser Modelle erforderlich, um den Rahmenbedingungen bezüglich des taktischen Fahrzeugumfeldes aus Abschn. 3.4 zu genügen. Diese Anpassungen werden in Abschn. 6.1.1 und Abschn. 6.1.2 erläutert.

² Teile der in diesem Kapitel dargestellten Inhalte wurden im Zuge folgender vom Autor der vorliegenden Arbeit betreuten Abschlussarbeiten erarbeitet: [Vol16; Boh16]

6.1.1. Anpassungen des IDM

Als Grundlage für die Prognose der Beschleunigungen im taktischen Fahrzeugumfeld wird das IDM aus Abschn. 3.3.2 verwendet und auf alle darin enthaltenen Fahrzeuge angewandt. Mit Gl. (3.1) lassen sich in Verkehrssimulationen für jeden Simulationsschritt die Beschleunigungen aller Fahrzeuge in Abhängigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs berechnen. Diese Beschleunigungsberechnung wird ebenfalls für den Energieeffizienz-Assistenten eingesetzt, um die hypothetischen Beschleunigungen aller Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld (vgl. Abschn. 3.4) zu prognostizieren.

Modellparameter IDM	Wert
Wunschgeschwindigkeit v_0	120km/h
Folgezeit T_{folge}	1,0s
Minimalabstand s_0	2m
Beschleunigungsexponent δ	4
Maximalbeschleunigung a_{max}	1,0m/s ²
Komfortable Verzögerung b_{komf}	1,5m/s ²

Tabelle 6.1.: Initial eingesetzte Modellparameter des Intelligent Driver Model aus [TK10]

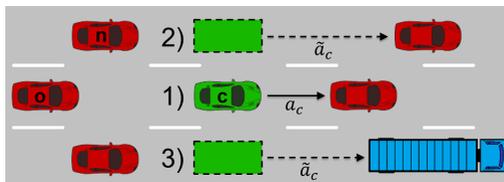


Abbildung 6.2.: Darstellung hypothetischer Fälle von MOBIL zur Berechnung der IDM-Beschleunigungen (basierend auf Abb. 3.3)

Dies ist zu jedem Zeitpunkt für die bestehenden Fahrspuren notwendig (vgl. Abb. 6.2):

1. Bestehende, unveränderte Fahrzeugkonstellation (Abb. 6.2 grünes Fahrzeug auf mittlerer Spur)
2. Ego-Fahrzeug befindet sich hypothetisch (sofern verfügbar) eine Fahrspur weiter links (Abb. 6.2 grünes Rechteck auf linker Fahrspur)
3. Ego-Fahrzeug befindet sich hypothetisch (sofern verfügbar) eine Fahrspur weiter rechts (Abb. 6.2 analog zu 2. auf der rechten Fahrspur)

Es sind in allen drei Fällen die Beschleunigung aller umliegenden Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld mithilfe der Gl. (3.1) zu prognostizieren, damit die erforderlichen Werte für die Berechnung von MOBIL (Abschn. 6.1.2) zur Verfügung stehen.

Die Gleichungen des IDM (Gl. (3.1), Gl. (3.2), Gl. (3.3)) besitzen Modellparameter, die zur Konfiguration des Modellverhaltens dienen. Die initial verwendeten Werte dafür basieren auf den Angaben von Treiber und Kesting [TK10] für eine mehrspurige Straße. Diese sind der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

6.1.2. Anpassungen von MOBIL

Die Grundlage für die Entscheidung über einen Spurwechsel bildet MOBIL aus Abschn. 3.3.2 mit Gl. (6.1) und Gl. (6.2). Allerdings berücksichtigt MOBIL nach [KTH06] nur das eigene und das jeweils nachfolgende Fahrzeug auf der aktuellen Spur und der hypothetischen Zielspur. Auf Grund von Ziehharmonikaeffekten bedarf es einer Einbeziehung von Beschleunigungen nachfolgender Fahrzeuge, sofern diese sich im Umkreis des taktischen Fahrzeugumfelds (vgl. Abschn. 3.4) befinden. Daraus ergeben sich folgende Anpassungen und Erweiterungen im Vergleich zu Abschn. 3.3.2:

- In das angepasste MOBIL-Anreizkriterium (Entscheidungskriterium) werden die Beschleunigungen aller Fahrzeuge hinter dem Ego-Fahrzeug, die sich in dessen taktischen Fahrzeugumfeld befinden, einbezogen.
- Unterschiede der Fahrzeuge in Antrieb, Masse und Verbrauch werden kumuliert über den jeweiligen fahrzeugspezifischen Höflichkeitsfaktor p_n konfiguriert

Mit den genannten Anpassungen resultieren daraus für MOBIL folgende geänderte Ungleichungen für einen hypothetischen Spurwechsel nach rechts (Gl. (6.1)) und nach links (Gl. (6.2)):

$$L \rightarrow R : (\tilde{a}_c - a_c) + \sum_{n \in \text{alle Fzg.}} [p_n \cdot (\tilde{a}_n - a_n)] > \Delta a_{th} - \Delta a_{bias} \quad (6.1)$$

$$R \rightarrow L : (\tilde{a}_c - a_c) + \sum_{n \in \text{alle Fzg.}} [p_n \cdot (\tilde{a}_n - a_n)] > \Delta a_{th} + \Delta a_{bias} \quad (6.2)$$

Durch diese Anpassungen werden nun die Beschleunigungen aller Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld berücksichtigt. Durch die Einführung eines fahrzeugspezifischen Höflichkeitsfaktors p_n (s. Gl. (3.4)) kann jedes Fahrzeug z.B. abhängig von seiner Masse oder weiteren Eigenschaften individuell bewertet werden. Der Höflichkeitsfaktor wird daher als Gewichtungsfaktor p_n für jedes einzelne Fahrzeug im taktischen Fahrzeugumfeld verstanden.

Modellparameter MOBIL	Wert
Höflichkeitsfaktoren p_n	1
Hemmschwelle Δa_{th}	$0,1 m/s^2$
Rechtsfahrgebot Δa_{bias}	$0,3 m/s^2$

Tabelle 6.2.: Initial eingesetzte Modellparameter des MOBIL

6.2. Auswahl der Manöver

Ausgehend von der Definition des Begriffes Manöver aus Abschn. 3.2.5 und der Aufstellung der Manöver von [Nag94; Töl96; Sie03; OFK92] in Abb. 3.2 werden die für das Konzept des Assistenten notwendigen Fahrmanöver auf mehrspurigen und baulich getrennten Straßen ausgewählt. Michon [Mic85] führt die Einteilung von Fahrmanövern in vier unterschiedlichen Ebenen durch, von denen die unteren drei an das Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Donges (vgl. Abb. 2.2) erinnern:

- Verhaltensebene
- strategische Ebene
- taktische Ebene
- operative Ebene

Im Folgenden findet eine Einschränkung auf taktische Fahrmanöver, welche nach [Mic85] der taktischen Ebene angehören, statt, da die konzipierte Assistenzfunktion der Bahnführungsebene angehört.

Ausgehend von einer Spezialisierung auf reine mehrspurige und baulich getrennte Straßen (Autobahnen und ähnliche Straßen), auf denen das Konzept nur Anwendung finden kann, lassen sich die expliziten Grundmanöver auf die folgenden reduzieren:

- Beschleunigen (positiv / negativ)
- Spurwechsel (links / rechts)

Das erste Manöver betrifft die Längsdynamik, das zweite bezieht sich auf die Querdynamik. Werden jedoch die unterschiedlichen Richtungen (rechts, links, beschleunigen, bremsen) getrennt betrachtet ergeben sich daraus insgesamt vier Grundmanöver.

Aus diesen vier Grundmanövern lassen sich anschließend komplexere Manöver zusammensetzen. Zum Beispiel setzt sich ein Überholmanöver aus folgenden Grundmanövern zusammen:

- Beschleunigen positiv
- Spurwechsel links
- Spurwechsel rechts
- Beschleunigen negativ

Die expliziten Manöver werden durch die impliziten ergänzt [Sch12]. Hiervon kommen die folgenden im Konzept des Energieeffizienz-Assistenten zum Einsatz:

- Fahrspur folgen
- Geschwindigkeit halten
- Abstand halten

Ebenfalls lassen sich diese drei Manöver in Längs- und Quermanöver aufteilen. *Fahrspur folgen* beispielsweise nimmt nur Einfluss auf die Querführung des

Fahrzeugs nur die Längsführung betreffen. Weiterhin existieren auch Kombinationen aus expliziten und impliziten Manövern. Beispielsweise lässt sich in Längsrichtung des Fahrzeugs das implizite Manöver *Geschwindigkeit halten* mit dem expliziten Manöver *Spurwechsel rechts* in Fahrzeugquerrichtung kombinieren.

6.3. Konzept und Einordnung

Ausgehend von der vernetzten Energieeffizienzmetrik *Connected Efficiency*, deren Prognosemöglichkeiten auf Grund ihrer Berechnungsgrößen nur sehr eingeschränkt bestehen, werden für das entwickelte Konzept die beiden angepassten Modelle aus Abschn. 6.1.1 und Abschn. 6.1.2 als Basis eingesetzt. Die Modelle in Kombination erlauben es nun die Beschleunigungen für einen ausreichenden Zeitraum abzuschätzen und anschließend eine Entscheidung für das nächste vorgeschlagene Manöver zu treffen. Das damit entwickelte Gesamtkonzept des Energieeffizienz-Assistenten (Abb. 6.3) ist unterteilt in die Teilkonzepte Assistenzfunktion (Abschn. 6.3.1) und dazugehörige simulative Evaluierungsumgebung (Abschn. 6.3.2). Das Konzept des kollektiven Energieeffizienz-Assistenten umfasst die reine Funktionalität, die benötigt wird, um einem Fahrer eine visuelle Unterstützung zur Auswahl seiner unmittelbar folgenden Fahrmanöver auf Grundlage einer kollektiven Energieeffizienz zu bieten.

Der Übergang zum Konzept der Evaluierungsumgebung findet exakt an den Stellen statt, an denen eine Implementierung im realen Fahrzeug ebenfalls die gleiche Schnittstelle bereitstellt. Damit wird erreicht, dass die Assistenzfunktion sowohl in einer simulierten Evaluierungsumgebung, wie auch im realen Fahrzeug ohne Anpassungen betrieben werden kann. Aus diesem Grund richtet sich der Aufbau und der Datenaustausch nach den Vorgaben des in Abschn. 2.4 entwickelten IDAL-Modells, wodurch die Komponenten dem Fahrzeug in der Bahnführungsebene des Drei-Ebenen-Modells nach Donges (s. Abb. 2.2) zugeordnet sind.

6. Konzept eines Energieeffizienz-Assistenten im taktischen Fahrzeugumfeld

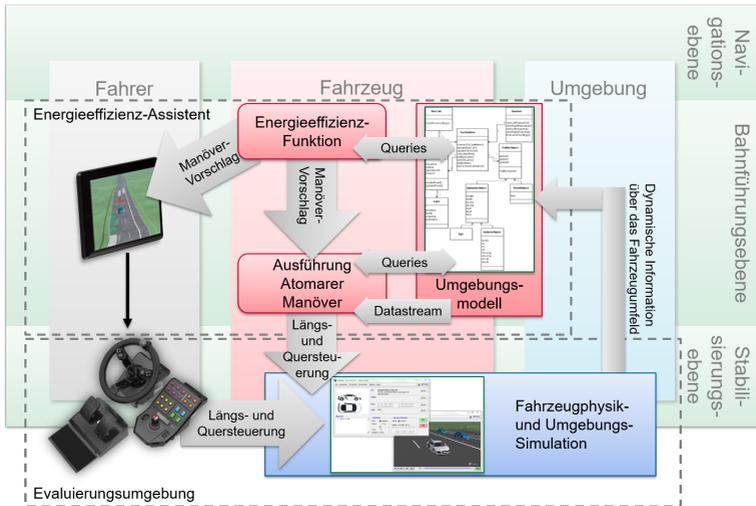


Abbildung 6.3.: Gesamtübersicht über den mit der Simulationsumgebung gekoppelten Energieeffizienz-Assistenten (Aufbauend auf Abb. 2.2)

6.3.1. Konzept des kollektiven Energieeffizienz-Assistenten

Das Konzept für den Energieeffizienz-Assistenten setzt voraus, dass jederzeit alle relevanten Informationen über das taktische Fahrzeugumfeld im *Umgebungsmodell* aktuell und konsistent vorliegen. Es bildet damit ein virtuelles Abbild der aktuellen Verkehrssituation aus Sicht des Fahrzeugs, in dem sich die Assistenzfunktion befindet. Als *Umgebungsmodell* wird für den gewünschten Funktionsumfang eine Implementierung benötigt, die mindestens folgende Artefakte berücksichtigt:

- Strecke mit Fahrspuren
- Verkehrsobjekte (Spur, Abstand, Geschwindigkeit)
- Spur, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs

Die dynamischen Daten, die benötigt werden, um das Umgebungsmodell während der Laufzeit zu befüllen, werden aus der simulierten Evaluierungsumgebung (unterer Bereich in Abb. 6.3), welche das taktische Fahrzeugumfeld und die Fahrzeugbewegung berechnet, ausgelesen. Für eine reale Fahrzeugintegration müssen diese Informationen über geeignete Sensorik und ggf. zusätzlicher Fahrzeugkommunikation ermittelt, fusioniert und im Umgebungsmodell aktualisiert werden.

Über eine Abfrage-Schnittstelle (*Queries* vgl. Abschn. 2.4.2) kann die *Energieeffizienz-Funktion* die Inhalte aus dem Umgebungsmodell abfragen und somit auf Größen wie die Beschleunigungen und Geschwindigkeiten der umliegenden Verkehrsteilnehmer zugreifen. Den Kern der *Energieeffizienz-Funktion* bilden die Berechnungen der beiden erweiterten Verhaltensmodelle IDM und MOBIL aus Abschn. 6.1.1 und Abschn. 6.1.2. Damit werden für jedes Fahrzeug im taktischen Fahrzeugumfeld (jedes erfasste Fahrzeuge im *Umgebungsmodell*) mit dem erweiterten IDM dessen zukünftige Beschleunigung prognostiziert. Dies wird für die drei aufgeführten Fälle aus Abschn. 6.1.1 durchgeführt und fließt anschließend in die MOBIL Berechnungsgleichungen ein, um die Entscheidung zu treffen, auf welche Fahrspur gewechselt bzw. ob auf der aktuellen verblieben werden soll. Aus der IDM Berechnung für das Ego-Fahrzeug entsteht zusätzlich die vorgeschlagene Beschleunigung/Verzögerung für das eigene Fahrzeug.

Für den Assistenten werden zwei Verwendungsalternativen konzeptioniert, wovon bei der einen die vorgeschlagenen Manöver selbstständig durch das Fahrzeug ausgeführt werden (Kontrollfluss über *Ausführung Atomarer Manöver*) und bei der zweiten ein menschlicher Fahrer die Vorschläge visuell präsentiert bekommt. Somit wird zum einen die *Energieeffizienz-Funktion* automatisiert in einer simulierten Umgebung in vielzähligen Szenarien evaluierbar und optimierbar. Zum anderen wird die optimierte Funktion in einem Demonstrationsaufbau durch einen menschlichen Fahrer erlebbar.

Der ermittelte Fahrmanöver-Vorschlag wird je nach Verwendungsalternative entweder an die *Ausführung Atomarer Manöver* Komponente oder an die Visualisierung für einen menschlichen Fahrer weitergeben. Die Realisierung der *Bahnführung* nach dem IDAL-Modell (s. Abb. 2.7) setzt daher die in Abschn. 6.2 aufgelisteten expliziten und impliziten Grundmanöver um. Für die visuelle Anzeige des Fahrzeugumfelds und der Fahrvorschläge in Form von den vier Manövern *Spurwechsel links*, *Spurwechsel rechts*, *Beschleunigen* und *Abbremsen* (vgl. Abschn. 6.2) wird eine Tablet-App eingesetzt, welche die Informationen in 3D-Grafiken darstellt. Ein konzeptionelles Mock-Up zur Visualisierung stellt die Abb. 6.4 dar. Die Übermittlung der Informationen an das Tablet findet über die standardisierte Netzwerkverbindung über Wireless LAN statt, während als Übertragungsprotokoll Extensible Markup Language (XML) verwendet wird. Die technische Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Implementierung und Erläuterung der visuellen Anzeigeelemente ist Abschn. 8.1.6 zu entnehmen.

Die automatisierte Ausführung der Manöver realisiert die vier expliziten Grundmanöver und die drei impliziten Manöver für eine Fahrt auf mehrspurigen Straßen aus Abschn. 6.2 und ist auf eine simulierte Umgebung zugeschnitten. Für den Einsatz im realen Fahrzeug muss dieses Modul fahrzeugspezifisch auf Basis der im Fahrzeug existierenden Sensoren integriert werden, um die Manöver sicher auszuführen. Die *Ausführung Atomarer Manöver* nimmt die vorgeschlagenen Fahrmanöver als Eingabe entgegen und setzt diese gegebenenfalls um, sofern es aus verkehrssicherheitstechnischen Gesichtspunkten möglich ist. Auf die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Implementierung und den dazugehörigen Zustandsgraphen wird näher in Abschn. 8.1.3 eingegangen.

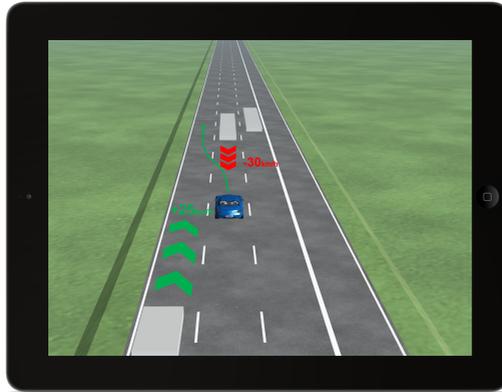


Abbildung 6.4.: Mock-Up für die Visualisierung des Energieeffizienz-Assistenten mit Spurwechsel-Empfehlung

6.3.2. Konzept der Evaluierungsumgebung

Die Evaluierungsumgebung umfasst den Part der *Umgebung* (neben dem Fahrer und des Fahrzeugs) nach der Kategorisierung aus dem Drei-Ebenen-Modell aus Abb. 2.2 und stellt somit ein virtuelles taktisches Fahrzeugumfeld sowie eine Simulation der Fahrzeugbewegung des Ego-Fahrzeugs dar. Da die Evaluierungsumgebung als Gegenpart des Energieeffizienz-Assistenten agiert, sind für die beiden Verwendungsalternativen aus Abschn. 6.3.1 die passenden Schnittstellen anzubieten. Diese sind zum einen die Steuerung über Lenkrad und Pedale, um das Ego-Fahrzeug mit integriertem Assistent manuell zu bedienen. Zum anderen lässt sich die Evaluierungsumgebung direkt über die Ausführung der atomaren Manöver des Energieeffizienz-Assistenten beeinflussen, wodurch sich eine vollkommen automatisierte Testausführung realisieren lässt.

Mit der Einordnung der Assistenzfunktion in die Bahnführungsebene, sind auch bei der zugehörigen Evaluierungsumgebung nur die Ebenen Stabilisierung und Bahnführung (vgl. Abb. 2.7) abzudecken. Auf Grund des Abstraktionsansatzes des IDAL-Modells (Abschn. 2.4) sind nur Ebenen auf gleicher und untergeordneten Stufen erforderlich; übergeordnete Ebenen, hier die Naviga-

tionsebene, werden nicht benötigt. Da der Fokus der Evaluierungsumgebung auf der Stabilisierungsebene für das Ego-Fahrzeug und auf der Bahnführungsebene für die Umgebung liegt, eignen sich hierfür Simulationswerkzeuge, welche die Fahrdynamik von Fahrzeugen, eine zu befahrende Strecke und den Umgebungsverkehr simulieren können. Nach der Auswahl eines geeigneten Simulationstools (vgl. Abschn. 3.3.4) werden die Verbindungsschnittstellen zum Energieeffizienz-Assistenten entwickelt, so dass die Simulation der Umgebung die vom Assistenten benötigten Informationen für das *Umgebungsmodell* bereitstellt.

6.4. Zusammenfassung des Kapitels

Das Kap. 6 stellte das Konzept eines kollektiven Energieeffizienz-Assistenten, sowie einer zugehörigen Evaluierungsumgebung vor. Dazu wurden zu Beginn die notwendigen Erweiterungen und Anpassungen der Verhaltensmodelle IDM und MOBIL aus der Verkehrssimulation für den hiesigen Einsatz beschrieben. Darauf folgte eine Eingrenzung der Fahrmanöver auf den erforderlichen Umfang für mehrspurige und baulich getrennte Straßen. Kern dieses Kapitels bildete die Beschreibung des Konzepts des Energieeffizienz-Assistenten und seiner Evaluierungsumgebung, welches auf der funktionalen Strukturierung des IDAL-Modells aus Kap. 2 basiert und dabei das taktische Fahrzeugumfeld nach der Definition aus Kap. 3 umfasst. Für eine effiziente Entscheidungsfindung ist es allerdings erforderlich die Verhaltensmodell IDM und MOBIL optimal einzustellen. Folglich wird im anschließenden Kapitel eine Optimierung der Modellparameter durchgeführt.

7. Modellparameteroptimierung des taktischen Energieeffizienz-Assistenten

Im vorangegangenen Kap. 6 wurde das Konzept eines Energieeffizienz-Assistenten für taktische Entscheidungen auf mehrspurigen Straßen mit den Erkenntnissen aus Kap. 4 und Kap. 5 entwickelt. In diesem Kapitel wird zu Beginn die entwickelte Methode zur Ableitung realistischer Fahrscenarien aus Videoaufzeichnungen für den Einsatz in der Simulation aufgezeigt. Daraufhin folgt eine Darstellung der zur Optimierung eingesetzten Grundscenarien und ihrer Variationsmöglichkeiten. Anschließend wird eine Analyse und Optimierung des Assistenzfunktions-Konzepts aus Kap. 6 basierend auf den erläuterten Szenarien durchgeführt, um die am besten geeigneten Modellparameter für IDM und MOBIL zu ermitteln. Letztendlich werden die dadurch erhaltenen Resultate zusammengefasst und für eine prototypische Realisierung in Kap. 8 interpretiert.

7.1. Realistische Fahrscenarien aus Videoaufzeichnungen

Die bisherigen Betrachtungen basierten auf Szenarien, welche synthetisch erstellt wurden. Zur Analyse und Interpretation realistischer Szenarien mehrspuriger Straßen wurde eine Methode und eine entsprechende prototypische Realisierung entwickelt, die es erlauben mit einfachen Kameras hinter der Scheibe (eine in Fahrtrichtung und eine nach hinten gerichtete) reale, aufgezeichnete Szenarien unter idealen Bedingungen (Sicht, Wetter, Straßenverlauf,

Fahrzeugbewegung etc.) in ein simulierbares Testszenario zu überführen. Diese Methode wurde auf dem FISITA World Automotive Congress 2016 durch den Autor der vorliegenden Ausarbeitung vorgestellt [Kra+16b].

Der Fokus bei dieser Methode liegt nicht auf einer vollständigen und fehlerfreien Erfassung aller Informationen, sondern auf frei verfügbaren Implementierungen und Modellen, die unter idealen Bedingungen ein, für die hier benötigte Anwendung, brauchbares Resultat liefern. Daher kommen hierbei Basisalgorithmen zum Einsatz die nur unter den gegebenen Randbedingungen eines idealisierten Autobahnabschnitts verwendbar sind. Es existieren zur Erkennung von Fahrbahnmarkierungen, Fahrzeugen und weiteren Objekten bereits deutlich bessere Methoden und Algorithmen (z.B. Neuronale Netze), die allerdings auch einen erhöhten Aufwand in der Sensorik oder der Informationsverarbeitung erfordern. Somit dienen die vorgestellten und implementierten Algorithmen lediglich der exemplarischen Darstellung der Gesamtmethode, wie sich realistische Szenarien in eine simulierte Umgebung überführen lassen, und sollten je nach Bedarf durch optimierte und anwendungsspezifische Algorithmen ersetzt werden.

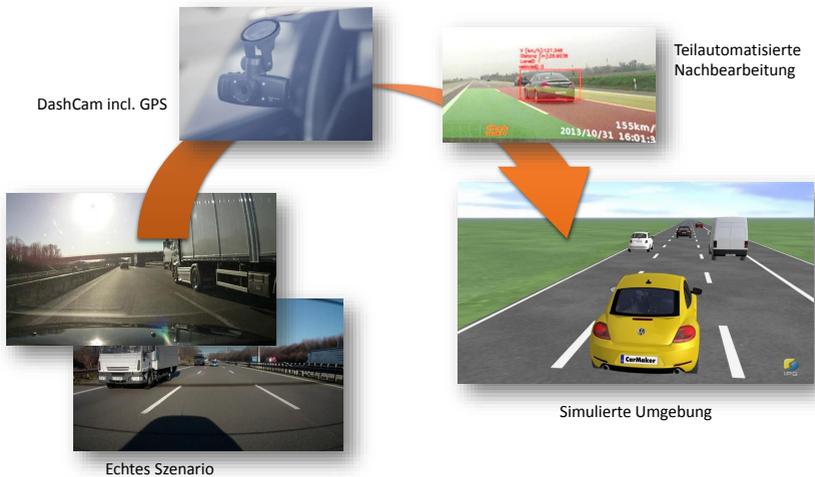


Abbildung 7.1.: Überführung realistischer Fahrscenarien aus Videoaufzeichnungen [Kra+16b]

Abb. 7.1 zeigt schematisch das Vorgehen, um aus geeigneten Videoaufzeichnungen ein verwendbares Testszenario für den Fahrdynamiksimulator IPG CarMaker zu erhalten.

1. Aufzeichnung aus einem Fahrzeug, das mit zwei Kameras ausgestattet ist
2. Eingesetztes Equipment: Einfache Kamera mit integriertem Global Positioning System (GPS) Empfänger
3. Daten-Weiterverarbeitung auf einem Desktop-PC mithilfe von Ansätzen des maschinellen Lernens
4. Übersetzung in ein Testszenario und Ausführung im Simulationswerkzeug

Die Weiterverarbeitung der aufgezeichneten Daten ist in Abb. 7.2 dargestellt. Als erstes werden die beiden Aufzeichnungen für Front und Heck synchronisiert. Da das eingesetzte Equipment keine Verbindungsmöglichkeit untereinander oder mit dem Fahrzeug besitzt, kann die Synchronisation nicht während der Aufzeichnungsphase durchgeführt werden. Hintergrund zur Verwendung dieser Aufzeichnungsgeräte und nicht eines umgebauten Fahrzeuges ist, dass möglichst viele Aufzeichnungen mit geringem Aufwand durchführbar sind. Daher sind folgende Anforderungen gegeben:

- Der Einsatz in herkömmlichen Serienfahrzeugen ohne Umbaumaßnahmen sollte möglich sein.
- Es sollen keine gesonderten Aufzeichnungsfahrten erforderlich sein, sondern Aufzeichnungen auf alltäglichen Fahrten ermöglicht werden.
- Der Ein- und Ausbau des Equipments sollte möglichst schnell erfolgen.

Nach der Synchronisation werden einmalig vier Punkte von bekanntem Abstand auf der Straßenebene ausgewählt. Mithilfe der Auswahl der Punkte ist es möglich das Videomaterial in eine Vogelperspektiven-Ansicht zu überführen, in der sich die Abstände in der Straßenebene linear zur Anzahl der Pixel verhalten, um damit Distanzen in der Straßenebene messen zu können. Dieser Schritt ist allerdings nur einmal für ein Fahrzeug-Setup notwendig, da darüber die Einbauwinkel der Kameras ermittelt werden können. Einflüsse durch Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs werden in der vorgestellten Methode nicht berücksichtigt oder ausgeglichen. Weiterhin können durch Änderungen in der Straßensteigung Abweichungen zwischen der Straßenebene und der ausgewählten Ebene für die Vogelperspektive entstehen. Da durch den geplanten Einsatz nicht alle Situationen vollständig und exakt benötigt werden, sind

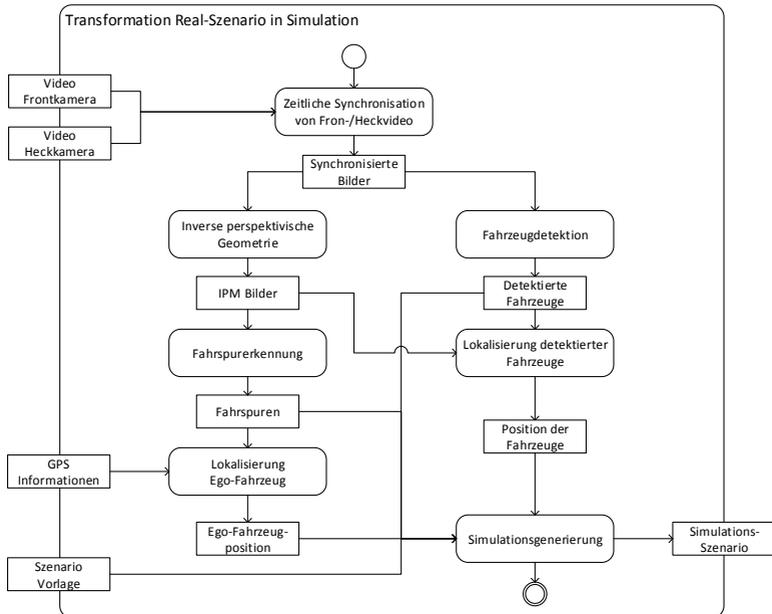


Abbildung 7.2.: Transformationsprozess zur Überführung realer Szenarien nach [Kra+14; Kra+16b]

diese Einschränkungen der beschriebenen Methode und die Annahme eines ebenen Straßenmodells ausreichend. Anschließend kann für alle Aufzeichnungen, die mit der gleichen Kamerakonstellation durchgeführt wurden, diese Einstellung verwendet werden. Die einzelnen Teilschritte (Aktionen) aus Abb. 7.2 werden in den folgenden Unterabschnitten näher erläutert.

7.1.1. Synchronisation der Aufzeichnungen

Die Synchronisierung der Aufzeichnungen wird mithilfe der zugehörigen Audiospur durchgeführt. Da diese (Video und Audio) zeitlich Frame-genau synchron sind, kann das Audiosignal dafür verwendet werden. Auf Grund der Umgebungsgeräusche sowohl im Fahrzeug, als auch außerhalb des Fahrzeugs sind die beiden Audioaufzeichnungen nahezu identisch. Daher lässt sich aus den beiden Audiospuren mit der Kreuzkorrelationsfunktion ein Versatz der Samples ermitteln, die wiederum in Kombination mit der Sample-Rate auf einen zeitlichen Versatz in Sekunden schließen lassen. [Kir15; Kra+16b]

7.1.2. Inverse perspektivische Geometrie

Die Überführung des perspektivischen Bildes in eine Vogelperspektive auf die Straßenebene erfordert eine Transformations-Matrix, mithilfe derer die Videos Bild für Bild transformiert werden können [Tuo+10]. Diese Transformations-Matrix lässt sich durch die Auswahl vierer Punkte auf der Straßenebene (vgl. gelbe Markierungen in Abb. 7.3) mit bekanntem Abstand ermitteln. Die Abstände für Spurbreite und Markierungslänge sind für deutsche Autobahnen bekannt und können daher als Markierungspunkte verwendet werden [Str08]. Eine visuelle Unterstützung bei der Auswahl der Punkte bieten rote Hilfslinien (vgl. Abb. 7.3), die direkt nach dem Setzen zweier Punkte im aufgezeichneten Bild eingeblendet werden. So kann unmittelbar festgestellt werden, ob sich die Geraden über zwei ausgewählte Punkte mit den Markierungslinien decken. Andernfalls lassen sich die Punkte neu definieren und nachjustieren.

Das Ergebnis eines Inverse Perspective Mapping (IPM)-transformierten Bildes aus den Videoaufzeichnungen ist in Abb. 7.4 dargestellt. Über die Transformation ist nun sichergestellt, dass Abstände und Abmessungen in den Bildern über

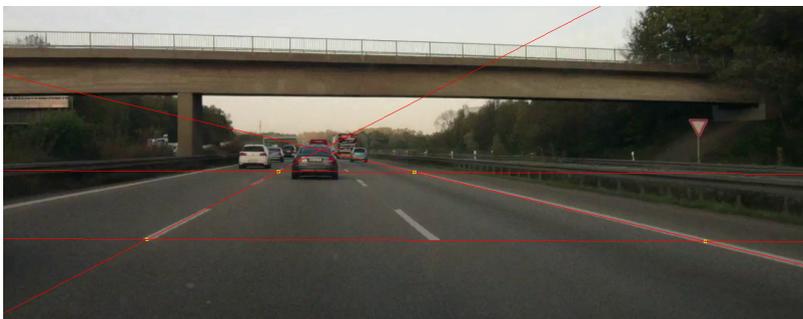


Abbildung 7.3.: Auswahl der Punkte mit bekannten Abständen [Kra+16b]

die Anzahl der Pixel bestimmt werden kann. Es besteht eine Proportionalität zwischen Entfernung in Metern und Abstand in Pixeln [Tuo+10].

Mit Hilfe dieser Darstellungen lassen sich die Abstände zwischen den Fahrzeugen, sowie die daraus resultierenden Geschwindigkeiten ermitteln. Die Geschwindigkeitsangaben berechnen sich folglich aus den bestimmten Abständen und den bekannten zeitlichen Abfolgen der aufgezeichneten Bilder aus den Videos von exakt 40ms (bei 25 Bildern pro Sekunde). [Fri14; Kra+14]

7.1.3. Fahrzeugdetektion

Basierend auf dem Originalbild der Aufzeichnungen (vgl. Abb. 7.3) wird die Erkennung der sich im Umfeld befindlichen Fahrzeuge durchgeführt. Für diesen Schritt kommen bestehende Algorithmen des maschinellen Lernens zum Einsatz, die auf einer frei verfügbaren Datengrundlage und somit auf trainierten Modellen arbeiten. [Fri14]

Daher findet die konkrete Implementierung mithilfe des Algorithmus nach Felzenszwalb [Fel+10] statt, für den bereits ein trainiertes Modell zur PKW-Detektion als Erkennungsgrundlage existiert. Dieser Algorithmus skaliert (zur Erkennung unterschiedlich großer Objekte) und vergleicht jedes Bild des aufgezeichneten Videos mit dem trainierten PKW-Modell, indem das Gesamtbild



Abbildung 7.4.: IPM-transformiertes Bild [Kra+16b]

in kleine Teile segmentiert und diese mit den angelernten Elementen auf Übereinstimmung geprüft werden. Das hinterlegte Modell hält dazu keine ganzheitlichen Fahrzeugbilder bereit, sondern verwendet einen Teile-basierten¹ Ansatz, der die Erkennung anhand von Kanten durchführt und damit den Vorteil mit sich bringt, auch teilweise verdeckte Fahrzeuge zu erkennen. [Fel+10]

Öffentliche und bereits trainierte Datensätze zur PKW-Detektion sind aus der PASCAL Visual Object Challenge (VOC) [Eve+06] verfügbar, die auch hier eingesetzt werden, um das zeit- und ressourcenintensive Training einzusparen. Darunter befindet sich ein trainiertes Modell für PKWs, welches die Erkennungsgrundlage der hier eingesetzten Fahrzeugdetektion bildet.

Zur Erkennung von LKWs wurde ein eigenes Modell erzeugt, welches auf Basis von eigenen Kameraaufzeichnungen angelernt wurde, da keine bestehende Datenbasis offen zur Verfügung stand. Auf Grund der, im Vergleich zum PKW-Modell, geringen Diversität und Anzahl der zum Training verwendeten Bilder,

¹ Teile-basiert bedeutet, dass die Objekte anhand von Kanten erkannt werden und sie sich wie bei einem Puzzle aus Einzelteilen von Kanten zusammensetzen lassen.

ist das erzeugte Modell in seiner Erkennungsgenauigkeit nicht vergleichbar mit dem PKW-Modell.

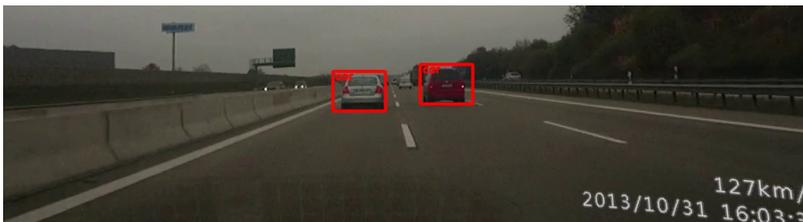


Abbildung 7.5.: Fahrzeugdetektion: Rote Bounding Box für das Modell *car* [Kra+14]

In Abb. 7.5 ist ein entzerrtes Bild einer Videoaufzeichnung dargestellt, in dem zwei Fahrzeuge der Klasse *car* erkannt und mit roten Rechtecken, den sogenannten Bounding Boxes, markiert wurden. Die Bounding Boxes grenzen den Bereich, in dem eine Detektion stattgefunden hat, ein. Bei einer Detektion wird von der OpenCV Bibliothek immer eine Klassen-ID, die Koordinaten des Detektionsbereichs und ein Score ermittelt. Die Klassen-ID gibt an, mit welchem trainierten Modell die Detektion stattgefunden hat und der Score macht eine Aussage über die Güte der Erkennung. Je höher der Score, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um ein korrekt erkanntes Objekt vom Typ der Klassen-ID handelt. Im vorliegenden Fall, wurden positive Scores als erkanntes Objekt akzeptiert und negative Scores verworfen.

7.1.4. Fahrspurerkennung

Die Fahrspurerkennung findet auf Basis des IPM-Bildes statt, welches aus der Transformation nach Abschn. 7.1.2 hervorgeht. Es werden nur Markierungen, die nahezu senkrecht verlaufen (zwischen 85 Grad und 95 Grad), für die Spurerkennung berücksichtigt, da auf den mehrspurigen Straßen keine Abzweige, Kreuzungen oder enge Kurven betrachtet werden. [Fri14; Kra+14]

Als Fahrspurerkennung kommt die probabilistische Hough-Transformation zum Einsatz [Hou62; GMK99]. Dazu findet zunächst eine Filterung nach Fahrbahnmarkierungen statt, welche anschließend durch morphologische

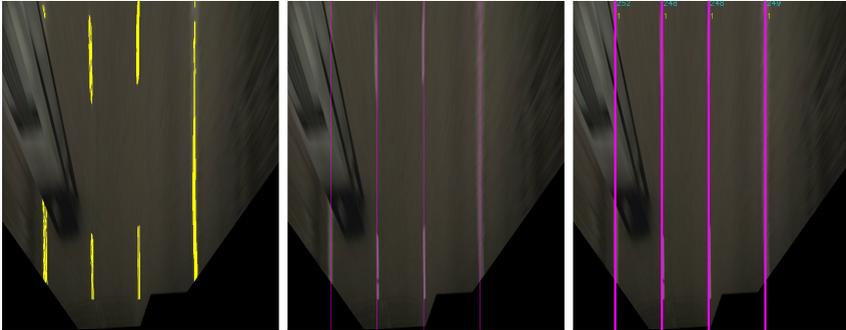


Abbildung 7.6.: Links: Ergebnis der probabilistischen Hough Transformation, Mitte: Zusammenfassung vertikaler Linien im gleichen x-Achsenabschnitt (Hypothesen), Rechts: über mehrere Frames verfolgte und bestätigte Fahrbahnmarkierungen [Fri14]

Operation [BLF16] von Löchern befreit werden (Abb. 7.6 linke Darstellung). Auf die dadurch extrahierten Fahrbahnmarkierungen werden Geraden gelegt (Abb. 7.6 Mitte), um damit eine durchgehende Fahrspurmarkierung zu erhalten. Um die Genauigkeit und Erkennungswahrscheinlichkeit zu steigern, werden die erzeugten Geraden, die näher als 15 Pixel zusammen liegen und über mehrere Bilder hinweg bestehen, zu einer Fahrspurmarkierung zusammengefasst (Abb. 7.6 rechte Darstellung). [Fri14]

7.1.5. Lokalisierung der Fahrzeuge

Die Lokalisierung der Fahrzeuge auf der Straße bzw. relativ zum Ego-Fahrzeug wird nun anhand der ermittelten Informationen aus der Fahrzeug- und Fahrspurdetektion durchgeführt, indem die Fahrzeuge (Ego und andere Teilnehmer in der Umgebung) auf den erkannten Fahrspuren entsprechend ihrer relativen Abstände positioniert werden.

Ego-Fahrzeug: Das Ego-Fahrzeug befindet sich stets in der Mitte des IPM Bildes, wodurch es sich auf der Fahrspur bewegt, welche sich, in horizontaler Richtung betrachtet, ebenfalls in der Mitte befindet. Anhand der detektieren

Fahrspuren links und rechts davon, findet die Zuordnung auf linke, mittlere oder rechte Fahrspur statt. Der Ansatz berücksichtigt dabei zwei- und dreispurige, in eine Richtung befahrene Straßen, was dem überwiegenden Anteil von deutschen Autobahnen entspricht.

Fahrzeuge in der Umgebung: Hierfür werden die Bounding Boxen aus der Fahrzeugdetektion ebenfalls ins IPM Bild transformiert. Als Referenzpunkt für das Verkehrsobjekt wird der Mittelpunkt der unteren Begrenzungslinie der Bounding Box verwendet und anhand der ermittelten Fahrspurmarkierungen diskret der Fahrspur relativ zu der des Ego-Fahrzeugs zugewiesen.

7.1.6. Simulationsgenerierung

Nach Extraktion der relevanten Informationen (vgl. Abschn. 7.1.2 bis Abschn. 7.1.5) aus den Videoaufzeichnungen mit bestehenden Algorithmen und Verfahren, werden diese logisch miteinander in Relation gebracht. Hinzu kommen die aufgezeichneten GPS Informationen über das Ego-Fahrzeug, um die absolute Geschwindigkeit für dieses zu erhalten. Es wird somit für jedes erkannte Fahrzeug incl. des Ego-Fahrzeugs ein Objekt instanziiert, welches mit den ermittelten Daten (Relativgeschwindigkeit, Relativabstand, Relative Fahrspur) als Attribute angereichert wird. Bei der Erzeugung und Attributsanreicherung werden die instanziierten Objekte über den zeitlichen Verlauf der Videoaufzeichnung verfolgt und jeweils mit einer gleichförmigen Bewegung auf eine Startposition zurückgerechnet. Wird z.B. ein Fahrzeug erst in Sekunde 20 des Szenarios detektiert, so ist es nicht erst ab diesem Zeitpunkt existent, sondern führt von Beginn des Szenarios bis zum besagten Zeitpunkt eine mit konstanter Geschwindigkeit ablaufende Bewegung aus. [Fri14]

Das eingesetzte Simulationswerkzeug CarMaker verwendet ein textbasiertes Format zur Beschreibung der Szenarien (vgl. Abschn. 3.2.4). Darin werden Strecke, Ego-Fahrzeug, Verkehr und weitere Umgebungsbedingungen beschrieben. Für das Ego-Fahrzeug und die Verkehrsobjekte können Manöver definiert werden, welche die Bewegungsabläufe in Längs- und Querrichtung vorgeben. Es wird somit eine Szenario-Vorlage verwendet, welches bereits die Szene (vgl. Abschn. 3.2.2) und die Konfiguration des Ego-Fahrzeugs enthält. Die Anzahl der im Video erkannten Spuren wird der Szenario-Vorlage hinzugefügt. Analog wird für jedes erkannte Verkehrsobjekt ein neuer Eintrag in der Vorlage erstellt, welcher gleichzeitig mit Manövern für dieses Objekt befüllt

wird. Die entwickelte Implementierung erstellt auf eine Sekunde diskretisiert je einen Manöver-Eintrag, der die zu diesem Zeitpunkt bestehende Geschwindigkeit und Position (Fahrspur) beinhaltet. Die Bewegungen innerhalb der 1-Sekunden-Intervalle werden durch das Simulationswerkzeug interpoliert.

7.2. Basisszenario und ihre Variationen

Um die Empfehlungen des Energieeffizienz-Assistenten analysieren und die Werte der Modellparameter optimieren zu können, werden realistische Fahrscenarien benötigt, auf welche die Analyse und Optimierung angewandt werden kann. Daher werden realistische Fahrscenarien, im Weiteren auch als Basisszenario bezeichnet, mithilfe von Videoaufzeichnungen und der in Abschn. 7.1 beschriebenen Methode für die simulative Betrachtung abgeleitet.

7.2.1. Basisszenario

Unter dem Begriff Basisszenario wird das aus Aufzeichnungen abgeleitete oder manuell erstellte und unveränderte Szenario verstanden. Durch Veränderung der Anfangszustände einzelner Fahrzeuge wie etwa der Differenzabstände und -geschwindigkeiten lassen sich aus einem Basisszenario unzählige Varianten ableiten. Alle gemeinsam besitzen den gleichen Ablauf z.B. den eines Überholenszenarios wie in Abb. 7.7 dargestellt, nur dass die Abstände und Geschwindigkeiten zu Beginn verschieden sind.

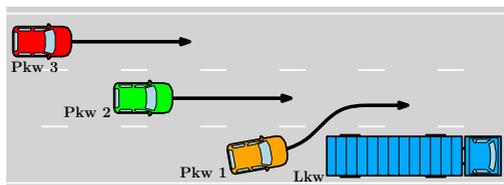


Abbildung 7.7.: Beispiel eines Basisszenario: Überholenszenario [Hen15]

In dem dargestellten Beispiel bewegen sich der *Lkw* und *Pkw 1* mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 90km/h. Der *Pkw 2* besitzt eine Anfangsgeschwindigkeit von 150km/h und *Pkw 3* beginnt mit 160km/h.

7.2.2. Variationsvielfalt

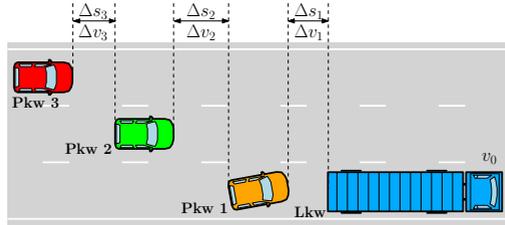


Abbildung 7.8.: Variation des Basisszenarios: Überholmanöver [Hen15]

Alle Variationsparameter für ein einzelnes Fahrzeug, welche sich auf die Bewertungsmetrik (CE) aus Kap. 4 auswirken, sind in Tabelle 5.1, Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 aufgeführt. Diese Parameter wurden bereits in Kap. 5 anhand der Veränderung an einem einzigen Fahrzeug mithilfe der Sensitivitätsanalyse evaluiert. Werden nun aber mehrere Fahrzeuge zusammen auf einem Streckenabschnitt betrachtet, bestehen Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen ihnen. Dadurch entstehen verschiedene Konstellationen, die als Variationen eines Szenarios verstanden werden. Es handelt sich für jede Beziehung zwischen zwei Fahrzeugen, wie in Abb. 7.8 zu sehen ist, um die Parameter Differenzabstand, Differenzgeschwindigkeit und Differenzspur.

Bei Betrachtung des Basisszenarios aus Abb. 7.7 mit den Variationsmöglichkeiten aus Abb. 7.8, welche lediglich aus Differenzgeschwindigkeiten und -abständen bestehen, entstehen daraus ca. 10,6 Mio. Varianten alleine als Ausgangssituation für das betrachtete Basisszenario (vgl. Gl. (7.1), Gl. (7.2)). Hierzu werden die Grenzen aus Tabelle 7.1 verwendet.

$$\prod_0^{\#Parameter} [((Obergrenze - Untergrenze) / Schrittweite) + 1]^{\#Fahrzeuge - 1}$$

	Untergrenze	Obergrenze	Schrittweite	Einheit
Abstände	10	200	10	<i>m</i>
Geschwindigkeiten	0	100	10	<i>m/s</i>

Tabelle 7.1.: Variationsgrenzen und -schrittweite für die Szenariovariation

(7.1)

$$[\frac{(200 - 10)}{10} + 1]^3 \cdot [\frac{(100 - 0)}{10} + 1]^3 = 10.648.000 \quad (7.2)$$

Auf Grund der Vielzahl an Variationsmöglichkeiten lässt sich nicht jede mögliche Konstellation betrachten und dafür ein optimales energieeffizientes Manöver definieren. Um für jede mögliche Eingangssituation eines Szenarios eine Entscheidung zu definieren, wäre es erforderlich, sämtliche Grundszenerarien und ihre Variationen zu erstellen, mit jedem denkbaren Manöver zu simulieren und das Simulationsergebnis zu bewerten. Dies entspricht rein für die Simulation des obigen Basisszenario mit den aufgezählten Variationen auf einem aktuellen Desktop-PC² einer Dauer von ca. 370 Tagen³ für nur eine einzige Manöverentscheidung. Hierbei wurde eine Szenariendauer von 30 Sekunden und eine durchschnittlich erreichte Simulationsbeschleunigung von zehnfacher Geschwindigkeit gegenüber dem realen Ablauf des Szenarios zugrunde gelegt. Ein heuristischer Optimierungsalgorithmus zur Reduktion der benötigten Simulationszeit lässt sich hierzu beispielsweise nicht verwenden, da nicht der Frage nachgegangen wird, für welche Szenarienkonstellation (Variation des Basisszenario) die Energieeffizienz maximal wird, sondern welche Entscheidung (auszuführendes Manöver) bei einer bestehenden Konstellation getroffen werden soll (vgl. Abschn. 1.2). Es wird für jede Variation des Basisszenarios eine Lösung, welches Manöver ausgeführt werden soll, gesucht.

Da es aktuell aus den beschriebenen Gründen nicht möglich ist mit vertretbarem Aufwand, alle denkbaren Szenarien incl. ihrer Variationen auf diese Weise zu analysieren und bzgl. ihrer Energieeffizienz zu bewerten, kommt das Konzept des Energieeffizienz-Assistenten aus Kap. 6 zum Einsatz. Da der Assistent

² Desktop-PC bestehend aus einem Intel i7 mit 2,6 GHz (vier Kerne) und 8 GB Arbeitsspeicher

³ Abschätzung der Simulationszeit: $10.648.000 \cdot 30s/10 \cdot 1d/86.400s = 369,72\text{ Tage}$

seine Entscheidungen auf Grundlage der verwendeten Modelle aus Abschn. 3.3.2 und den Modellparametern (Abschn. 6.1.1 und Abschn. 6.1.2) errechnet, ist eine Optimierung bzgl. der kollektiven Energieeffizienz auf mehrspurigen Straßen durch die Einstellung dieser Modellparameter durchzuführen. Diese Optimierung findet auf Grundlage des Basisszenarios aus Abschn. 7.2.1 statt, worauf im folgenden Abschn. 7.3 näher eingegangen wird.

7.3. Optimierung der IDM und MOBIL Modellparameter

Für eine optimierte Einstellung der Modellparameter aus Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2, um damit die Feinabstimmung des Energieeffizienz-Assistenten aus dem vorherigen Kapitel durchzuführen, wird der entworfene Assistent bzgl. der kollektiven Energieeffizienz optimiert. Dazu wird die Energieeffizienz-Funktion und die automatisierte Manöverausführung (vgl. Abschn. 6.3) aus Sicht des Pkw 2 (grünes Fahrzeug) im Basisszenario aus Abb. 7.7 eingesetzt. Anschließend werden die Modellparameter mithilfe eines genetischen Optimierungsalgorithmus [Hei94] auf das Szenario eingestellt. Dazu wird im ersten Schritt das Optimierungsproblem (Abschn. 7.3.1) mit dem zu optimierenden Vektor (Abschn. 7.3.2) erstellt und die Zielfunktion (Abschn. 7.3.4) beschrieben.

Zunächst wird das Basisszenario (Abschn. 7.2.1) teilautomatisiert aus Videoaufzeichnungen mithilfe des Vorgehens aus Abschn. 7.1 in ein simulierbares Szenario überführt. Weiterhin wird das Konzept des Energieeffizienz-Assistenten aus Abschn. 6.3 in eine Optimierungsschleife integriert. Diese Erweiterung ist in Abb. 7.9 zu sehen und ermöglicht es verschiedene Optimierungsalgorithmen der Global Optimization Toolbox von Matlab auf die Modellparameter anzuwenden.

7.3.1. Optimierungsaufgabe

Die Optimierungsaufgabe besteht nun darin, geeignete Werte für die einstellbaren Modellparameter (Abschn. 7.3.2) zu finden, welche den Assistenten bezüglich mehrspuriger Straßen und mehrerer Verkehrsteilnehmer optimieren.

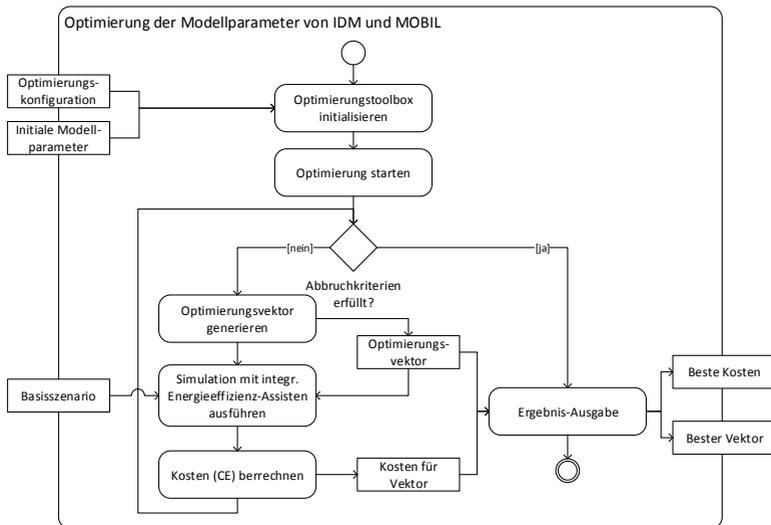


Abbildung 7.9.: Aktivitätsdiagramm zur Optimierung der Modellparameter

Dieser Schritt ist vergleichbar mit z.B. der Applikation eines ESP-Steuergeräts auf ein spezifisches Fahrzeug und daher erforderlich, um die anfänglich eingesetzten Literaturwerte der ursprünglichen Verkehrsmodelle (IDM und MOBIL) auf die betrachteten Szenarien anzupassen.

Es werden dazu eine Vielzahl an Szenarien-Simulationen durchgeführt, in denen stets die Konfiguration des Assistenten (die Modellparameter, nicht das Szenario) variiert und am Ende überprüft wird, ob die neue Einstellung zu einer besseren oder schlechteren Manöver-Entscheidung führen, indem die Connected Efficiency Werte miteinander verglichen werden. Somit besteht die Aufgabe darin, das Maximum der Zielfunktion (vgl. Abschn. 7.3.4), welche der CE Metrik aus Gl. (4.22) entspricht, zu finden, während ständig eine vollständige Szenario-Simulation mit neu generierten Parametersätzen (vgl. Abschn. 7.3.2) durchgeführt wird.

7.3.2. Zu optimierende Parameter

Die veränderlichen Größen der betrachteten Optimierungsaufgabe setzen sich aus den Modellparametern (vgl. Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2) zusammen, welche eine optimierte Abstimmung des Energieeffizienzassistenten bzgl. der kollektiven Energieeffizienz auf mehrspurigen Straßen ermöglichen. Alle einstellbaren Modellparameter von IDM und MOBIL werden im s.g. Optimierungsvektor zusammengefasst, dessen Dimension sich aus der Anzahl der zu optimierenden Parameter ergibt.

Da sich im betrachteten Szenario vier Fahrzeuge befinden und die Gewichtung der einzelnen Fahrzeuge Inhalt der Optimierung sind, wird auch für jedes ein eigenständiger Gewichtungsfaktor p_n benötigt, welcher dem Höflichkeitsfaktor aus Abschn. 6.1.2 entspricht. Die weiteren Modellparameter werden für alle Fahrzeuge gleich behandelt und optimiert, um für diese ein gemeinsames Optimum zu finden, da eine Unterscheidung der Fahrzeugtypen ausschließlich über den Gewichtungsfaktor p_n durchgeführt wird. Somit setzt sich der Optimierungsvektor aus folgenden Modellparametern zusammen:

1. Zeitabstand T_{folge}
2. Mindestabstand s_0
3. Beschleunigungsexponent δ
4. Wunschgeschwindigkeit v_0

5. Maximalbeschleunigung a_{\max}
6. Komfortable Verzögerung b_{komf}
7. Beschleunigungshysterese für einen Spurwechsel Δa_{th}
8. Beschleunigungsdifferenz für das Rechtsfahrgebot Δa_{Bias}
9. 4x Gewichtungsfaktor p_0, p_1, p_2, p_3

Folglich ergibt sich der Optimierungsvektor x in Gl. (7.3) zu:

$$x = [T_{\text{folge}}, s_0, \delta, v_0, a_{\max}, b_{\text{komf}}, \Delta a_{\text{th}}, \Delta a_{\text{Bias}}, p_0, p_1, p_2, p_3] \quad (7.3)$$

Die zugehörigen Wertebereiche der Modellparameter sind wie folgt definiert:

$$0 \leq p_n \leq 1; s_0 > 0; T_{\text{folge}} > 0; \delta > 0; 0 < a_{\max} \leq 4; 0 < b_{\text{komf}} \leq 4 \quad (7.4)$$

7.3.3. Optimierungsverfahren

Zur Optimierung der Modellparameter kommt ein numerisches Verfahren [Pap15] zum Einsatz, welches die Berechnung der Kosten durch Simulation ausführt. Eine analytische Optimierung ist nicht möglich, da sich die Bewegungen der Fahrzeuge auf Grund vieler Variationsmöglichkeiten nicht durch eine mathematische Funktion darstellen lassen. Es wird stets ein komplettes Szenario zeitdiskret in 1ms-Schritten simuliert und die Kosten, welche durch die Connected Efficiency Metrik aus Kap. 4 gegeben sind, berechnet. Dadurch wird die Connected Efficiency für jede erzeugte Parameterkonstellation (vgl. Abschn. 7.3.5) ermittelt und miteinander verglichen. Die Optimierung wird anhand des Fahr Szenarios aus Abschn. 7.2.1 durchgeführt.

7.3.4. Zielfunktion

Das eingesetzte Optimierungsverfahren besteht darin, stets einen neuen Optimierungsvektor (vgl. Abschn. 7.3.2) zu erzeugen, mithilfe dessen einen Simulationslauf durchzuführen und diesen anschließend mit einer Metrik (Connected Efficiency) zu bewerten. Somit besteht die Zielfunktion aus dem Aufruf und der Bewertung eines Simulationslaufs mit einem erzeugten Vektor für die Modellparameter. Die hier zur Modellparametereinstellung eingesetzte Zielfunktion wurde durch das Matlab-Skript aus Lst. 7.1 realisiert.

```
1 function [kosten] = zielfunktion (x)
2   % Setze den Optimierungsvektor im Workspace
3   assignin('base', 'optVec', x);
4
5   % Starte den Simulationslauf
6   cmguicmd('StartSim', 0);
7   % Warten, bis die Simulation startet
8   while str2double(cmguicmd('SimStatus',200)) ~= 0
9     pause(1);
10  end
11  % Warten, bis die Simulation beendet ist
12  while str2double(cmguicmd('SimStatus',200)) ~= -2
13    pause(1);
14  end
15
16  % Lese die Connected Efficiency Werte aus dem Workspace
17  connEff = evalin('base', 'connEff');
18
19  % Gebe den letzten Wert der Connected Efficiency als Kosten
20  % zurueck
kosten = connEff(end);
```

Listing 7.1: Matlab Quellcode der Zielfunktion der Optimierung

Die Zielfunktion wird nun so lange mit einem neuen Optimierungsvektor aufgerufen, bis die Endbedingung (vgl. Abschn. 7.3.5) erreicht ist. Während der Simulation des Szenarios wird durchgehend der Connected Efficiency Wert *connEff* berechnet und der Endwert als Ergebniswert *kosten* zurück an die Global Optimization Toolbox übergeben.

7.3.5. Eingesetzter Optimierungsalgorithmus

Zur Suche einer für das Fahrscenario geeigneten Einstellung der Modellparameter aus Abschn. 7.3.2 wird der genetische Algorithmus der Matlab *Global Optimization Toolbox* eingesetzt [Mat14]. Dieser wird mit den folgenden aufgelisteten Einstellungen und der Zielfunktion aus Abschn. 7.3.4 verwendet:

- Erzeugung der Population: Nonlinear Feasible - Zufällig innerhalb der gesetzten Grenzen aus Gl. (7.4)
- Skalierung: Rank - Sortierte Rangfolge
- Selektion: Stochastic uniform - Stochastische Gleichverteilung

- Mutation: Adaptive feasible - angepasst zufällig
- Rekombination: Intermediate - Zufällig gewichteter Durchschnitt der Eltern
- Abbruchkriterium: Stall generations - Gleichbleibender durchschnittlicher Fitness-Funktionswert

Weiterhin werden für eine Population 200 Individuen festgelegt. Dies bedeutet, dass zu Beginn der Optimierung 200 zufällige, verschiedene Optimierungsvektoren (Individuen) generiert werden und bei jedem weiteren Optimierungsschritt (Generation) 200 neue Individuen durch Kombination und Mutation der vorhergehenden Generation erzeugt werden. Die Erzeugung neuer Individuen, auch als Population bezeichnet, findet so lange statt, bis die Kostenabweichung aus der Zielfunktion zur vorangegangenen Population geringer als das eingestellte Delta von 0,01 ist.

Die Kombination basiert darauf, dass ein Teil eines Individuums mit einem anderen Teil eines weiteren Individuums kombiniert wird, um ein neues Individuum zu erstellen. Die Mutation hingegen ändert einzelne Werte eines Individuums auf Werte, die bisher nicht in einer Generation zu finden sind, um mögliche lokale Extrempunkte zu verlassen. [Hei94]

7.3.6. Ergebnisse aus der Optimierung

Die Optimierung aus Abschn. 7.3 auf Basis des Basisszenarios aus Abschn. 7.2.1 führt zu folgendem Ergebnisvektor (bestes Individuum):

$$x_{best} = [1,6, 39,1, 7,8, 109,6, 4,4, 4,1, 1,1, 0,8, 0,8, 0,6, 0,6] \quad (7.5)$$

Daraus lassen sich folgende Werte für die Modellparameter ermitteln:

1. Zeitabstand $T_{folge} = 1,6s$
2. Mindestabstand $s_0 = 39,1m$
3. Beschleunigungsexponent $\delta = 7,8$
4. Wunschgeschwindigkeit $v_0 = 109,6km/h$
5. Maximalbeschleunigung $a_{max} = 4m/s^2$
6. Komfortable Verzögerung $b_{komf} = 4m/s^2$
7. Beschleunigungshysterese für einen Spurwechsel $\Delta a_{th} = 4,1m/s^2$
8. Beschleunigungsdifferenz für das Rechtsfahrgebot $\Delta a_{Bias} = 1,1m/s^2$

9. Gewichtungsfaktoren $p_0 = 0,8$, $p_1 = 0,8$, $p_2 = 0,6$, $p_3 = 0,6$

Mit diesen Werten als Konfiguration für die Modellparameter wird im Weiteren der Vergleich zwischen dem Manöver aus dem Basisszenario Abb. 7.7 und der Manöverentscheidung des Energieeffizienzassistenten durchgeführt.

7.4. Einsparpotential des Energieeffizienz-Assistenten

Mit den optimierten Modellparametern (s. Abschn. 7.3.6) für den Energieeffizienz-Assistenten können nun simulative Vergleiche zwischen aufgezeichneten (realen) Basisszenarien (z.B. Abschn. 7.2.1) und den jeweils gleichen Szenarien, allerdings mit den berücksichtigten Manövervorschlägen des Assistenten, durchgeführt werden, um damit das Einsparpotential abzuschätzen.

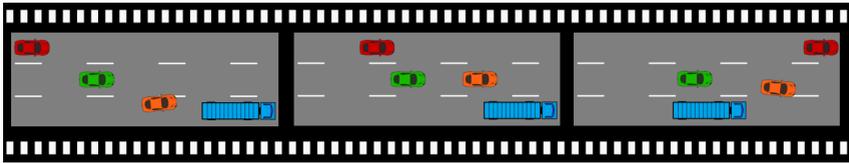


Abbildung 7.10.: Aus Aufzeichnungen überführtes reales Fahrscenario

Dafür wird mit dem Vorgehen aus Abschn. 7.1 ein reales Fahrscenario für die simulative Betrachtung überführt. Das reale, aufgezeichnete Szenario, welches schematisch in Abb. 7.10 als Bilderfolge dargestellt ist, wurde aus dem Blickwinkel des grünen Fahrzeuges aufgezeichnet. Es zeigt, dass nach dem Ausscheren des orangenen Fahrzeuges das Ego-Fahrzeug (grün) auf der mittleren Spur verharrt und abbremst auf die Geschwindigkeit des (im zweiten Bild) vorausfahrenden Fahrzeuges, während das rote Fahrzeug auf der linken Spur mit bestehender Geschwindigkeit weiterfährt.

Somit wird im ersten Simulationslauf (Abb. 7.13 oberer Pfad) dieses Szenario unverändert simuliert und die Connected Efficiency berechnet. Der grüne Pkw führt schließlich im unveränderten simulierten Szenario das Manöver *Abbremsen* auf die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges aus. Im

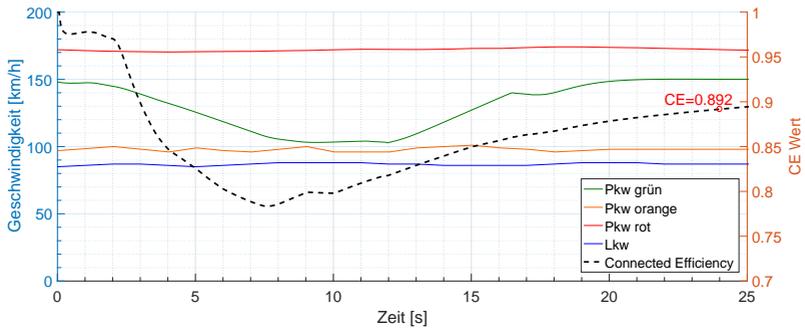


Abbildung 7.11.: Geschwindigkeitsprofil des realen, aufgezeichneten Fahrzenarios

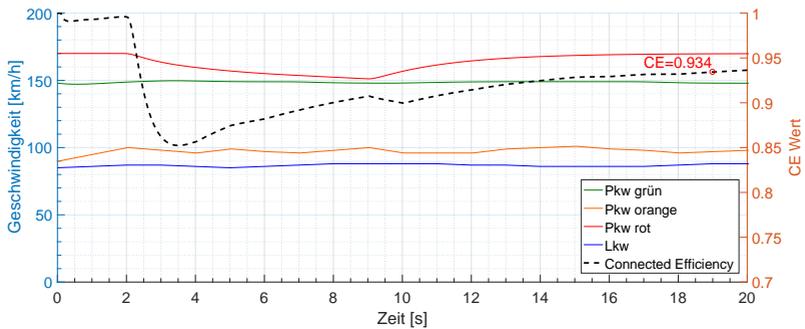


Abbildung 7.12.: Geschwindigkeitsprofil des Szenarios mit Manöver-Entscheidung über den Energieeffizienzassistenten

Größe	Wert	Einheit
Geschwindigkeit (Pkw orange)	98	km/h
Geschwindigkeit (Pkw grün)	148	km/h
Geschwindigkeit (Pkw rot)	171	km/h
Geschwindigkeit (Lkw)	86	km/h
Distanz (Pkw rot zu grün)	93	m
Distanz (Pkw grün zu orange)	112	m
Luftdichte ⁴ ρ_0	1,226	kg/m ³
Luftwiderstandsbeiwert ⁵ c_w	0,37	
Rollwiderstandsbeiwert ⁶ f_R	0,017	
Fahrzeugstirnfläche ⁷ A_{Fx}	2,25	m ²
Fahrzeugmasse ⁸ m_F	1.463,00	kg
Erdbeschleunigung g	9,81	m/s ²

Tabelle 7.2.: Benötigte Werte für den energetischen Vergleich

zweiten Simulationslauf (Abb. 7.13 unterer Pfad) wird für das Ego-Fahrzeug (grüner Pkw) die Manöverentscheidung dem Energieeffizienz-Assistenten aus Kap. 6 überlassen und automatisiert ausgeführt. Der Assistent entscheidet sich bei der betrachteten Fahrzeugkonstellation allerdings für das *Spurwechsel links* Manöver, welches das von hinten herannahende Fahrzeug (rot) zum Bremsen zwingt. Durch diese vom ursprünglich aufgezeichneten Szenario abweichende Manöverentscheidung des Energieeffizienz-Assistenten entsteht ein energetischer Unterschied der beiden Manöverentscheidungen, welche mithilfe der aus Kap. 4 bekannten CE Metrik quantifiziert werden.

Wird die CE Berechnung unter Verwendung der Parameter aus Tabelle 7.2 durchgeführt, erhält man für das unveränderte Szenario, wie es in Abb. 7.10 dargestellt ist, den Effizienzwert **0,892** (CE Wert am Ende des Szenarios aus Abb. 7.11) und für das Szenario, welches die auf Energieeffizienz optimierte Entscheidung beinhaltet, den Wert **0,934** (CE Wert am Ende des Szenarios aus Abb. 7.12) aus der Simulation (vgl. Tabelle 7.3). Nach der Definition der Connected Efficiency aus Kap. 4 ist das Szenario mit dem größeren Wert das kollektiv energieeffizientere. Da es sich hierbei um eine relative Angabe handelt, gibt die Differenz der beiden Ergebniswerte direkt die relative Energieeinsparung an. Somit besteht für dieses Szenario eine Energieeinsparung von **4,2%**.

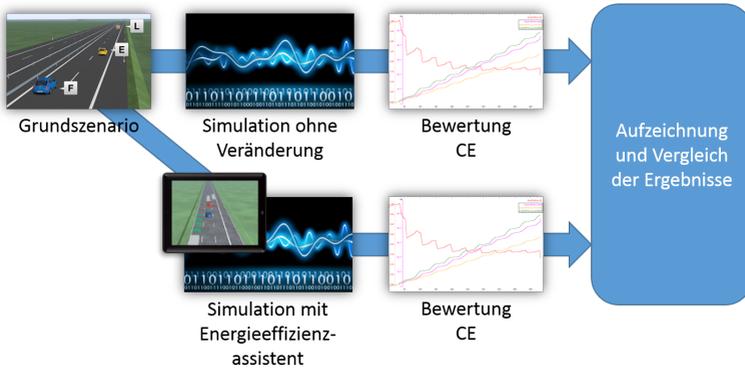


Abbildung 7.13.: Simulatives Vorgehen zur Ermittlung des Einsparpotentials durch den Energieeffizienzassistenten

	reales Szenario	mit Assistenten
Manöver (Pkw grün)	Bremsen	Spurwechsel links
CE Wert	0,892	0,934
Differenz	0,042 = 4,2%	

Tabelle 7.3.: Ergebniswerte aus dem energetischen Vergleich

Ein Vergleich der Manöverentscheidung für das betrachtete Szenario mit dem Entscheidungsdiagramm Abb. D.2 aus Anh. D zeigt, dass der Energieeffizienz-Assistent im Sinne der CE eine korrekte Entscheidung getroffen hat. Um das Potential abschätzen zu können, welches das vorgestellte Konzept des Energieeffizienz-Assistenten bieten kann, wurde eine Variation des ursprünglich aufgezeichneten Szenarios vorgenommen, indem die Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge *Pkw grün* und *Pkw rot* variiert wurden (vgl. Anh. D). Ein Ergebnisauszug ist der Tabelle 7.4 zu entnehmen. Darin aufgelistet sind die variierten Geschwindigkeiten der beiden Pkws, jeweils der CE Wert für das Manöver *Bremsen* und *Spurwechsel* des grünen Pkws. Die letzte Spalte beinhaltet für jede Variation das mögliche Potential, das besteht, wenn das „bessere“ Manöver im Gegensatz zum „schlechteren“ Manöver gewählt wird. Mit der Annahme, dass die aufgelisteten Geschwindigkeitskonstellationen

gleichverteilt auftreten⁹, kann der Mittelwert über die einzelnen Potentiale gebildet werden. Somit ergibt sich ein mittleres Potential von **6,8%** zur Energieeinsparung für das betrachtete Überhol Szenario (vgl. Abb. 7.10) auf einer dreispurigen Fahrbahn.

Unter der Annahme, dass die untersuchte Verkehrssituation in unterschiedlicher Ausprägung (differierende Abstände und Geschwindigkeiten) einmal auf zehn gefahrenen Kilometern auftritt, reduziert sich die relative Energieeinsparung für dieses Szenario um den Faktor zehn auf 0,68%. Diese prozentuale Einsparung bezieht sich auf Grund der kollektiven Effizienzbestimmung auf alle Verkehrsteilnehmer, was eine gesamtwirtschaftliche Auswirkung bedeutet. Mit einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von zehn Litern Kraftstoff auf 100 gefahrene Kilometer (gemittelt über alle Fahrzeuge) und einer Fahrleistung von 230,6 Mrd. Kilometern nur auf deutschen Autobahnen im Jahr 2014¹⁰ ergibt sich eine Kraftstoffeinsparung von ca. 160 Mio. Litern Kraftstoff pro Jahr in Deutschland. Ebenso lässt sich aus den Angaben für den CO₂-Ausstoß für einen Liter Benzin von 2,32 Kilogramm [Ise10] und einen Liter Diesel von 2,65 Kilogramm [Ise10] ein Reduzierungspotential von ca. 390 Mio. Kilogramm CO₂ pro Jahr nur auf dem deutschen Autobahnnetz (Stand 2014) abschätzen. Für die Abschätzung wurde auf der Datengrundlage des statistischen Bundesamtes [KB15] eine Verteilung zwischen Benzin- und Diesel-Fahrzeugen jeweils 50 Prozent zugrunde gelegt.

7.5. Zusammenfassung des Kapitels

Zu Beginn des Kap. 7 wurde ein Vorgehen vorgestellt, welches es erlaubt von Videoaufzeichnungen aus einem Fahrzeug heraus reale Szenarien auf mehrspurigen Straßen für eine Simulation abzuleiten. Ausgehend davon wurden Basisszenarien zur Analyse und Optimierung des Energieeffizienz-Assistenten aus Kap. 6 erläutert und ihre Variationsmöglichkeiten aufgezeigt. Anhand eines aufgezeichneten und abgeleiteten Szenarios (Überholvorgang auf einer dreispurigen deutschen Autobahn) wurde eine Optimierung der Modellparameter

⁹ Auf Grund unterschiedlichster Verkehrs- und Streckenbedingungen konnte eine reale Verteilung nicht ermittelt werden. Die Annahme der Gleichverteilung entspricht nicht der realen Verteilung.

¹⁰ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155732/umfrage/fahrleistung-auf-autobahnen-in-deutschland> (abgerufen am: 02.12.2016)

Pkw grün [km/h]	Pkw rot [km/h]	CE für Bremsen	CE für Spurwechsel	Einspar- potential
100	100	0,999	0,999	0,0%
100	120	0,999	0,999	0,0%
100	140	0,999	0,999	0,0%
100	160	0,999	0,999	0,0%
100	180	0,999	0,999	0,0%
120	120	0,999	0,999	0,0%
120	140	0,993	0,985	0,8%
120	160	0,994	0,924	7,0%
120	180	0,994	0,853	14,1%
120	200	0,995	0,781	21,4%
140	140	0,949	0,998	4,9%
140	160	0,952	0,980	2,8%
140	180	0,955	0,917	3,8%
140	200	0,958	0,847	11,1%
140	220	0,962	0,775	18,7%
160	160	0,896	0,998	10,2%
160	180	0,902	0,978	7,6%
160	200	0,909	0,917	0,8%
160	220	0,917	0,849	6,8%
160	240	0,924	0,779	14,5%
180	180	0,847	0,998	15,1%
180	200	0,857	0,978	12,1%
180	220	0,868	0,918	5,0%
180	240	0,880	0,853	2,7%
180	260	0,891	0,787	10,4%
Mittelwert				6,8%

Tabelle 7.4.: Ergebnistabelle zur Szenariovariation: Variation der Geschwindigkeiten des grünen und roten Pkws; CE jeweils für das Bremsmanöver und das Spurwechselmanöver des grünen Pkws, sowie das gegebene Einsparpotential

des Assistenten bzgl. der in Kap. 4 entwickelten kollektiven Energieeffizienz-Metrik durchgeführt und den Assistenten für die nachfolgenden Abschätzungen damit entsprechend parametrisiert. Am Ende des Kapitels fand eine Abschätzung des Einsparpotentials durch den Einsatz eines nach Kap. 6 konzipierten Assistenten statt.

8. Prototypische Realisierung des taktischen Energieeffizienz-Assistenten

In diesem Kapitel wird eine prototypische Realisierung des Energieeffizienz-Assistenten aus Kap. 6 vorgestellt. Diese soll dem Fahrer eine visuelle Darstellung des taktischen Fahrzeugumfeldes, nach der Definition aus Abschn. 3.4, und Manörovorschläge zur aktuellen Situation offerieren, so dass der Fahrer bei seinen taktischen Entscheidungen auf mehrspurigen Straßen unterstützt werden kann. Hierzu wurde ein Demonstrator aufgebaut, welcher es ermöglicht, in einer simulierten Umgebung das Konzept des Energieeffizienz-Assistenten zu erproben.

Zur Realisierung des vorgestellten Konzepts wird die Programmiersprache C++ eingesetzt (vgl. Erkenntnisse aus Abschn. 2.6), da diese in der Entwicklung eingebetteter Systeme etabliert ist und gleichzeitig eine objektorientierte Programmierung ermöglicht [Bar99]. Dadurch lassen sich Konzepte wie die Datenkapselung der Objektorientierung bzgl. des Einsatzes von verschiedenen abstrakten Daten über das IDAL-Modell aus Kap. 2 umsetzen und gleichzeitig die Implementierung aus der Simulation auf die gewünschte Zielplattform im Fahrzeug portieren. Die entwickelte Implementierung des Energieeffizienz-Assistenten ist auf eine Intel x86-kompatible Hardware mit Windows als Betriebssystem zugeschnitten, da die Erprobung ausschließlich in einer simulierten Umgebung stattfindet. Der Informationsaustausch zwischen dem entwickelten Assistenten und dem Simulationswerkzeugs erfolgt über die Socket-basierte Application Online (APO)-Schnittstelle des Simulators (vgl. Abschn. 3.3.4).

8.1. Partitionierung der Implementierung

Die gesamte Verarbeitungskette des Energieeffizienz-Assistenten ist auf vier Threads¹ verteilt. Diese Aufsplittung in Threads wird benötigt, um die unterschiedlichen Teilfunktionen nach der Hierarchie des IDAL-Modells aus Abb. 2.7 voneinander unabhängig auszuführen. So wird einerseits die zyklische Aktualisierung des Umgebungsmodells (vgl. Abschn. 2.4.4) von der Entscheidungsfunktion des Energieeffizienz-Assistenten und andererseits die Teilfunktionen zur automatisierten Ausführung bzw. zur visuellen Anzeige der Fahrmanöver entkoppelt. Somit entstehen in dieser Realisierung vier in der Ausführung voneinander unabhängige Threads, die über Synchronisierungsschnittstellen wie Semaphoren² und Mailboxen³ gemeinsame Daten austauschen und zeitlich synchronisieren können. Bei den vier Threads handelt es sich um folgende:

1. Thread *Umgebungsmodell*: Realisierung des IDAL-Umgebungsmodells
2. Thread *EnergieEffizienzFunktion*: Realisierung der Energieeffizienz-Funktion aus Abb. 6.3
3. Thread *ManoeverAusfuehrung*: Realisierung atomarer Fahrmanöver aus Abb. 6.3
4. Thread *Visualisierung*: Implementierung zur Übermittlung der Informationen an das Anzeige-Tablet

Zusätzlich zu den vier Threads die auf dem Desktop-PC ausgeführt werden, wurde eine Tablet-App (Abschn. 8.1.6) für die Anzeige auf einem Android⁴ Gerät entwickelt. Im Zuge dessen wurde auf XML-Basis ein Datenformat entworfen, welches die zur Anzeige auf dem Tablet erforderlichen Informationen strukturiert vom Desktop-PC an die Tablet-App überträgt (Abschn. 8.1.5).

¹ Threads sind parallel laufende Programmsequenzen, die unabhängig voneinander ausgeführt werden

² Semaphore: Synchronisationskonzept für parallel ausgeführte Teilprogramme, zur zeitlichen Synchronisation

³ Mailbox: Datenaustauschkonzept zwischen Threads, zur Vermeidung gleichzeitiger Datenzugriffe und ungültiger Dateninhalte

⁴ Betriebssystem von Google für Mobile Geräte wie Tablets und Smartphones

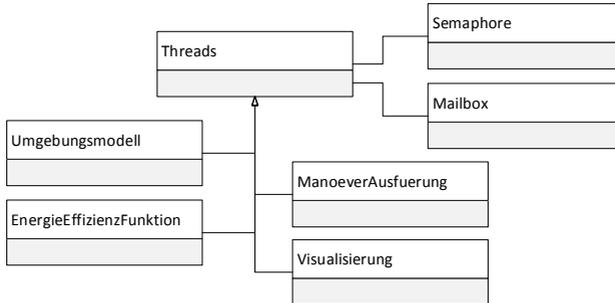


Abbildung 8.1.: Klassendiagramm: Übersicht über realisierte Threads des Energieeffizienz-Assistenten

8.1.1. Thread Umgebungsmodell

Der erste Thread ist dafür zuständig zyklisch die dynamischen Daten des Umgebungsmodells zu aktualisieren, strukturell aufzubereiten und für die anderen Threads verfügbar zu machen. Dazu werden die Informationen über die Klasse *ApoSchnittstelle* aus dem Fahrzeugsimulator IPG CarMaker ausgelesen und die erforderlichen Objekte in der Klasse *DataVault* erzeugt, gelöscht oder aktualisiert. Die Zusammenhänge dieses Threads sind im Klassendiagramm aus Abb. 8.2 dargestellt.

Betritt z.B. ein Fahrzeug das taktische Fahrzeugumfeld, wird im Umgebungsmodell ein neues Objekt von der Klasse *VerkehrsObjekt* instanziiert und mit den Eigenschaften des betreffenden Fahrzeugs gefüllt. Im umgekehrten Fall wird das Objekt gelöscht, sobald ein Fahrzeug das Umfeld verlässt oder aktualisiert, wenn sich seine Eigenschaften ändern. Ebenso findet für jede erkannte Fahrspur eine Instanziierung der Klasse *Fahrspur* statt. Für die Zustände und Eigenschaften des Ego-Fahrzeugs existiert stets eine Instanz der *EgoFahrzeug*-Klasse.

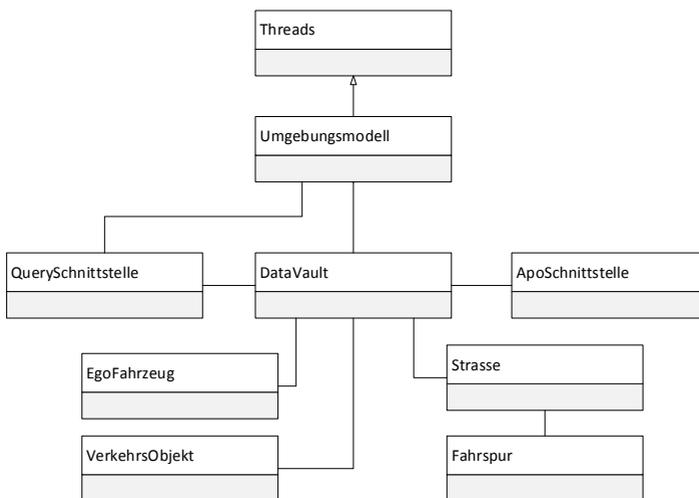


Abbildung 8.2.: Klassendiagramm zum Thread Umgebungsmodell

8.1.2. Thread EnergieEffizienzFunktion

Der Thread *EnergieEffizienzFunktion* implementiert die eigentliche Fahrfunktion zur Bestimmung des Fahrvorschlags. Dazu wird über die Abfrageschnittstelle *QuerySchnittstelle* eine Liste aller Fahrzeuge im taktischen Fahrzeugumfeld abgefragt (*getVehicleList()* in Abb. 8.3). Anschließend wird in der Schleife mit *getVehicleAttributes(vID)* in Abb. 8.3 für jedes Fahrzeug dessen aktueller Fahrzeugzustand (Position, Geschwindigkeit etc.) ermittelt.

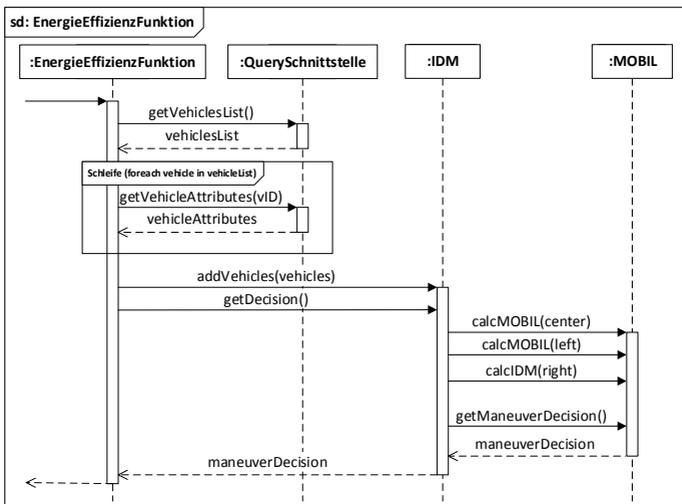


Abbildung 8.3.: Sequenzdiagramm zur Berechnung des Manöर्वorschlags im Thread *EnergieEffizienzFunktion*

Diese Informationen über alle ermittelten Fahrzeuge im Umfeld werden an die IDM Berechnungsklasse übergeben, welche für jedes Fahrzeug dessen zukünftige Beschleunigung berechnet (vgl. Abschn. 6.1.1). Mithilfe der vorherbestimmten Beschleunigungen wird auf der Grundlage von MOBIL (vgl. Abschn. 6.1.2) die Manöverentscheidung getroffen, ob die aktuelle Spur beibehalten, ein Spurwechsel nach links oder rechts durchgeführt wird (*calcMO-*

BIL(center), *calcMOBIL(left)* und *calcMOBIL(right)* in Abb. 8.3). Der ermittelte Vorschlag wird nach der Rückgabe an die *EnergieEffizienzFunktion*-Klasse einerseits per Nachrichtenbox an die Manöverausführung und andererseits an die Visualisierung übermittelt.

8.1.3. Thread ManoeverAusfuehrung

Der Thread *ManoeverAusfuehrung* realisiert die automatisierte und kollisionsfreie Ausführung der benötigten Manöver für mehrspurige und baulich getrennte Straßen (vgl. Abschn. 6.2):

- Spur halten
- Spurwechsel links
- Spurwechsel rechts
- Geschwindigkeit halten
- Abstand halten

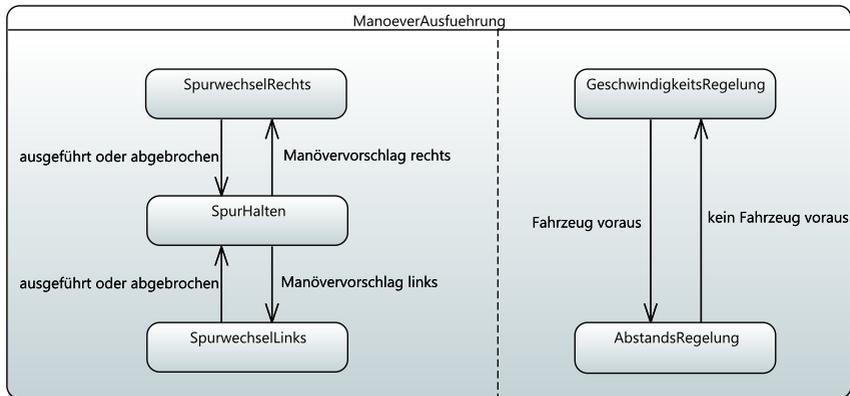


Abbildung 8.4.: Zustandsdiagramm des Threads *ManoeverAusfuehrung*

Die Zustandsübergänge zwischen den Manövern sind in dem Zustandsdiagramm in Abb. 8.4 dargestellt. Es findet eine parallele Ausführung der beiden übergeordneten Zustände *Laengsfuehrung* und *Querfuehrung* statt. In Längsrichtung wird die Bewegung des Fahrzeugs aus den Zuständen *Geschwindig-*

keitsRegelung und *AbstandsRegelung* zusammengesetzt. Während die Zustandsübergänge dadurch ausgelöst werden, dass ein Fahrzeug auf der gleichen Fahrspur vorausfährt und sich innerhalb des taktischen Fahrzeugumfelds befindet oder nicht.

Die Querrichtung setzt sich aus den Zuständen *SpurHalten*, *SpurwechselLinks* und *SpurwechselRechts* zusammen. Solange vom Thread *EnergieEffizienzFunktion* kein explizites Manöver zum Spurwechsel vorgeschlagen wird, befindet sich dieser Thread im impliziten Manöver *SpurHalten*. Bei *Manöर्वorschlag rechts* wird in den Querführungszustand *SpurwechselRechts* übergegangen. Kann dieser Vorschlag nicht kollisionsfrei (im Moment der Anforderung) ausgeführt werden, auf Grund von anderen Verkehrsteilnehmern, wird der Spurwechsel nicht ausgeführt bzw. sofort abgebrochen und in den Zustand *SpurHalten* zurück gewechselt. Gleichfalls findet der Zustandsübergang für den Fall statt, dass das vorgeschlagene Manöver erfolgreich abgeschlossen wurde, was bedeutet, dass das Fahrzeug vollständig auf die Zielspur gewechselt hat. Der Spurhaltevorgang erfolgt anschließend für die neue Fahrspur, auf die gewechselt wurde. Dieses Verhalten gilt analog für den *Manöर्वorschlag links*.

8.1.4. Thread Visualisierung

In dem Thread *Visualisierung* werden die grundlegenden Informationen über die Strecke, über andere Verkehrsteilnehmer, über den eigenen Bewegungszustand und die ermittelten Manöर्वorschläge in XML⁵ serialisiert und über einen Netzwerk-Socket versendet. Als Übertragungsprotokoll wird User Datagram Protocol (UDP) verwendet, da es vergleichbar wie bei einem Video-Stream relevanter ist, dass neue Informationen übermittelt und visualisiert werden, als ein verlorenes Paket erneut zu übermitteln. Da zyklisch mit 10 Herz dieser Thread die Übertragungsroutine startet, ist stets ein neues Paket mit allen relevanten Informationen zur Anzeige verfügbar.

Der Vorgang zur Übermittlung der Informationen für die Visualisierung auf der Tablet-App ist im Sequenzdiagramm in Abb. 8.5 dargestellt. Zuerst werden die Fahrspuren (*query(lanes)*) und die anderen Verkehrsteilnehmer (*query(tObjs)*)

⁵ XML erlaubt es Daten in einer strukturierten Form formalisiert darzustellen.

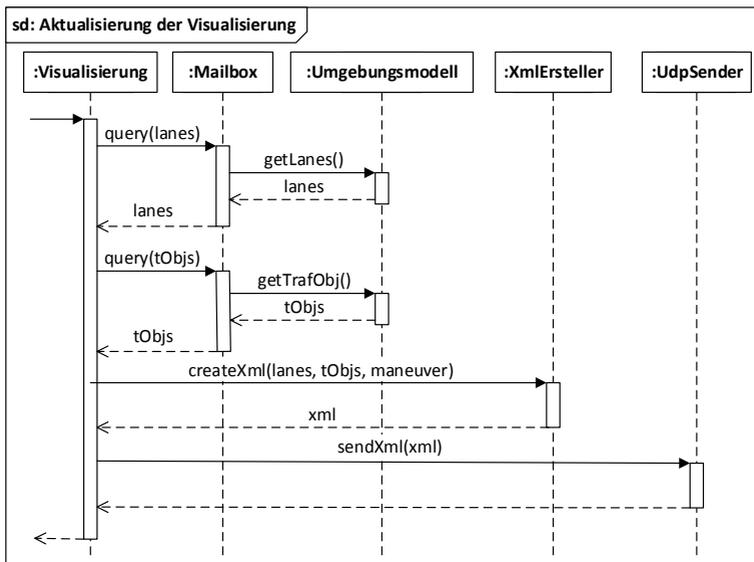


Abbildung 8.5.: Sequenzdiagramm für eine Aktualisierung der Visualisierung

zu dem jeweiligen Zeitpunkt aus dem Umgebungsmodell gelesen. Anschließend werden mit dem Funktionsaufruf *createXml()* die aktuellen Informationen in das in Abschn. 8.1.5 beschriebene Format überführt und mit dem Aufruf *sendXml()* über die Netzwerkschnittstelle an die Tablet-App versendet.

8.1.5. Datenstruktur zur Übertragung der Anzeigehalte

Die XML Datenstruktur ist in vier Abschnitte aufgeteilt. Der erste Abschnitt `<lanes> ... </lanes>` beschreibt die Eigenschaften der Straße, auf der sich das Fahrzeug bewegt. Für diesen Teil wird die OpenDRIVE Format Spezifikation [Dup10] als Grundlage verwendet und die Fahrspuren in dieser Form beschrieben. Das Beispiel in Lst. 8.1 definiert drei (`id = -1` bis `-3`) Fahrspuren mit jeweils einer Fahrspurbreite von 3,75 Metern (Attribut: *a*).

Der zweite Teil `<userCar> ... </userCar>` enthält alle Eigenschaft des Ego-Fahrzeugs. In Lst. 8.1 befindet sich dieses auf der mittleren Fahrspur (`<position> 2</position>`) und fährt mit einer Geschwindigkeit von ca. 120 Kilometer pro Stunde (`<speed ...>33.3</speed>`).

Im dritten Abschnitt (`<otherCars> ... </otherCars>`) werden alle weiteren Verkehrsobjekte, welche sich im taktischen Fahrzeugumfeld des Ego-Fahrzeugs befinden aufgelistet. Für jedes Verkehrsobjekt können die folgenden Eigenschaften übertragen werden:

- `type`: Fahrzeugklasse (PKW, etc.)
- `id`: Eindeutige Identifikationsnummer
- `position`: Fahrspur in absoluter Form
- `relativeSpeed`: Relativgeschwindigkeit zum Ego-Fahrzeug (positiv: schneller als das Ego-Fahrzeug; negativ: langsamer als das Ego-Fahrzeug)
- `distance`: Relativabstand zum Ego-Fahrzeug (positiv: vor dem Ego-Fahrzeug; negativ: hinter dem Ego-Fahrzeug)

Der vierte und letzte Abschnitt (`<maneuver> ... </maneuver>`) beinhaltet den Manörovorschlag der EnergieEffizienzFunktion. Dieser kann einen Spurwechsel (`<laneChange> ... </laneChange>`), eine Beschleunigung/-Verzögerung (`<acceleration> ... </acceleration>`) oder beides zusammen beinhalten. Weiterhin ist eine Information über ein vorgeschlagenes Zeitfenster (`<timeWindow> ... <timeWindow>`), in dem der Manörovorschlag durchgeführt werden sollte, möglich.

Die ersten beiden Abschnitte müssen in jedem Paket vorhanden sein, die Teile drei und vier können je nach Situation auch leer sein, wenn z.B. kein anderes Verkehrsobjekt im taktischen Fahrzeugumfeld ist oder aktuell keine Handlung erforderlich ist und somit auch kein Manöver vorgeschlagen wird.

```
1 <trafficsituation >
2   <timestamp unit="ms" sinceStart="300000"/>
3   <lanes >
4     <laneSection s="0">
5       <right >
6         <lane id="-1" type="driving" level="true">
7           <width sOffset="0" a="3.75" b="0" c="0" d="0"/>
8         </lane >
9         <lane id="-2" type="driving" level="true">
10          <width sOffset="0" a="3.75" b="0" c="0" d="0"/>
11        </lane >
12        <lane id="-3" type="driving" level="true">
13          <width sOffset="0" a="3.75" b="0" c="0" d="0"/>
14        </lane >
15      </right >
16    </laneSection >
17  </lanes >
18  <userCar >
19    <position >-2</position >
20    <speed unit="m/s">33.3</speed >
21  </userCar >
22  <otherCars >
23    <car type="PKW" id="1">
24      <position >-1</position >
25      <relativeSpeed unit="m/s">11.1</relativeSpeed >
26      <distance unit="m">-50</distance >
27    </car >
28    <car type="PKW" id="3">
29      <position >-2</position >
30      <relativeSpeed unit="m/s">-5.5</relativeSpeed >
31      <distance unit="m">20</distance >
32    </car >
33    <car type="PKW" id="4">
34      <position >-3</position >
35      <relativeSpeed unit="m/s">-6.0</relativeSpeed >
36      <distance unit="m">10</distance >
37    </car >
38  </otherCars >
39  <maneuver >
40    <laneChange >-1</laneChange >
```

```

41     <acceleration unit="m/(s*s)">1.7</acceleration>
42     <timeWindow unit="s">4.5</timeWindow>
43 </maneuver>
44 </trafficsituation>

```

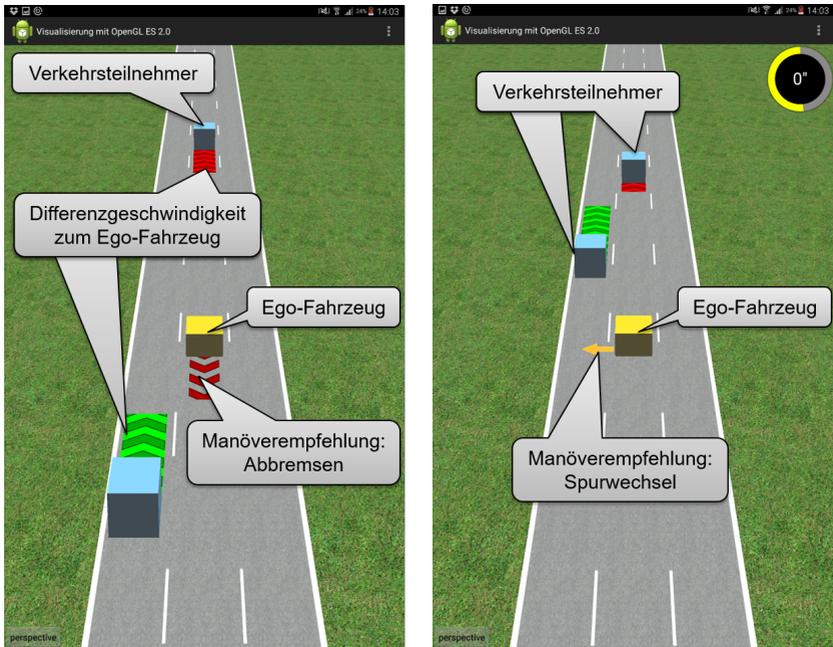
Listing 8.1: Beispiel eines XML-Datenpakets

8.1.6. Tablet App zur Visualisierung

Zur Unterstützung des Fahrers werden diesem bei der Auswahl und Durchführung seiner Fahrmanöver hilfreiche Informationen auf einem Tablet visualisiert. Die in der spezifisch entwickelten App angezeigten Elemente sind in Abb. 8.6 dargestellt [Zha16].

Abb. 8.6a stellt den Fall dar, bei dem ein *Abbremsen* empfohlen wird, während in Abb. 8.6b der *Spurwechsel* als Manöver-Vorschlag zu sehen ist. Insgesamt sind in der Tablet-Anzeige die für den Fahrer relevanten Informationen aus dem taktischen Fahrzeugumfeld zusammengefasst, welche, bei dieser Realisierung, die Fahrspuren und die weiteren Verkehrsteilnehmer umfasst. Weiterhin wird das gelbe Objekt stets zentriert in der Anzeige gehalten und repräsentiert das eigene Fahrzeug (Ego-Fahrzeug), wohingegen die blauen Objekte andere Verkehrsteilnehmer innerhalb des taktischen Fahrzeugumfelds darstellen.

Durch rote bzw. grüne animierte Flächen vor oder hinter einem blauen Verkehrsobjekt werden die Differenzgeschwindigkeiten zum eigenen Fahrzeug angezeigt. Die Fläche entspricht einem Bereich, welcher nicht vom eigenen Fahrzeug befahren werden sollte, da sonst nach IDM eine nicht mehr komfortable Verzögerung ($> 2m/s^2$ [TK10]) erforderlich wird, um eine Kollision zu vermeiden. Rote oder grüne Bereiche vor bzw. hinter dem Ego-Fahrzeug (gelbes Objekt) zeigen eine Manöverempfehlung an, welche nach vorne eine Beschleunigung und nach hinten eine Verzögerung bedeutet. Weiterhin werden für die Empfehlung eines Spurwechsels animierte Pfeile nach links oder rechts seitlich des Ego-Fahrzeugs eingeblendet.



(a) Screenshot 1 - Manöverempfehlung Abbremsen (b) Screenshot 2 - Manöverempfehlung Spurwechsel

Abbildung 8.6.: Visualisierung des taktischen Fahrzeugumfelds und den Manövervorschlägen des Energieeffizienz-Assistenten

8.2. Aufbau eines Demonstrators

Zur Erprobung des entwickelten Energieeffizienz-Assistenten wurde ein Demonstrator aufgebaut, der es einem menschlichen Fahrer ermöglicht die Funktionalität und Visualisierung des Assistenten zu erleben. Dabei stand das angeleitete und energieeffiziente Fahren durch die manuelle Ausführung der vom System vorgeschlagenen Manöver auf einer realitätsgetreuen Strecke im Vordergrund. Daher wurde die in Abb. 8.7 dargestellte Sitzkiste⁶, die einer gewöhnlichen Fahrzeugbedienung (Lenkrad und Pedale) entspricht in den Demonstrationsaufbau integriert. Der Fahrer nimmt seine Umgebung (Blick durch die Frontscheibe und auf die Rückspiegel des Ego-Fahrzeugs) über einen 55 Zoll Bildschirm wahr und erhält ebenfalls eingeblendet stets den aktuellen Wert der CE bezogen auf einen zehn-Sekunden-Abschnitt in die Vergangenheit (vgl. Abb. 8.8), der dem Fahrer, unabhängig der vorgeschlagenen Manöver, ein direktes Feedback über die taktische Energieeffizienz bietet.

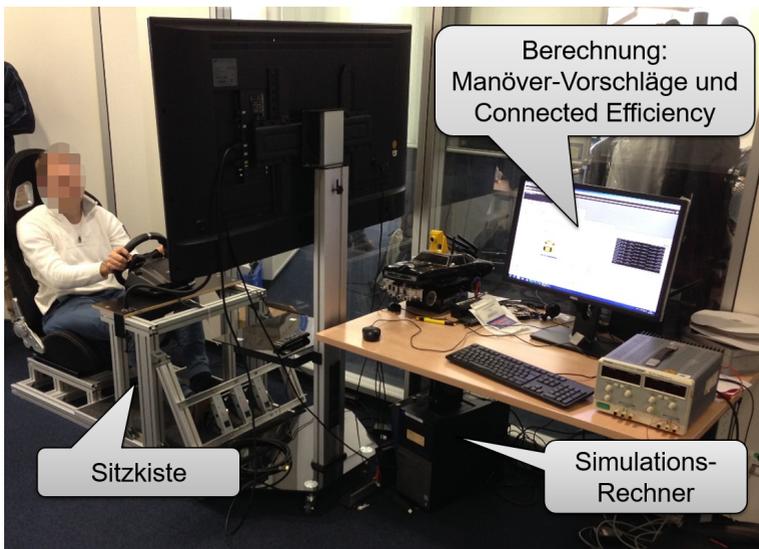


Abbildung 8.7.: Aufbau des Erprobungs-Demonstrators

⁶ Eine Sitzkiste ist ein technischer Aufbau, der nur das Cockpit eines Fahrzeugs nachahmt.

Um dem menschlichen Fahrer diese Umgebung bereitzustellen, werden auf einem Simulations-Rechner mit IPG CarMaker die folgenden Elemente virtualisiert:

- **Umwelt mit Streckennetz und Fahrbahnen:** Basierend auf Aufzeichnungen mit GPS und Altimeter können reale Strecken in der virtuellen Umgebung nachempfunden werden. Alternativ lassen sich auch manuelle Strecken über den werkzeugeigenen Editor erstellen.
- **Andere Verkehrsteilnehmer und ihre Bewegung:** Hierbei können sowohl synthetisch generierte, aufgezeichnete und zufällige Fahrscenarien eingespielt werden. Manuell erzeugte Szenarien können über eine toolspezifische Eingabemaske oder über Text-basierte Beschreibungsdateien erstellt und eingespielt werden. Aufgezeichnete Szenarien lassen sich nach dem in Abschn. 7.1 erläuterten Verfahren einsetzen, während zufällig Szenarien dadurch entstehen, dass verschiedene Verkehrsobjekte in der virtuellen Welt mit unterschiedlichen Eigenschaften generiert werden.
- **Physikalische Bewegungen des Ego-Fahrzeugs:** Das manuell gesteuerte Ego-Fahrzeug erhält seine Steuerungs-Vorgaben von der Sitzkiste und gibt diese an das virtuelle Fahrzeug weiter, dessen Bewegungsverhalten im Simulationswerkzeug abgebildet wird.

Ebenfalls auf dem Simulationsrechner realisiert ist die online Berechnung der CE basierend auf einem zehn Sekunden Zeitfenster in die Vergangenheit, das dem Fahrer als direktes Effizienzfeedback angezeigt wird. Zur Ermittlung werden die für Gl. (4.22) benötigten Werte aus der virtuellen Umgebung extrahiert und das kontinuierlich berechnete Ergebnis in einem fortlaufenden Liniendiagramm angezeigt.

Parallel dazu läuft die in Abschn. 8.1.2 erläuterte Assistenzfunktion zur Bestimmung des momentan effizientesten Fahrmanövers. Die ermittelte Manöver-Empfehlung wird zyklisch zusammen mit den aus der virtuellen Umgebung des Simulationstools bekannten Informationen über das taktische Fahrzeugumfeld über eine bestehende Wireless-Netzwerkverbindung an ein Tablet versendet. Das Tablet zeigt auf der Energieeffizienz-Assistenz-App die in Abschn. 8.1.6 dargestellten Inhalte an. Durch die Verwendung des Tablets und der bewusste Verzicht auf eine virtuelle Anzeige auf dem 55 Zoll Bildschirm als weiteres eingeblendetes Fenster, soll gewährleistet werden, dass die An-

zeige unterschiedlich positionierbar ist, um die Benutzerfreundlichkeit zu untersuchen.

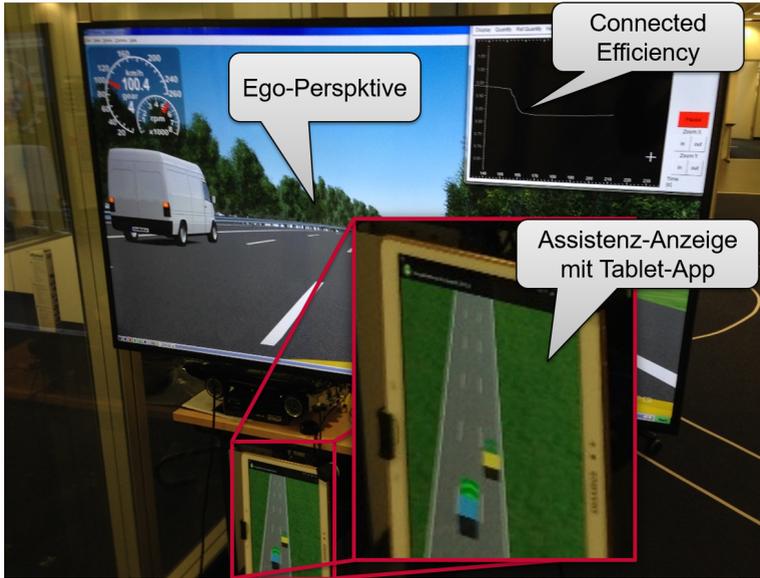


Abbildung 8.8.: Fahrersichtweise des Erprobungs-Demonstrators

Der Demonstrationsaufbau ermöglicht es nun aus der Fahrerperspektive (vgl. Abb. 8.8) heraus verschiedene simulierte Szenarien auf mehrspurigen Straßen mit angezeigten Fahrmanövervorschlägen zu erleben. Dazu wurde eine Aufzeichnung der Strecke über die Bundesautobahn 8 vom Dreieck Karlsruhe bis zur Ausfahrt Heimsheim (s. Abb. 8.9) für eine virtuelle Testfahrt in das Simulationswerkzeug CarMaker überführt. Diese Strecke besitzt deutlich erkennbare Steigungen, sowohl aufsteigend, als auch abfallend. Besonders zu Beginn ist im 3D-Profil eine markante Steigung zu erkennen, die dem Aufstieg bei Karlsbad entspricht. Im weiteren Verlauf ist noch ein beträchtlicher Abfall bei ca. 20km Weg in Ost-West auffällig, welcher die Senke bei Pforzheim widerspiegelt. Weiterhin hält die verwendete Strecke zahlreiche Kurven mit unterschiedlichen Radien, sowie Übergänge von zweispurig auf dreispurig und umgekehrt bereit. Auf dieser Streckenbasis wurden mithilfe des Vorgehens

aus Abschn. 7.1 realistische Fahrscenarien auf die Strecke übertragen, welche sich mit Unterstützung des prototypischen Energieeffizienz-Assistenten und einer Anzeige des CE-Werts virtuell befahren lassen.

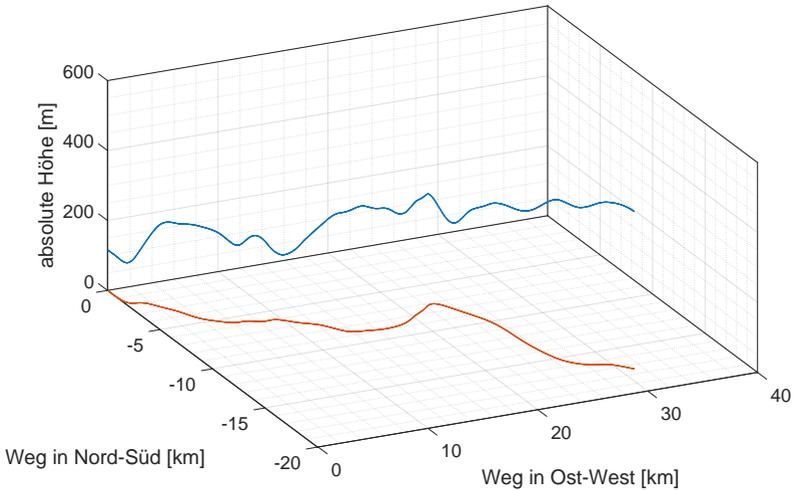


Abbildung 8.9.: 3D-Streckenprofil (blau) mit 2D-Projektion (rot) der Bundesautobahn 8 von Karlsruhe bis Heimsheim

8.3. Erkenntnisse aus dem Demonstrator

Das zur Demonstration primär eingesetzte Streckenprofil (s. Abb. 8.9) hält verschiedene interessante Merkmale für eine Erprobung des Energieeffizienz-Assistenten bereit. So besteht gleich zu Beginn der Strecke eine erheblicher Steigung, die sich zunächst in der Beschleunigung und maximal erreichbaren Geschwindigkeit bemerkbar macht. Dabei ist in der online berechneten CE deutlich zu erkennen, dass die Streckensteigung zwar den absoluten Energieverbrauch ansteigen lässt, aber durch die eingeführte Normierung die Effizienz unbeeinflusst bleibt. Weiterhin ist über das eingeblendete CE Diagramm klar

ersichtlich, dass im Falle des Ausbremsens andere Verkehrsteilnehmer durch den menschlichen Fahrer des Ego-Fahrzeugs, die Connected Efficiency abhängig von der vorliegenden Konstellation abfällt, was jedoch dem Gedanken der kollektiven Energieeffizienz entspricht.

Aus mehreren virtuellen Probefahrten mit unterschiedlichen Fahrern wurde ersichtlich, dass die Anzeige des taktischen Fahrzeugumfelds und der vorgeschlagenen Fahrmanöver auf dem Tablet zwar einfach verständlich und intuitiv erscheint, allerdings die Aufmerksamkeit vom tatsächlichen Blick auf das Verkehrsgeschehen ablenkt. Dies ist besonders auf die zusätzliche Darstellung zurückzuführen, welche die vorherrschende Verkehrssituation auf minimalistische Elemente reduziert darstellt (vgl. Abb. 8.6). Denn dadurch erhält der menschliche Fahrer das Gefühl, dass er rein nach dieser abstrahierten Darstellung, die dem Blickwinkel von PC-Spielen nachempfunden ist, das Ego-Fahrzeug steuern kann. Dies ist allerdings nur in Ausnahmefällen möglich, ohne dabei von der Fahrbahn abzukommen, da der Streckenverlauf begradigt ist, das bedeutet in der Tablet-Anzeige wird die Krümmung nicht dargestellt. Weiterhin sind die Objekte (Ego-Fahrzeug und andere Verkehrsobjekte) immer nur einer diskreten Fahrspur zugeordnet und ein Wechsel auf eine andere wird erst angezeigt, sobald ein Fahrzeug sich mehr als die Hälfte seiner Breite auf der neuen Fahrspur befindet, wodurch eine verzögerte Reaktion durch den Fahrer entsteht.

Ebenfalls zeigen die Erkenntnisse aus den virtuellen Fahrten mit dem Demonstrator aber, dass die Information über den online berechneten CE Wert und besonders die angezeigten Fahrmanöver-Empfehlungen dem menschlichen Fahrer dabei helfen, seine Manöverentscheidungen auf die kollektive Energieeffizienz auszurichten und damit einem homogenen Verkehrsfluss beisteuern. Allerdings ist bei der Integration in ein reales Fahrzeug verstärkt darauf zu achten, dass die Anzeige des taktischen Fahrzeugumfeldes und der empfohlenen Fahrmanöver den Fahrer nicht in seiner Aufmerksamkeit auf das Verkehrsgeschehen negativ beeinflusst.

8.4. Zusammenfassung des Kapitels

Das Kap. 8 beschreibt den Aufbau und Einsatz eines Demonstrators auf Basis des in Kap. 6 vorgestellten taktischen Energieeffizienz-Assistenten zur visu-

ellen Anzeige von Fahrmanörovorschlägen. Die prototypische Realisierung wird dazu in vier parallel ablaufende Threads aufgeteilt, welche unabhängig voneinander die Fahrzeugumfeld-Daten erfassen, einen energetisch gesamtwirtschaftlichen Manörovorschlag ermitteln und diesen zur Anzeige an ein Tablet weiterleiten. Speziell für die Anzeige wurde eine Tablet-App auf OpenGL ES Basis entwickelt, welche die von der Energieeffizienzfunktion bereitgestellten Informationen visualisiert. Schließlich konnten in virtuellen Testfahrten mit der Unterstützung des taktischen Energieeffizienz-Assistenten Erfahrungen in Bezug auf die Nutzbarkeit der Fahrmanöver-Empfehlungen und den Einsatz des CE Paradigmas gesammelt werden.

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1. Zusammenfassung

Die kontinuierliche Zunahme der Verkehrsdichte auf mehrspurigen und mit hohen Geschwindigkeit befahrenen Straßen, sowie der Wunsch der Gesellschaft und die Bestrebungen der Automobilindustrie nach autonomen Fahrzeugen auf derartigen Straßen, lässt die Fahraufgabe aus technischer Sicht immer mehr zu einer vernetzten Aufgabe werden. So reicht es nicht mehr aus, die Fahrzeuge ausschließlich isoliert und anhand starrer Messzyklen energetisch zu bewerten und zu verbessern. Vielmehr muss das gesamte Fahrzeugumfeld zukünftig deutlich intensiver mit in die Betrachtungen und Optimierungen einfließen.

Um den Anforderungen zur Berücksichtigung des Fahrzeugumfelds gerecht zu werden, wurde in dieser Arbeit ein konzeptionelles Modell, das IDAL-Modell entworfen, das es auf abstrakter Ebene erlaubt, das Fahrzeugumfeld ganzheitlich zu erfassen und zu interpretieren. Im Rahmen dessen wird eine Partitionierung der Fahrfunktionen zur Erfüllung einer Fahraufgabe auf unterschiedlichen Ebenen vorgenommen, während eine einheitliche Informationserfassung des Fahrzeugumfeldes ein konsistentes Abbild dessen mit abstrakten Informationen zur Verfügung stellt. Eine Aufteilung nach dem IDAL-Modell erlaubt es zudem, die Fahrfunktionen fahrzeugunabhängig zu entwickeln und zu testen.

Neben dem IDAL-Modell entstand das Paradigma der Connected Efficiency zur Bewertung der vernetzten Energieeffizienz. Darin eingebettet wurde eine Bewertungsmetrik entwickelt, die es nun ermöglicht, die Energieeffizienz eines Verkehrssystems in einem kollektiven, fahrzeugübergreifenden Kontext

zu bewerten, ohne dabei den ursprünglichen Transportwunsch eines jeden Einzelnen zu vernachlässigen.

Die Berechnung der entwickelten Effizienz-Metrik ist allerdings nur mit einem enormen Rechenaufwand als Prognosefunktion zur Vorhersage des effizientesten Fahrmanövers einsetzbar. Aus diesem Grund wurden mithilfe von Empfindlichkeitsanalysen und Variationen von Szenarien in einer simulierten Umgebung die größten Einflussfaktoren dieser Connected Efficiency Metrik identifiziert. Darauf aufbauend konnte gezeigt werden, dass sich Ansätze bestehender Verhaltensmodelle aus den Verkehrswissenschaften, welche die identifizierten Einflussfaktoren (insbesondere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) berücksichtigen, für die Prognose der zur Manöverentscheidung benötigten Größen besonders gut heranziehen lassen. Diese konnten durch entsprechende Erweiterungen an die Gegebenheiten der vernetzten Energieeffizienz derart angepasst und dahingehend ergänzt werden, dass sie als Prognosemodelle für die Fahrzeugbeschleunigungen und als Entscheidungsmodelle für einen Spurwechsel herangezogen werden konnten. Somit wurde darauf basierend ein kollektiver Energieeffizienz-Assistent entwickelt, der nicht mehr nur das einzelne Fahrzeug behandelt, sondern die kollektive Energieeffizienz in den Vordergrund stellt und das dahingehend effizientere Fahrmanöver vorschlägt.

Schließlich wurde der Assistent mit realistischen Fahrscenarien simulativ unter Verwendung der Connected Efficiency Metrik auf eine kollektive Effizienz optimiert. Zur Generierung der notwendigen realistischen Szenarien wurde ein teil-automatisiertes Vorgehen angewendet, das auf Basis von Videoaufzeichnungen aus einem herkömmlichen Fahrzeug simulationsfähige Szenarien ableitet. Letztendlich wurde der auf die Connected Efficiency Metrik optimierte Energieeffizienz-Assistent prototypisch in einem Demonstrationsaufbau realisiert. Dazu wurde speziell für die Anzeige eine Tablet-App entwickelt, welche die von der Energieeffizienzfunktion bereitgestellten Informationen visualisiert und den Fahrer entsprechend instruiert.

In einem repräsentativen Beispiel konnte durch den Einsatz des taktischen Energieeffizienz-Assistenten in der simulierten Umgebung ein mittleres Einsparpotential von 0,68% erreicht werden, was einer Einsparung von ca. 390 Mio. Kilogramm CO_2 und ca. 160 Mio. Liter Kraftstoff pro Jahr auf deutschen Autobahnen entspräche. Weiterhin konnte, basierend auf einem Demonstrationsaufbau mit stationärem Fahrzeugcockpit, der entwickelte Energieeffizienz-

Assistent virtuell zur Erprobung und Evaluation für weitere Analysen bereitgestellt werden.

9.2. Ausblick

Mit den in dieser Arbeit durchgeführten Analysen und prototypischen Entwicklungen konnte eine kollektive Energieeffizienzoptimierung auf Basis einer visualisierten Assistenzfunktion umgesetzt und das dadurch ermöglichte Einsparpotential aufgezeigt werden. Die Realisierung dieser Prognose bedarf jedoch weiterer Forschungsaktivitäten in den folgend erläuterten Bereichen:

Die Einführung der abstrakten Funktionsarchitektur IDAL hat im Hinblick auf eine Gesamtsystempartitionierung gezeigt, dass dadurch die Funktionalität komplexer Fahrfunktionen, wie etwa die des Energieeffizienz-Assistenten, aufgeteilt und auf ein handhabbares Maß reduziert werden kann, welches eine stufenweise Entwicklung, Simulation und Analyse der Funktionalität erlaubt. Dieses wurde im Rahmen dieser Arbeit mithilfe einer simulierten Fahrzeugumgebung gezeigt, während der Fokus dabei auf der Bahnführungsebene lag. Somit gilt es nun das IDAL-Modell in einem breiteren Einsatzgebiet in der Fahrzeugentwicklung zu evaluieren, sowie für eine größere Anzahl interagierender Fahrfunktionen einzusetzen.

Durch derartige Abstraktion der Funktionalität wäre in Zukunft auch denkbar, dass ein OEM oder ein Zulieferer nur Teile der automatisierten Fahrfunktionen entwickelt und anbietet, während andere, unabhängige Parteien auf diese Basiselemente aufbauen. Beispielsweise lägen sicherheitsrelevante und auf das Fahrzeug abgestimmte Funktionen in der Verantwortung der Fahrzeughersteller. Wobei es sich dabei verstärkt um Funktionen aus der Stabilisierungs- und Bahnführungsebene handelt, sowie den dazu notwendigen Elementen zur Informationserfassung (Sensorauswertung und Interpretation). Folglich ist auch denkbar, dass jedes Fahrzeug eine spezifische Auswahl an sicheren Manövern beherrscht, die situationsbedingt zur Verfügung stehen. Diese können sich auch von Fahrzeugklasse zu Fahrzeugklasse unterscheiden. Ein Kleinwagen z.B. würde nur das Querführungsmanöver Spurhalten enthalten, während ein Oberklassewagen zusätzlich noch das Manöver Spurwechsel bereithält.

Auf diese Art und Weise würde eine Grundlage geschaffen, auf der eine beliebige andere Instanz z.B. Komfort- und Effizienzfunktionen fahrzeugunabhängig entwickeln und anbieten kann. Letztendlich ist auch davon auszugehen, dass gesetzlich vorgegebene Energieeffizienzmaßnahmen als Funktion in der Führungs- oder Navigationsebene realisiert werden und diese dann mit entsprechenden Bonuspunkten in Richtlinien zur Schadstoffminimierung (vgl. Abschn. 4.4.7) berücksichtigt werden könnten.

Im Rahmen der kollektiven Energieeffizienz wurde durch die Connected Efficiency eine Metrik geschaffen, die es in der Simulation erlaubt, den Einfluss von Fahrfunktionen auf taktische Entscheidungen zu bewerten. Es besteht durchaus weiterer Bedarf darin, zu evaluieren in wie weit das Paradigma der Connected Efficiency auf Akzeptanz bei menschlichen Fahrern im realen Fahrzeug stößt, so lange nicht alle Fahrzeuge im entsprechenden Verkehrsgelände (z.B. auf ausgewählten Straßenabschnitten) vollständig automatisiert sind. Ebenfalls ist zukünftig in einem realen Umfeld zu analysieren, welche Auswirkung in Bezug auf Fairness und tatsächlichem Energiebedarf einzelne Gewichtungsfaktoren für unterschiedliche Fahrzeugtypen und -größen, die bisher simulativ ermittelt und optimiert wurden, besitzen. Da eine Vielzahl der Energieeinsparungen im Kontext dieser Arbeit nicht direkt mit einem dedizierten Fahrzeug gekoppelt sind, gilt es zu untersuchen, inwiefern dieses Bewertungsprinzip eine Möglichkeit darstellt, als Bonuspunkte in gesetzlichen Richtlinien zum Schadstoffausstoß berücksichtigt zu werden, wie es z.B. bei einer Schaltanzeige der Fall ist.

Mit dem prototypischen Aufbau des Energieeffizienz-Assistenten basierend auf dem Paradigma der Connected Efficiency und den Untersuchungen in der simulierten Umgebung konnte das Einsparpotential aufgezeigt sowie die visuelle Unterstützung des Fahrers erprobt werden. Der Einsatz des Assistenten in einem realen Fahrzeug erfordert jedoch eine umfangreiche Sensorik und einen Kommunikationsaustausch zwischen den Fahrzeugen (Positions- und Bewegungsdaten über eigenes Fahrzeug und erkannte Objekte), um ein vollständiges und konsistentes Abbild der taktischen Fahrzeugumgebung zu erstellen. Da bei der sensorischen Erkennung (Kamera, LIDAR etc.) häufig Fahrzeuge durch andere Objekte verdeckt werden, ist für eine umfangreiche Erfassung ein Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen von entscheidender Bedeutung. Für den realen Einsatz des entworfenen Assistenten wäre daher die Integration einer Umgebungserfassung, die das definierte taktische Fahrzeugumfeld vollständig abdeckt und auf den Abstraktionsschichten

des IDAL Modells aufbaut, in einer Erprobungsflotte aus unterschiedlichen Fahrzeugen erforderlich.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Herausforderungen auf mehrspurigen baulich getrennten Straßen	2
1.2. Aufbau der Arbeit	6
2.1. Grundkomponenten von AUTOSAR	14
2.2. Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe	18
2.3. Definition der BAST Automatisierungsgrade	20
2.4. Fusionsebenen	23
2.5. Komponenten des Hesperia Frameworks	25
2.6. BMW Umfeldmodell: Definition als Schichtenmodell	27
2.7. Das konzeptionelle Intelligent Driving Automation Layers Modell	30
2.8. IDAL: Navigationsebene im Detail	32
2.9. IDAL: Bahnführungsebene im Detail	34
2.10. Führungsfunktionen des IDAL-Modells im Detail	35
2.11. IDAL: Stabilisierungsebene im Detail	37
2.12. IDAL: Schnittstellen des Umgebungsmodells	38
2.13. Simulink Modell zur Evaluation des IDAL Modells	39
2.14. Umfeldsensorik des Mercedes Benz S 500 Intelligent DRIVE	46
3.1. Zusammenhänge von Szenario, Manöver und Situation	53
3.2. Aufstellung von Fahrmanövern aus der Literatur	55
3.3. Minimize Overall Braking Induced by Lane Changes	62
3.4. Hauptansicht des Fahrdynamiksimulators IPG CarMaker	67
3.5. Konfiguration der umgebenden Verkehrsteilnehmer in IPG Car-Maker	68
3.6. Beliebige Perspektive eines Szenarios in IPG CarMaker mit IPGMovie	68
3.7. Einflussbereich des taktischen Fahrzeugumfelds	71
3.8. Schematische Darstellung des Szenario 1 zur Abschätzung der Fahrzeuganzahl im taktischen Fahrzeugumfelds	72

3.9. Schematische Darstellung des Szenario 2 zur Abschätzung der Fahrzeuganzahl im taktischen Fahrzeugumfeld	73
4.1. Qualitativer Energiefluss eines PKWs mit Verbrennungskraftmaschine	76
4.2. Gesamtfahrwiderstand	79
4.3. Verbrauchskennfeld typischer Pkw-Motoren	83
4.4. Anzeige des EDSS	85
4.5. Durch ECC abgedeckte Szenarien A-C	87
4.6. Energieflüsse eines Pkws zur Berechnung der CE	93
4.7. Beispielszenario zur Connected Efficiency mit taktischem Fahrzeugumfeld	99
4.8. Integration des Matlab Simulink Modells in den ausführbaren Simulationskern IPG CarMaker	102
4.9. Oberste Ebene des Matlab Simulink-Modells zur Berechnung der Connected Efficiency	104
4.10. Subsystemgrenze und -schnittstelle eines einzelnen Fahrzeugsubsystems der CE-Realisierung in Matlab Simulink	105
4.11. Geschwindigkeitsprofil und Energiewerte aus Abschn. 4.5	107
4.12. Geschwindigkeitsprofil und Connected Efficiency des Beispielszenarios	108
5.1. Simulierte Geschwindigkeitsprofile in der Grundkonfiguration	113
5.2. Aktivitätsdiagramm der Sensitivitätsanalyse	117
5.3. Aktivitätsdiagramm der Aktivität Szenarien-Simulation	119
5.4. Klassen-/Objektdiagramm zur Datenstruktur der Simulationsergebnisse	120
5.5. Aktivitätsdiagramm der Ergebnisauswertung	121
5.6. Konstantfahrt: CE über Anfangsgeschwindigkeit	122
5.7. Konstantfahrt: CE über Antriebsstrang-Verluste	122
5.8. Konstantfahrt: CE über Distanz	122
5.9. Konstantfahrt: CE über Fahrzeugmasse	122
5.10. Konstantfahrt: CE über Luftwiderstandsbeiwert	123
5.11. Konstantfahrt: CE über Rollwiderstandsbeiwert	123
5.12. Überholvorgang: CE über Maximalbeschleunigung in m/s^2	124
5.13. Überholvorgang: CE über die maximale Verzögerung in m/s^2	124
5.14. Überholvorgang: CE über den Luftwiderstandsbeiwert	124
5.15. Überholvorgang: CE über die Antriebsstrangverluste	124

5.16. Überholvorgang: CE über Zwischengeschwindigkeit in km/h	125
5.17. Überholvorgang: CE über die Endgeschwindigkeit in km/h	125
5.18. Überholvorgang: CE über die Anfangsgeschwindigkeit in km/h	126
5.19. Überholvorgang: CE über den Rollwiderstandsbeiwert	126
5.20. Überholvorgang: CE über die Fahrzeugmasse in kg	126
5.21. Überholvorgang: CE über die Strecke zur Beschleunigung in m	127
5.22. Überholvorgang: CE über Strecke zur Bremsung in m	127
5.23. Ausbremsvorgang: CE über Maximalbeschleunigung in m/s^2	128
5.24. Ausbremsvorgang: CE über die maximale Verzögerung in m/s^2	128
5.25. Ausbremsvorgang: CE über den Luftwiderstandsbeiwert	128
5.26. Ausbremsvorgang: CE über die Antriebsstrangverluste	128
5.27. Ausbremsvorgang: CE über die Anfangsgeschwindigkeit in km/h	129
5.28. Ausbremsvorgang: CE über Zwischengeschwindigkeit in km/h	129
5.29. Ausbremsvorgang: CE über die Endgeschwindigkeit in km/h	129
5.30. Ausbremsvorgang: CE über den Rollwiderstandsbeiwert	130
5.31. Ausbremsvorgang: CE über die Fahrzeugmasse in kg	130
5.32. Ausbremsvorgang: CE über die Strecke zur Beschleunigung in m	130
5.33. Ausbremsvorgang: CE über Strecke zur Bremsung in m	130
5.34. Steigungen: CE über den Luftwiderstandsbeiwert	131
5.35. Steigungen: CE über den Rollwiderstandsbeiwert	131
5.36. Steigungen: CE über die Strecke in m	131
5.37. Steigungen: CE über die Antriebsstrangverluste	131
5.38. Steigungen: CE über Streckensteigung in Grad	132
5.39. Steigungen: CE über die Fahrzeugmasse in kg	132
5.40. Steigungen: CE über die Anfangsgeschwindigkeit in km/h	132
5.41. Steigungen: CE über die Endgeschwindigkeit in km/h	132
5.42. Steigungen: CE über Maximalbeschleunigung in m/s^2	132
6.1. Mögliche Fahrzeugkonstellation	135
6.2. Darstellung hypothetischer Fälle von MOBIL zur Berechnung der IDM-Beschleunigungen	137
6.3. Gesamtübersicht über den mit der Simulationsumgebung ge- koppelten Energieeffizienz-Assistenten	142
6.4. Mock-Up für die Visualisierung des Energieeffizienz-Assistenten mit Spurwechsel-Empfehlung	145

7.1. Überführung realistischer Fahrscenarien aus Videoaufzeichnungen	148
7.2. Transformationsprozess zur Überführung realer Szenarien . . .	150
7.3. Auswahl der Punkte mit bekannten Abständen	152
7.4. IPM-transformiertes Bild	153
7.5. Fahrzeugdetektion: Rote Bounding Box für das Modell <i>car</i> . . .	154
7.6. Links: Ergebnis der probabilistischen Hough Transformation, Mitte: Zusammenfassung vertikaler Linien im gleichen x-Achsenabschnitt (Hypothesen), Rechts: über mehrere Frames verfolgte und bestätigte Fahrbahnmarkierungen	155
7.7. Beispiel eines Basisszenario: Überholscenario	157
7.8. Variation des Basisszenario: Überholscenario	158
7.9. Aktivitätsdiagramm zur Optimierung der Modellparameter . .	161
7.10. Aus Aufzeichnungen überführtes reales Fahrscenario	166
7.11. Geschwindigkeitsprofil des realen, aufgezeichneten Fahrscenarios	167
7.12. Geschwindigkeitsprofil des Szenarios mit Manöver-Entscheidung über den Energieeffizienzassistenten	167
7.13. Simulatives Vorgehen zur Ermittlung des Einsparpotentials durch den Energieeffizienzassistenten	169
8.1. Klassendiagramm: Übersicht über realisierte Threads des Energieeffizienz-Assistenten	175
8.2. Klassendiagramm zum Thread Umgebungsmodell	176
8.3. Sequenzdiagramm zur Berechnung des Manövervorschlags im Thread EnergieEffizienzFunktion	177
8.4. Zustandsdiagramm des Threads <i>ManoeverAusfuehrung</i>	178
8.5. Sequenzdiagramm für eine Aktualisierung der Visualisierung .	180
8.6. Visualisierung des taktischen Fahrzeugumfelds und den Manövervorschlägen des Energieeffizienz-Assistenten	184
8.7. Aufbau des Erprobungs-Demonstrators	185
8.8. Fahrersichtweise des Erprobungs-Demonstrators	187
8.9. 3D-Streckenprofil (blau) mit 2D-Projektion (rot) der Bundesautobahn 8 von Karlsruhe bis Heimsheim	188
C.1. Aktivitätsdiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten .	238
C.2. Zustandsdiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten .	238
C.3. Klassendiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten . .	239
C.4. Sequenzdiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten .	240

D.1. Ausgangssituation des zu variierenden Basisszenarios 241
D.2. Entscheidungsdiagramm auf Basis der Simulationsergebnisse . 242

Tabellenverzeichnis

3.1. Vorgeschlagene Modellparameter des MOBIL	64
4.1. Ein- und Ausgangsgrößen eines Simulink-Berechnungsblocks zur SE	106
4.2. Feste Simulationsvariablen aus Szenariobeschreibung	107
5.1. Fahrzeugspezifische Parameter und ihre Werte	115
5.2. Streckenabhängige Parameter und ihre Werte	115
5.3. Fahrbewegungsabhängige Parameter und ihre Werte	116
6.1. Initial eingesetzte Modellparameter des IDM	137
6.2. Initial eingesetzte Modellparameter des MOBIL	139
7.1. Variationsgrenzen und -schrittweite für die Szenariovariation .	159
7.2. Benötigte Werte für den energetischen Vergleich	168
7.3. Ergebniswerte aus dem energetischen Vergleich	169
7.4. Ergebnistabelle zur Szenariovariation	171
A.1. Grundklassifizierung der Fahrzeugarten	226
A.2. Auswertung der Datenaufzeichnungen aus dem Jahr 2011 nach Fahrzeugklasse	227
A.3. Bestand der Personenkraftwagen	227
B.1. Wirkungsgrade von unterschiedlichen Getriebetypen	229
B.2. Rollwiderstandsbeiwerte von Fahrzeugen	229
B.3. Fahrzeugauswertung im Segment Minis	230
B.4. Fahrzeugauswertung im Segment Kleinwagen	230
B.5. Fahrzeugauswertung im Segment Kompaktklasse	231
B.6. Fahrzeugauswertung im Segment Mittelklasse	231
B.7. Fahrzeugauswertung im Segment obere Mittelklasse	232
B.8. Fahrzeugauswertung im Segment Oberklasse	232

B.9. Fahrzeugauswertung im Segment Sportwagen	233
B.10.Fahrzeugauswertung im Segment SUV	233
B.11.Fahrzeugauswertung im Segment Utilities	234
B.12.Fahrzeugauswertung im Segment Van	234
B.13.Fahrzeugauswertung im Segment Geländewagen	235
D.1. Startbedingungen des Basisszenarios aus Abb. D.1	241

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ADTF	Automotive Data and Time-Triggered Framework
APO	Application Online
AUTOSAR	AUTomotive Open System ARchitecture
BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CE	Connected Efficiency
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
E/E-Architektur	Elektronik-/Elektrik-Architektur
ECC	Economic Cruise Control
ECU	Electronic Control Unit
EDSS	Eco-Driving Support System
ESC	Electronic Stability Control
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTP	Federal Test Procedure

GPS	Global Positioning System
HiL	Hardware-in-the-Loop
HW	Hardware
IDAL	Intelligent Driving Automation Layers
IDM	Intelligent Driver Model
IP	Intellectual property
IPM	Inverse Perspective Mapping
LIDAR	Light Detection and Ranging
LKW	Lastkraftwagen
MOBIL	Minimize Overall Braking Induced by Lane Changes
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSEK	Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik im Kraftfahrzeug
PKW	Personenkraftwagen
RDE	Real Driving Emissions
ROS	Robot Operating System
RTE	Runtime Environment
SE	Single Efficiency
SQL	Structured Query Language
SUMO	Simulation of Urban Mobility
SW	Software
Tcl	Tool command language
UDP	User Datagram Protocol
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

VISSIM	Verkehr in Städten Simulation
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VOC	Visual Object Challenge
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
XML	Extensible Markup Language

10. Bibliografie

- [AG13] Daimler AG. *Pionierleistung: Autonome Langstreckenfahrt im Überland- und Stadtverkehr: Mercedes-Benz S-Klasse INTELLIGENT DRIVE fährt autonom auf den Spuren von Bertha Benz*. Techn. Ber. 2013. URL: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/9904223>.
- [AMW07] Johannes Arning, Wolfgang Mayer und Jochen Wiedemann. „Die Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl: Der „Wirkungsgrad“ des Fahrzeugs“. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (Mai 2007), S. 430–437.
- [BG16] Kai-Lukas Bauer und Frank Gauterin. „A Two-Layer Approach for Predictive Optimal Cruise Control“. In: *SAE Technical Paper*. SAE International, Apr. 2016.
- [BGR14] Austin Brown, Jeffrey Gonder und Brittany Repac. „An analysis of possible energy impacts of automated vehicle“. In: *Road Vehicle Automation*. Springer, 2014, S. 137–153.
- [BIS09] Martin Buehler, Karl Iagnemma und Sanjiv Singh, Hrsg. *The DARPA Urban Challenge*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [BLF16] Jürgen Beyerer, Fernando Puente León und Christian Frese. *Automatische Sichtprüfung*. 2. Aufl. Springer Vieweg, 2016.
- [BR12] C. Berger und B. Rumpe. „Engineering Autonomous Driving Software“. In: *Experience from the DARPA Urban Challenge*. Hrsg. von M. Hinchey C. Rouff. 2012. eprint: 1409.6579.
- [Bac+15] Johannes Bach u. a. „Control based driving assistant functions’ test using recorded in field data“. In: *7. Tagung Fahrerassistenz*. 2015.
- [Bac+17] Johannes Bach u. a. *Reactive-Replay Approach for Verification and Validation of Closed-Loop Control Systems in Early Development*. Techn. Ber. SAE Technical Paper, 2017.
- [Bar+09] T. J. Barlow u. a. *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. Techn. Ber. Department for Transport, Cleaner Fuels & Vehicles 4, 2009.

- [Bar99] Michael Barr. *Programming embedded systems in C and C++*. O'Reilly Media, Inc., 1999.
- [Bey06] Jürgen Beyerer, Hrsg. *Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik*. Karlsruhe, 2006.
- [Bos14] R Bosch. *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics: Systems and Components, Networking and Hybrid Drive*. Springer Vieweg, Plochingen, 2014.
- [DKK05] Klaus Dietmayer, Alexander Kirchner und Nico Kämpchen. „Fusionsarchitekturen zur Umfeldwahrnehmung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme“. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Hrsg. von Markus Maurer und Christoph Stiller. Springer, 2005, S. 43–58.
- [DP85] Johannes Drosdol und Ferdinand Panik. „The Daimler-Benz Driving Simulator A Tool for Vehicle Development“. In: *SAE Technical Paper*. SAE International, Feb. 1985.
- [Don12] Edmund Donges. „Verhaltensmodelle“. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme (2012)*. Hrsg. von Hermann Winner, Stephan Hakuli und Gabriele Wolf, S. 15–23.
- [Don78] Edmund Donges. „Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug“. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 24.3 (1978).
- [Don82] Edmund Donges. „Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen“. In: *Automobil-Industrie* 27 (1982), S. 183–190.
- [Dup10] Marius Dupuis. *OpenDRIVE Format Specification, Rev. 1.3*. online. 2010. URL: <http://www.opendrive.org/docs/OpenDRIVEFormatSpecRev1.3D.pdf>.
- [EG70] Rat der Europäischen Gemeinschaften. „Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung“. In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* (1970).
- [EG91] Rat der Europäischen Gemeinschaften. „Richtlinie 91/441/EWG zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen“. In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* (1991).

-
- [EU09] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. „Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte“. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2009).
- [Ele12] Nationale Plattform Elektromobilität. *Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht)*. Techn. Ber. 2012.
- [Eve+06] Mark Everingham u. a. „The 2005 pascal visual object classes challenge“. In: *Machine Learning Challenges. Evaluating Predictive Uncertainty, Visual Object Classification, and Recognising Tectual Entailment*. Springer, 2006, S. 117–176.
- [FNS14] Arnd Fitschen, Hartwig Nordmann und Bundesanstalt für Straßenwesen. „Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013“. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen* (2014).
- [FV00] Martin Fellendorf und Peter Vortisch. *Integrated Modeling of Transport Demand, Route Choice, Traffic Flow and Traffic Emissions*. Techn. Ber. 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2000.
- [Fel+10] Pedro F Felzenszwalb u. a. „Object detection with discriminatively trained part-based models“. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 32.9 (2010), S. 1627–1645.
- [Fle+14] Folko Flehmig u. a. „Eco-ACC für Elektro- und Hybridfahrzeuge“. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* (Apr. 2014), S. 22–27.
- [Fra76] Paul M. Frank. *Empfindlichkeitsanalyse dynamischer Systeme : eine einführende Darstellung*. 1. Aufl. Methoden der Regelungstechnik. München: Oldenbourg, 1976.
- [GES12] Jeffrey Gonder, Matthew Earleywine und Witt Sparks. „Analyzing Vehicle Fuel Saving Opportunities through Intelligent Driver Feedback“. In: *SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst.* 5 (Apr. 2012), S. 450–461.
- [GMK99] C Galamhos, J Matas und Josef Kittler. „Progressive probabilistic Hough transform for line detection“. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on*. Bd. 1. IEEE, 1999.
- [Gas+12] Tom M Gasser u. a. „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik* 83 (2012).
- [Gey+11] Sebastian Geyer u. a. „Development of a cooperative system behavior for a highly automated vehicle guidance concept based on the Conduct-by-Wire principle“. In: *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* Iv (2011), S. 411–416.

- [Gey+14] Sebastian Geyer u. a. „Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance“. In: *IET Intelligent Transport Systems* 8.3 (2014), S. 183–189.
- [HNK11] Toshihiro Hiraoka, Seimei Nishikawa und Hiroshi Kawakami. „Driver-assistance system to encourage spontaneous eco-driving behavior“. In: *Proceedings of 18th World Congress on Intelligent Transport Systems 2* (2011), S. 1–12.
- [Haa98] Michael Haag. *Bildfolgenauswertung zur Erkennung der Absichten von Straßenverkehrsteilnehmern*. Infix, 1998.
- [Har07] Jochen Harding. „Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs“. Diss. 2007.
- [Hei+04] Harald Heinecke u. a. „AUTomotive Open System ARchitecture-an industry-wide initiative to manage the complexity of emerging automotive E/E-architectures“. In: (2004).
- [Hei94] Jochen Heistermann. *Genetische Algorithmen: Theorie und Praxis evolutionärer Optimierung*. Bd. 9. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1994.
- [Hol+14] Kenneth Holmberg u. a. „Global energy consumption due to friction in trucks and buses“. In: *Tribology International* 78 (2014), S. 94–114.
- [Hou62] Paul VC Hough. *Method and means for recognizing complex patterns*. Techn. Ber. US Patent 3069654. 1962.
- [Höf06] Frank Höfler. „Verkehrswesen-Praxis, Bd. 2, Verkehrstechnik“. In: (2006).
- [Ise10] Rolf Isermann. *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe*. Springer, 2010.
- [KB15] Kraftfahrt-Bundesamt. „Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2015 gegenüber 1. Januar 2014 nach Segmenten und Modellreihen“. In: *Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes* (2015).
- [KSB10] M. Kauer, M. Schreiber und R. Bruder. „How to conduct a car? A design example for maneuver based driver-vehicle interaction“. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Juni* (2010), S. 1214–1221.
- [KTH06] Arne Kesting, Martin Treiber und Dirk Helbing. *MOBIL: General Lane-Changing Model for Car-Following Models*. Veröffentlichung. TU Dresden, 2006.
- [Kas13] Rainald Kasprick. *Rationale Unternehmens- und Marketingplanung: strategische, operative und taktische Entscheidungen*. Springer-Verlag, 2013.
- [Kom17] Europäische Kommission. „Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017“. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2017).

-
- [Krü13] Wolfgang Krüger. *Situationsmodellierung in der Bildfolgenauswertung*. Bd. 311. Springer-Verlag, 2013.
- [LC95] P.I. Labuhn und W.J. Chundrlik. *Adaptive cruise control*. US Patent 5,454,442. 1995.
- [LN07] Gisbert Lechner und Harald Naunheimer. *Fahrzeuggetriebe*. Bd. 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [Lie+14] Johannes Liebl u. a. *Energiemanagement im Kraftfahrzeug*. Bd. 1. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, 2014.
- [Log13] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. *VDI-Richtlinie: VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*. Techn. Ber. Verein Deutscher Ingenieure, 2013.
- [MM15] Richard Matthaehi und Markus Maurer. „Autonomous driving – a top-down-approach“. In: *at - Automatisierungstechnik* 63 (3 Juni 2015), S. 155–167.
- [Mak13] Lorenz Makeschin. „Das Cloud-Fahrzeug: Vernetzung als Gamechanger für die Automobilindustrie“. In: *VDI-Berichte*. Bd. 2188. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013, S. 33–45.
- [Mar+12] Philip Markschläger u. a. „Assistenzsystem fuer mehr Kraftstoffeffizienz“. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* 11 (Nov. 2012), S. 850–855.
- [Mar13] Philip Markschläger. „Porsche InnoDrive - Das Fahrereffizienzsystem“. In: *7. dSPACE Anwenderkonferenz*. 2013.
- [Mat14] MathWorks. *Matlab Global Optimization Toolbox Documentation*. R2014b. MathWorks. 2014. URL: <https://de.mathworks.com/help/gads/index.html>.
- [Mic85] John A Michon. „A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do?“. In: *Human behavior and traffic safety*. Springer, 1985, S. 485–524.
- [Min87] Henry Mintzberg. „The strategy concept I: Five Ps for strategy“. In: *California management review* 30.1 (1987), S. 11–24.
- [Miq14] Charles Miquet. „New test method for reproducible real-time tests of ADAS ECUs: “Vehicle-in-the-Loop” connects real-world vehicles with the virtual world“. In: *5th International Munich Chassis Symposium 2014: chassis.tech plus*. Hrsg. von Peter E. Pfeffer. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 575–589.

- [NS10] M. Nentwig und M. Stamminger. „A method for the reproduction of vehicle test drives for the simulation based evaluation of image processing algorithms“. In: *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2010, S. 1307–1312.
- [Nag94] Hans-Hellmut Nagel. „A vision of ‘vision and language’ comprises action: An example from road traffic“. In: *Artificial Intelligence Review* 8.2-3 (1994), S. 189–214.
- [Nie+05] Wolfgang Niehsen u. a. „Informationsfusion für Fahrerassistenzsysteme“. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Hrsg. von Markus Maurer und Christoph Stiller. Springer, 2005, S. 43–58.
- [Not14] Tobias Nothdurft. „Ein Kontextmodell für sicherheitsrelevante Anwendungen in der autonomen Fahrzeugführung“. Diss. 2014.
- [OFK92] Akihiro Okuno, Kenji Fujita und Atsushi Kutami. „Visual navigation of an autonomous on-road vehicle: autonomous cruising on highways“. In: *Vision-based vehicle guidance*. Springer, 1992, S. 222–237.
- [Omg] *OMG Unified Modeling Language (OMG UML) Version 2.5*. Object Management Group, 2015. URL: <http://www.omg.org/spec/UML/2.5/PDF>.
- [PV13] Willibald Prestl und Wagner Volkmar. „Energie- und Nachhaltigkeitsaspekte von Antrieben“. In: *Energieeffiziente Antriebstechnologien*. Hrsg. von Wolfgang Siebenpfeiffer. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. Kap. A, S. 16–21.
- [Pap15] Markos Papageorgiou. *Optimierung : Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. Hrsg. von Marion Leibold und Martin Buss. 4., korr. Aufl. 2015. SpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [Pel+03] Martin Pellkofer u. a. „Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung“. Diss. Universität der Bundeswehr München, Universitätsbibliothek, 2003.
- [Rei14] Konrad Reif. *Brakes, Brake control and driver assistance systems*. Bd. 1. Springer, 2014.
- [Rei96] Dirk Reichardt. „Kontinuierliche Verhaltenssteuerung eines autonomen Fahrzeugs in dynamischer Umgebung“. Diss. Universität Kaiserslautern, 1996.
- [SB13] Ulrich Seiffert und Hans-Hermann Braess, Hrsg. *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2013.
- [SKB09] Michael Schreiber, Michaela Kauer und Ralph Bruder. „Conduct by wire-maneuver catalog for semi-autonomous vehicle guidance“. In: *Intelligent Vehicles Symposium (2009)*, S. 1279–1284.

-
- [SS15] Michael Sachse und Karsten Schulze. „Hochautomatisierung Economic Cruise Control basierend auf Seriensensoren“. In: *ATZelektronik* 3 (Juni 2015), S. 40–45.
- [Sax08] Eric Sax. *Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2008.
- [Sax15] Eric Sax. „Tatort Test“. In: *Vector Testing Symposium*. 2015.
- [Sch07] Roland Schabenberger. „ADTF: Framework für Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme“. In: VDI-Berichte Nr. 2000. CD-ROM-Ausg. u.d. T.: *Elektronik im Kraftfahrzeug*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2007, S. 701–710.
- [Sch09] Jörg Henning Schneider. „Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme“. Diss. TU Chemnitz, 2009.
- [Sch11] Markus Schöttle. „Zukunft der Fahrerassistenz mit neuen E/E-Architekturen“. In: *ATZelektronik* 4 (Aug. 2011), S. 8–15.
- [Sch12] Michael Schreiber. „Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten“. Diss. TU Darmstadt, 2012.
- [Sie03] Karl-Heinz Siedersberger. „Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-) autonomen Fahrzeugen“. In: *Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr München* (2003).
- [Sie13] Wolfgang Siebenpfeiffer. „Energieeffiziente Antriebstechnologien“. In: *Energieeffiziente Antriebstechnologien; Hybridisierung - Downsizing - Software und IT*. 2013.
- [Spa78] Udo Sparmann. „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“. In: *Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen* 263 (1978).
- [Sti05] Christoph Stiller. „Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr“. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Hrsg. von Markus Maurer und Christoph Stiller. Springer, 2005, S. 1–20.
- [Str08] Arbeitsgruppe Straßenentwurf. *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen*. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2008.
- [Str12] Benedikt Strasser. *Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. Cuvillier, E, 2012.

- [TENSMT02] Steering Committee of TRANS-EUROPEAN NORTH-SOUTH MOTORWAY (TEM). *TEM STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICE*. Techn. Ber. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2002.
- [THH00] Martin Treiber, Ansgar Hennecke und Dirk Helbing. „Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations“. In: *Physical Review E* 62 (2000), S. 1805–1824.
- [TK09] Martin Treiber und Arne Kesting. „Modeling lane-changing decisions with MOBIL“. In: *Traffic and Granular Flow'07* (2009), S. 211–221.
- [TK10] Martin Treiber und Arne Kesting. *Verkehrsdynamik und -simulation*. 1. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [Taş+17] Ömer Şahin Taş u. a. „Making Bertha Cooperate-Team AnnieWAY's Entry to the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2017).
- [Tho98] Stefan H Thomke. „Simulation, learning and R&D performance: Evidence from automotive development“. In: *Research Policy* 27.1 (1998), S. 55–74.
- [Tuo+10] S Tuohy u. a. „Distance determination for an automobile environment using inverse perspective mapping in OpenCV“. In: *Proc. Irish Signals and Systems Conference*. Bd. 2010. 2010.
- [Töl96] Winfried Töle. „Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten“. In: *FORTSCHRITT BERICHTE-VDI REIHE 12 VERKEHRSTECHNIK FAHRZEUGTECHNIK* (1996).
- [Ulb+15] Simon Ulbrich u. a. „Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren“. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, Germany*. 2015.
- [Vor88] Peter Vortisch. „Mikroskopische Verkehrsflusssimulation zur Bewertung emissionsmindernder Maßnahmen im Straßenverkehr“. In: *GI - 18. Jahrestagung I, Vernetzte and komplexe Informatik-Systems*. Hrsg. von Rüdiger Valk. Bd. 187. Hamburg, Okt. 1988, S. 294–299.
- [WG96] Klaus Peter Wershofen und Volker Graefe. „Situationserkennung als Grundlage der Verhaltenssteuerung eines mobilen Roboters“. In: *Autonome Mobile Systeme 1996*. Springer, 1996, S. 170–179.
- [WH06] Hermann Winner und Stephan Hakuli. „Conduct-by-wire – following a new paradigm for driving into the future“. In: *Proceedings of FISITA World Automotive ... 1* (2006).
- [Wie74] Rainer Wiedemann. „Simulation des Strassenverkehrsflusses.“ In: *Heft 8 der Schriftenreihe des Institut für Verkehrswesen (IfV) der Universität Karlsruhe* (1974).

-
- [Xu+05] Peijun Xu u. a. „Road Test Simulation Technology in Light Vehicle Development and Durability Evaluation“. In: *SAE Technical Paper*. SAE International, Apr. 2005.
- [ZS15] J. Marius Zöllner und Thomas Schamm. „Autonomous driving“. In: *it-Information Technology* 57.4 (2015), S. 213–214.
- [Zof+14] M.R. Zofka u. a. „Semivirtual simulations for the evaluation of vision-based ADAS“. In: *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014 IEEE*. 2014, S. 121–126.
- [Zof+15] Marc René Zofka u. a. „Data-driven simulation and parametrization of traffic scenarios for the development of advanced driver assistance systems“. In: *Information Fusion (Fusion), 2015 18th International Conference on*. IEEE. 2015, S. 1422–1428.
- [AUT] AUTOSAR development cooperation. *Presseinformationen*. <http://www.autosar.org/media/media-releases/>. München.

Betreute studentische Arbeiten

- [Boh16] Christopher Bohn. „Entwicklung einer manöverbasierten Fahrerassistenzfunktion zur Connected Efficiency“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2016.
- [DL15] Andreas Danz und Kai Lohmann. „Autobahn-Szenarien-Katalog“. Seminararbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer, Dipl.-Ing. Meike Braun. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.
- [Fri14] Jennifer Friedmann. „Automatisierte Generierung abstrakter Beschreibungen videobasierter Fahrscenarien für die Fahrzeugumfeldsimulation“. Masterarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer, Dipl.-Ing. Johannes Bach. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2014.
- [Gau16] Christian Gauges. „Validierungskonzept und Durchführung zum Energiebedarfsmodell der Connected Efficiency“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2016.
- [HP15] Tobias Holoch und Philip Florian Pffirmann. „Das Normfahrzeug für Energieeffizienzuntersuchungen“. Seminararbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Meike Braun, Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.
- [Hau15] Lukas Haufer. „Integration manöverbasierter Fahrer-Fahrzeug-Modelle für mehrspurige Straßen“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.

- [Hen15] Julien Hennig. „Modellierung und Analyse von Fahrscenarien unter dem Gesichtspunkt der kollektiven Effizienz“. Masterarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.
- [Kil16] Sean Kille. „Entwicklung und Implementierung eines Fahrzeugumgebungsmodells für eine manöverbasierte Fahrzeugführung“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2016.
- [Kir15] Ralf Kirschner. „Synchronisation von Videoaufzeichnungen auf mehrspurigen Straßen zur automatisierten Generierung von Simulationsszenarien“. Diplomarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.
- [Mar16] Christian Marten. „Konzept und Entwicklung einer autonomen manöverbasierten Fahrfunktion zur Connected Efficiency“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2016.
- [Pok15] Steffen Pokrandt. „Recherche und prototypisches Konzept zur generischen Sensorfusion eingreifender Fahrerassistenzfunktionen“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.
- [Sch15a] Jürgen Scholz. „Konzept und prototypische Implementierung eines Ebenen-Ansatzes zur Konzeptionierung, Entwicklung und Absicherung von eingreifenden Fahrerassistentenfunktionen“. Diplomarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.
- [Sch15b] Jürgen Scholz. „Prototypisches Konzept und Recherche zur Systemarchitektur eingreifender Fahrerassistenzfunktionen“. Studienarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2015.

-
- [Str16] Thaddäus Strobel. „Konzept und Durchführung einer Evaluation zur Connected Efficiency“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2016.
- [Vol16] Lara-Marie Volkmann. „Konzept und prototypische Realisierung eines Connected Efficiency-Spurwechsellassistenten“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2016.
- [Zha16] Yu Zhang. „Design, Implementation und Evaluation einer Tablet-App zur Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen“. Bachelorarbeit, Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Kramer. Hochschule Karlsruhe, Technik und Wirtschaft - Forschungszentrum Informatik ESS (FZI), 2016.

Eigene Publikationen

- [BK17] Meike Braun und Jochen Kramer. „Spielzeitanalyse von RBGs – Vergleich von Theorie und Realität“. In: *Logistics Journal: Proceedings 2017* (2017).
- [BKF14] Meike Braun, Jochen Kramer und Kai Furmans. „Validierung intralogistischer Systemmodelle anhand gemessener Kenngrößen“. In: *Logistics Journal: Proceedings 2014* (2014).
- [BKF16] Meike Braun, Jochen Kramer und Kai Furmans. „Reproduzierbarkeit empirischer Erhebungen von Messdaten unter Anwendung statistischer Implikationen“. In: *Logistics Journal: Proceedings 2016* (2016).
- [Hil+11] M. Hillenbrand u. a. „Ontology-Based Consideration of Electric/Electronic Architectures of Vehicles“. In: *Tagungsband des Dagstuhl-Workshop MBEEES: Modellbasierte Entwicklung eingebetteter Systeme VII*. Hrsg. von H. Giese u. a. München: fortiss GmbH, Feb. 2011.
- [Kra+14] Jochen Kramer u. a. „Automatic Generation of Realistic Simulation Scenarios out of Video Recordings“. In: *apply & innovate 2014 - IPG Technology Conference*. Karlsruhe, 2014. URL: http://www.ipg.de/fileadmin/downloads/ITC2014/Presentation_FZI_Kramer.pdf.
- [Kra+16a] Jochen Kramer u. a. „Connected efficiency – A paradigm to evaluate energy efficiency in tactical vehicle-environments“. In: *16. Internationales Stuttgarter Symposium, Proceedings*. Hrsg. von Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Wiedemann Jochen. Springer Viewig, 2016, S. 1451–1463.
- [Kra+16b] Jochen Kramer u. a. „Generation of virtual driving scenarios out of unsynchronized video recordings“. In: *FISITA World Congress 2016, Proceedings*. 2016.
- [Kra15] Jochen Kramer. „Layer Model to abstract Functions of Complex Intervening Driver Assistance System“. In: *ASAM International Conference 2015 - Big Data in Future Car Development*. Dez. 2015.

A. Fahrzeugstatistiken

Die dargestellten Fahrzeugstatistiken basieren auf den erfassten Daten von 725 Zählstellen in Deutschland aus dem Jahre 2011. Grundlage dafür bildet der jährliche Bericht *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen* [FNS14] der Bundesanstalt für Straßenwesen.

A.1. Fahrzeugklassen

Der Bericht teilt den Verkehr in die in Tabelle A.1 aufgelisteten Fahrzeugklassen ein.

A.2. Verkehrsverteilung

Die Tabelle A.2 stellt den durchschnittlichen Anteil einer Fahrzeugklasse auf deutschen Autobahnen gemittelt über alle Zählstellen dar [HP15].

In Tabelle A.3 ist die Klasse Pkw weiter unterteilt in Segmente. Die absoluten Anzahlen basieren auf den erfassten Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes [KB15].

Klasse	Beschreibung
Krad	Motorräder, auch mit Beiwagen sowie Trikes und Quads (jedoch keine Fahrräder und Mofas)
Pkw	Pkw vom Kleinwagen bis zur Großraumlimusine (einschließlich Offroad-Fahrzeuge, Pick-Ups, SUVs) ohne Anhänger
Lfw	Lieferwagen und Wohnmobile mit einem zul. GG von max. 3,5 t (auch Zugmaschinen ohne Auflieger)
PkwA	Pkw mit Anhänger und Lfw. mit Anhänger
Lkw	Lkw ohne Anhänger mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t (auch Zugmaschinen ohne Anhänger)
LkwA	Lkw mit Anhänger
Sattel-Kfz	Alle Sattelkraftfahrzeuge (Zugmaschinen mit Auflieger)
Bus	Fahrzeuge mit mehr als 9 Sitzplätzen zur Personenbeförderung; auch mit Anhänger
Nkl	Nicht klassifizierbare Fahrzeuge (Kfz, bei denen die Fahrzeugart nicht bestimmbar war oder die keiner der anderen Klassen angehören)

Tabelle A.1.: Grundklassifizierung der Fahrzeugarten nach [FNS14]

Klasse	Durchschnittlicher Anteil
Krad	0,76
Pkw	76,79
Lfw	7,06
PkwA	1,13
Lkw	3,04
LkwA	2,43
Sattel-Kfz	7,53
Bus	0,32
Nkl	0,94

Tabelle A.2.: Auswertung der Datenaufzeichnungen aus dem Jahr 2011 nach Fahrzeugklasse

Segment	abs. Anzahl	Anteil (in %)
Minis	2.929.582	7,1
Kleinwagen	8.852.867	21,5
Kompaktklasse	11.737.667	28,5
Mittelklasse	7.229.150	17,6
Obere Mittelklasse	2.115.006	5,1
Oberklasse	262.793	0,6
SUVs	1.512.140	3,7
Geländewagen	1.692.319	4,1
Sportwagen	808.893	2,0
Mini-Vans	1.954.875	4,7
Großraum-Vans	2.069.065	5,0

Tabelle A.3.: Bestand der Personenkraftwagen am 01.01.2015 [KB15]

B. Fahrzeugspezifische Kenngrößen

Tabelle B.1 gibt eine Übersicht über Verluste im Antriebsstrang durch den Einsatz unterschiedlicher Getriebearten. In Tabelle B.2 werden verschiedene Rollwiderstandsbeiwerte abhängig von Typ des Fahrzeugs und der Reifen aufgelistet. Die Tabellen Tabelle B.3 bis Tabelle B.13 stellen die Auswertung von Fahrzeugdatenblättern dar und geben damit einen Überblick über typische Werte für die Fahrzeugmasse, den Luftwiderstandskoeffizient c_w und die Fahrzeugstirnfläche. [HP15]

Getriebeart	Wirkungsgrad in %
Mechanisches Getriebe Pkw	92-97
Mechanisches Getriebe Lkw	90-97
Automatikgetriebe	90-95

Tabelle B.1.: Wirkungsgrade von unterschiedlichen Getriebetypen [LN07]

Fahrzeugtyp	Beiwert
Pkw Reifen (handelsüblich)	0,007-0,013
Pkw Reifen (rollreibungsoptimiert)	0,006-0,007
Lkw Reifen Lenkachse	0,005-0,009
Lkw Reifen Antriebsachse	0,006-0,01

Tabelle B.2.: Rollwiderstandsbeiwerte von Fahrzeugen [Lie+14]

B. Fahrzeugspezifische Kenngrößen

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
VW	Lupo	1999			
VW	Lupo FSI	2000		0,30	
Seat	Mii	2012	929	0,32	2,07
VW	Up	2011	938	0,32	2,07
Suzuki	Alto	2009		0,30	
Wertebereich des Segments:			929-938	0,3-0,32	2,1

Tabelle B.3.: Fahrzeugauswertung im Segment Minis [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
VW	Polo	2001		0,32	
Opel	Corsa	2000	980-1115	0,32	2,01
VW	Polo Bl	2010		0,31	
Peugeot	207	2009	1417-1485	0,29-0,3	2,06
Mitsubishi	Colt	2005		0,32	2,16
Mini	Cooper	2014	1085-1115	0,28	2,07
Mini	Cooper S	2014	1160-1175	0,31	2,09
Wertebereich des Segments:			980-1175	0,29-0,32	2,01-2,16

Tabelle B.4.: Fahrzeugauswertung im Segment Kleinwagen [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
Opel	Astra	1998		0,29-0,3	
Mercedes	A-Klasse	2012		0,26-0,27	2,20
Toyota	Corolla	2002	1200-1365	0,29	
Toyota	Prius	2001	1250	0,29	
Nissan	Leaf	2013	1505-1578	0,28	
Ford	Focus	2012	1389	0,30	2,26
BMW	220i Cop	2013	1350-1425	0,29	2,14
BMW	M235i Cop	2013	1455-1530	0,33	2,14
VW	Golf 1.4	2009	1316	0,31	2,22
Peugeot	308	2009	1525-1674	0,30	2,20
Wertebereich des Segments:			1200-1674	0,26-0,33	2,14-2,26

Tabelle B.5.: Fahrzeugauswertung im Segment Kompaktklasse [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
Audi	A4 Cabr	2002	1580-1600	0,30	2,11
Audi	A4 Avan	2001	1395-1645	0,30	
Mercedes	CLA	2013	1390	0,22-0,24	
Skoda	Superb	2008		0,28	
BMW	M3	2000	1495		
Peugeot	407	2010	1501-1704	0,29	2,26
VW	Passat	2012	1575	0,30	2,24
Mazda	6	2008	1280-1355	0,27	2,19
Wertebereich des Segments:			1280-1704	0,22-0,3	2,11-2,26

Tabelle B.6.: Fahrzeugauswertung im Segment Mittelklasse [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
Mercedes	E T-Modell	2003	1720-1885	0,3	
Peugeot	607	2003	1610-1625	0,30	2,20
Wertebereich des Segments:			1610-1885	0,3	2,2

Tabelle B.7.: Fahrzeugauswertung im Segment obere Mittelklasse [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
Porsche	Panam. S	2009	1770	0,29	2,33
Mercedes	CL	2006	1920-2110	0,27	
Audi	A7 S-back	2010	1695	0,28	2,29
Jaguar	XJ	2009	1755-1915	0,29	
Lexus	LS430	2001		0,25	
Mercedes	S-Klasse	2013	1925-2015	0,24-0,26	
Audi	Audi A8	2004	1830	0,28	2,31
Wertebereich des Segments:			1695-2110	0,24-0,29	2,29-2,31

Tabelle B.8.: Fahrzeugauswertung im Segment Oberklasse [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
Porsche	911 Turb	2014		0,31-0,34	2,07
Porsche	911 Carr	2004		0,30	1,95
Porsche	911 Carr	2005		0,28	2,00
Audi	R8	2007		0,35	
BMW	Z4 Road	2003	1260	0,35	
BMW	Z4	2003	1260	0,35	
Lotus	Evora		1383-1437	0,33	
Nissan	350Z	2003	1447	0,29	
Peugeot	RCZ	2010	1350-1372	0,33	2,11
Wertebereich des Segments:			1260-1447	0,29-0,35	1,95-2,11

Tabelle B.9.: Fahrzeugauswertung im Segment Sportwagen [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
BMW	X1 sD20i	2015	1485-1560	0,30	2,46
Peugeot	4007	2010	1825-1845	0,34	2,59
Mercedes	GLA 200		1320-1360	0,29	
Dacia	Duster	2015	1280	0,42	
Mercedes	R 300	2012	2185-2240	0,31	
Wertebereich des Segments:			1485-2240	0,29-0,42	2,46-2,59

Tabelle B.10.: Fahrzeugauswertung im Segment SUV [HP15]

B. Fahrzeugspezifische Kenngrößen

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
Fiat	Ducato			0,31	
Peugeot	Partner	2004	1263-1326	0,37	2,63
VW	T5			0,35	3,25
Peugeot	Expert	2005	1598-1715	0,37	3,04
Mercedes	Vito 109			0,33	
Wertebereich des Segments:			1263-1715	0,31-0,37	2,63-3,04

Tabelle B.11.: Fahrzeugauswertung im Segment Utilities [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
VW	Sharan	2010		0,30	
VW	Multivan	2003	2184-2299	0,35	
Mercedes	B-Klasse	2011	1320-1400	0,26	
Peugeot	807	2003	1612-1818	0,33	2,79
Nissan	Note	2013	1167-1225	0,33	2,08
Chevrolet	Orlando	2011	1528	0,33	2,55
Renault	Espace		1665	0,36	2,80
Wertebereich des Segments			1528-2299	0,26-0,36	2,08-2,8

Tabelle B.12.: Fahrzeugauswertung im Segment Van [HP15]

Hersteller	Modell	Baujahr	Leergewicht in kg	cw-Wert	Stirnfläche in qm
BMW	X5	1999		0,35	2,50
BMW	X5	2008		0,33	2,87
Audi	Q5	2008	1730	0,33	2,65
Audi	Q3			0,32	2,44
Mercedes	ML 250		2150	0,33	
Porsche	Macan	2014	2000	0,36	
VW	Touareg	2010	2365	0,35	2,78
Toyota	Landcruiser		2445-2640	0,40	
Wertebereich des Segments			1730-2640	0,32-0,4	2,44-2,87

Tabelle B.13.: Fahrzeugauswertung im Segment Geländewagen [HP15]

C. Modellierungsartefakte

Die Grundlage der verwendeten Darstellungen bildet die Modellierungssprache Unified Modeling Language (UML) in der Version 2.5 [Omg].

C.1. Darstellung von Aktivitäten

Die Darstellung von Vorgängen und Aktivitäten findet in dieser Arbeit mithilfe von Aktivitätsdiagrammen der UML 2.5 statt. Damit können sowohl Kontroll- als auch Datenflüsse innerhalb eines Diagramms abgebildet werden. Es kommen die in Abb. C.1 dargestellten Artefakte dafür zu Einsatz.

C.2. Darstellung von Zuständen

Für die Repräsentation von zustandsbasierten Abläufen findet das Zustandsdiagramm der UML 2.5 seine Anwendung. Hiermit können hierarchische Zustandsgraphen beschrieben werden, welche das Verhalten eines Systems oder Teilsystems abbilden. Dazu werden die in Abb. C.2 gezeigten Artefakte eingesetzt.

C.3. Darstellung von statischen Zusammenhängen

Strukturelle Zusammenhängen werden in Form von Klassendiagrammen dargestellt. Der Übersichtlichkeit geschuldet sind in dieser Arbeit die Attribute und Methoden nicht mit aufgeführt.

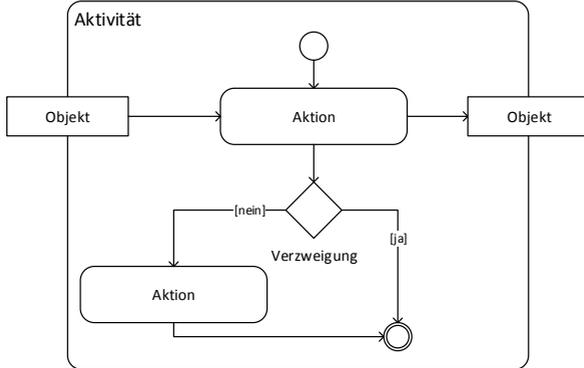


Abbildung C.1.: Aktivitätsdiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten

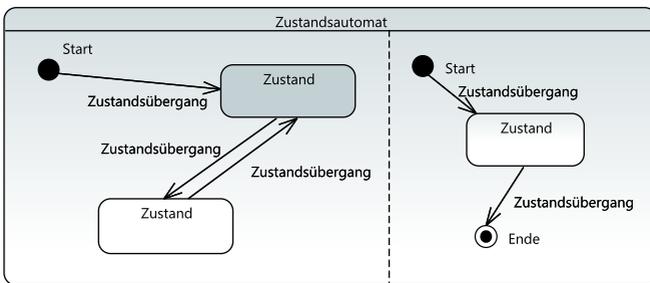


Abbildung C.2.: Zustandsdiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten

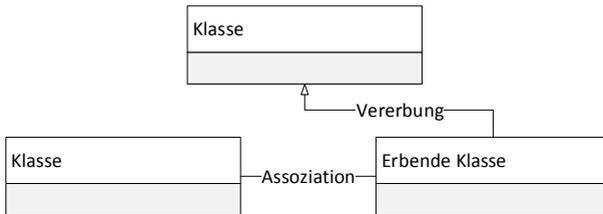


Abbildung C.3.: Klassendiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten

C.4. Darstellung dynamischer Abläufe

Sequenzdiagramme der UML werden für die Darstellung von Programmabläufen verwendet. Mit diesen Diagrammen lässt sich die Abfolge von dynamischen Abläufen formalisiert darstellen. Die in dieser Arbeit eingesetzten Artefakte sind in Abb. C.4 abgebildet.

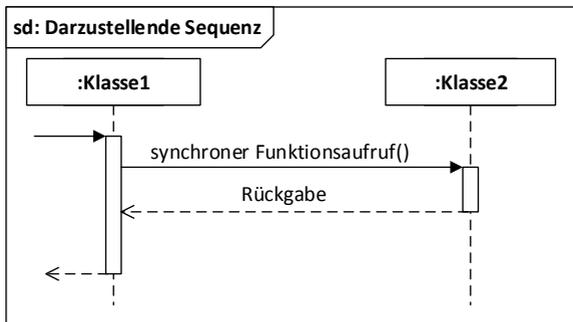


Abbildung C.4.: Sequenzdiagramm der UML 2.5 mit verwendeten Artefakten

D. Variation eines Basisszenarios

In Abb. D.1 ist die Ausgangskonstellation eines Basisszenarios dargestellt, das aus drei Pkws und einem Lkw besteht. Dieses wird anhand von zwei Parametern (Differenzgeschwindigkeiten Δv_1 und Δv_2) variiert und mit den beiden Optionen (1 und 2) als mögliche Manöver für das grüne Fahrzeug simuliert. Am Ende der Simulation werden jeweils die kollektiven Energien (CE Werte) verglichen und damit das effizientere Manöver ermittelt. [Hen15]

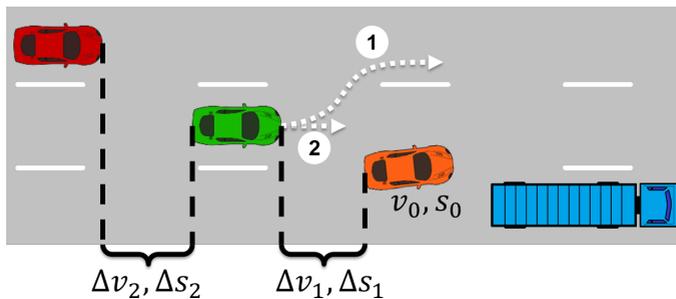


Abbildung D.1.: Ausgangssituation des zu variierenden Basisszenarios

Größe	Wert	Einheit
Geschwindigkeit v_0	100	km/h
Differenzgeschwindigkeit Δv_1	0	km/h
Differenzgeschwindigkeit Δv_2	0	km/h
Differenzabstand Δs_1	100	m
Differenzabstand Δs_2	100	m

Tabelle D.1.: Startbedingungen des Basisszenarios aus Abb. D.1

Tabelle D.1 enthält die konkreten Simulationsergebnisse für das untersuchte Basisszenario in Abb. D.1.

Die Variation der beiden Ausgangsgrößen Δv_1 und Δv_2 wird in 5km/h -Schritten im Bereich von 0km/h bis 120km/h durchgeführt, was nach Gl. (7.1) zu 1250 Simulationen führt. Werden diese vollständig simuliert und die Ergebnisse aufgezeichnet, lässt sich daraus das in Abb. D.2 zu erkennende 2D-Diagramm erstellen. Der rote Bereich (2) spiegelt die Anfangsbedingungen wider, bei denen das Manöver *Bremsen* kollektiv weniger Energie benötigt, als ein *Spurwechsel nach links*. Der grüne Bereich (1) gibt die Konstellationen an, für die das *Spurwechsel* Manöver effizienter ist.

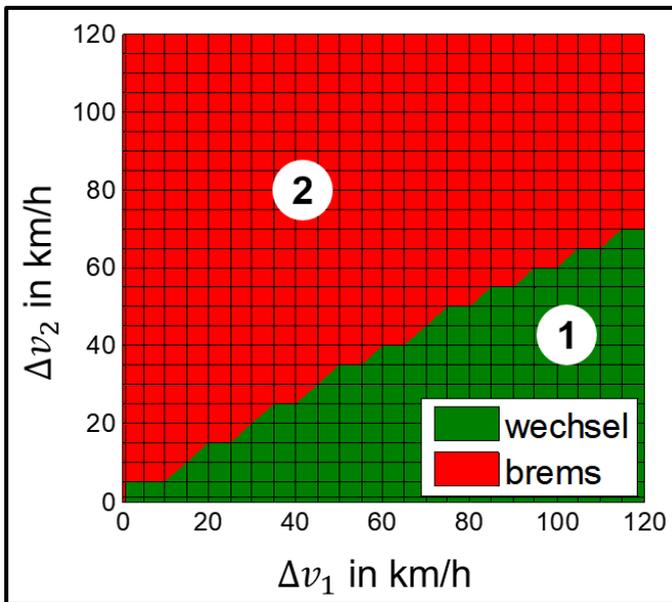


Abbildung D.2.: Entscheidungsdiagramm auf Basis der Simulationsergebnisse nach [Hen15]

E. Beispiel einer Testszenariobeschreibung

Lst. E.1 zeigt die Beschreibung eines Szenarios zur Simulation in IPG CarMaker für die Untersuchungen mithilfe der Sensitivitätsanalyse aus Kap. 5.

```
1 #INFOFILE1.1 – Do not remove this line!  
2 FileIdent = CarMaker-TestRun 5.0  
3 FileCreator = CarMaker 5.0.2 2015-9-14  
4 Description:  
5 Vehicle = EnoTraFlow_DemoCar  
6 VehicleLoad.0.mass = 0  
7 VehicleLoad.0.pos = 0 0 0  
8 VehicleLoad.1.mass = 0  
9 VehicleLoad.1.pos = 0 0 0  
10 VehicleLoad.2.mass = 0  
11 VehicleLoad.2.pos = 0 0 0  
12 VehicleLoad.3.mass = 0  
13 VehicleLoad.3.pos = 0 0 0  
14 TrailerLoad.0.mass = 0  
15 TrailerLoad.0.pos = 0 0 0  
16 TrailerLoad.1.mass = 0  
17 TrailerLoad.1.pos = 0 0 0  
18 TrailerLoad.2.mass = 0  
19 TrailerLoad.2.pos = 0 0 0  
20 DrivMan.Init.Velocity = $startSpeed=130  
21 DrivMan.Init.GearNo = $gear=5  
22 DrivMan.Init.SteerAng = 0  
23 DrivMan.Init.LaneOffset = 0  
24 DrivMan.Init.OperatorActive = 1  
25 DrivMan.Init.OperatorState = drive  
26 DrivMan.VhclOperator.Kind = IPGOperator 1  
27 DrivMan.nDMan = 2  
28 DrivMan.0.DistLimit = $distance1=500  
29 DrivMan.0.LongDyn = Driver 1 0 $midSpeed=160  
30 DrivMan.0.LatDyn = Driver 0
```

```
31 DrivMan.1.DistLimit = $distance2=500
32 DrivMan.1.LongDyn = Driver 1 0 $endSpeed=130
33 DrivMan.1.LatDyn = Driver 0
34 Traffic.N = 0
35 Traffic.SpeedUnit = ms
36 DrivMan.Ow.Active = 0
37 DrivMan.Ow.Quantities = Time
38 DrivMan.Ow.StartGearNo = 1
39 DrivMan.Ow.StartVelocity = 0.0
40 DrivMan.Ow.GasMax = 0.5
41 DrivMan.Ow.Time.Name =
42 DrivMan.Ow.Time.Factor = 1.0
43 DrivMan.Ow.Time.Offset = 0.0
44 ErrorClass.0.Action = abort
45 ErrorClass.0.Save = 0
46 ErrorClass.0.WarningLimit = 3 5
47 ErrorClass.1.Action = abort
48 ErrorClass.1.Save = 0
49 ErrorClass.1.WarningLimit = 3 5
50 ErrorClass.2.Action = abort
51 ErrorClass.2.Save = 0
52 ErrorClass.2.WarningLimit = 3 5
53 ErrorClass.3.Action = abort
54 ErrorClass.3.Save = 0
55 ErrorClass.3.WarningLimit = 3 5
56 ErrorClass.4.Action = abort
57 ErrorClass.4.Save = 0
58 ErrorClass.4.WarningLimit = 3 5
59 ErrorClass.5.Action = abort
60 ErrorClass.5.Save = 0
61 ErrorClass.5.WarningLimit = 3 5
62 ErrorClass.10.Action = abort
63 ErrorClass.10.Save = 0
64 ErrorClass.10.WarningLimit = 3 5
65 ErrorClass.11.Action = abort
66 ErrorClass.11.Save = 0
67 ErrorClass.11.WarningLimit = 3 5
68 Road.VhclStartPos = 0
69 Road.Lane = center
70 Road.DigSmooth = 0.2 0 0
71 Road.DigOptions =
72 Road.Country = DEU
73 Road.Routeld =
74 Road.GCS.RefPos_0 = 0 0 0
75 Road.GCS.Projection = FlatEarth
76 Road.2Movie.MStrip = 0.12 3 6
77 Road.2Movie.SStrip = 0.12 0 0 0.1
```

```
78 Road.2Movie.GStrip = 1.50 100
79 Road.2Movie.MaxErrXY = 0.02
80 Road.2Movie.GeoStepSize = 0.20
81 Road.2Movie.GenBridges = 1
82 Road.2Movie.BgGeoFName =
83 Road.2Movie.BgGeoOptions =
84 Road.2Movie.TerrainFName =
85 Road.Definition:
86 FileIdent IPGRoad 4.5
87 Origin 0 0 0 0
88 Default 3.00 3.00 0.50 0.50 1.0 1.0 - 0 0 - 0 0
89 Straight 10000 - - - 0 0 0
90 Env.StartTime.Year = 2014
91 Env.StartTime.Month = 1
92 Env.StartTime.Day = 1
93 Env.StartTime.Hour = 12
94 Env.StartTime.Min = 0
95 Env.StartTime.Sec = 0
96 Env.StartTime.DeltaUTC = 0.0
97 Env.GNSS.Active = 0
98 Env.Temperature = 20.0
99 Env.AirDensity = 1.205
100 Env.AirPressure = 1.013
101 Env.AirHumidity = 60
102 Env.SolarRadiation = 400.0
103 Env.Wind.Kind = none
104 Env.Wind.Velocity = 0.0
105 Env.Wind.Angle = 0.0
106 Env.Kind = Generic
107 Env.Temp.Offset_Elev = -0.0065
108 Env.Temp.Offset_sRoad.Amplify = 1.0
109 Env.Temp.Offset_sRoad.On = 0
110 Env.Temp.Offset_Time.Amplify = 1.0
111 Env.Temp.Offset_Time.On = 1
112 Env.Temp.Offset_Time:
113 0.0 -2.0
114 3.0 -2.5
115 6.0 -2.7
116 7.5 -2.7
117 9.0 -2.5
118 10.0 -2.3
119 11.0 -1.6
120 12.0 0.0
121 13.0 1.4
122 14.0 2.1
123 15.5 2.5
124 17.0 2.2
```

E. Beispiel einer Testszzenariobeschreibung

```
125 18.0 1.7
126 19.0 1.1
127 20.0 0.2
128 21.0 -0.6
129 22.0 -1.1
130 23.0 -1.6
131 24.0 -2.0
132 Env.Variations.0.Mean = 130
133 Env.Variations.0.Name = startSpeed
134 Env.Variations.0.Values = 100:2:160.001
135 Env.Variations.1.Mean = 130
136 Env.Variations.1.Name = endSpeed
137 Env.Variations.1.Values = 100:2:160.001
138 Env.Variations.10.Mean = 1.05
139 Env.Variations.10.Name = additional
140 Env.Variations.10.Values = 1:0.005:1.10001
141 Env.Variations.2.Mean = 0.5
142 Env.Variations.2.Name = acceler
143 Env.Variations.2.Values = 0.2:0.025:1.001
144 Env.Variations.3.Mean = 1300
145 Env.Variations.3.Name = mass
146 Env.Variations.3.Values = 800:50:3500.001
147 Env.Variations.4.Mean = 160
148 Env.Variations.4.Name = midSpeed
149 Env.Variations.4.Values = 130:2:190.001
150 Env.Variations.5.Mean = 500
151 Env.Variations.5.Name = distance2
152 Env.Variations.5.Values = 250:100:2500.001
153 Env.Variations.6.Mean = -1.5
154 Env.Variations.6.Name = dacceler
155 Env.Variations.6.Values = -3:0.1:-0.1999
156 Env.Variations.7.Mean = 500
157 Env.Variations.7.Name = distance1
158 Env.Variations.7.Values = 250:100:2500.001
159 Env.Variations.8.Mean = 0.2
160 Env.Variations.8.Name = cw
161 Env.Variations.8.Values = 0.1:0.01:0.4001
162 Env.Variations.9.Mean = 0.008
163 Env.Variations.9.Name = roll
164 Env.Variations.9.Values = 0.005:0.0005:0.015001
165 Driver.ParamIdent = IPGDriver 5
166 Driver.Mode = std
167 Driver.Long.DrivMaxSpeed = 0
168 Driver.Long.CruisingSpeed = 150
169 Driver.CornerCutCoef = 0.5
170 Driver.ConsiderTraffic = 1
171 Driver.Traffic.TimeGapMin = 1.8
```

```
172 Driver.Traffic.TimeGapMax = 5.0
173 Driver.Traffic.DistMin = 6
174 Driver.Traffic.DistMax = 250
175 Driver.Traffic.EcoCoef = 0.75
176 Driver.Traffic.Overtake = 0
177 Driver.Traffic.Overtake_Rate = 1
178 Driver.Traffic.Overtake_dSpeedMin = 10
179 Driver.Long.dtAccBrake = 0
180 Driver.Long.axMax = $acceler=0.5
181 Driver.Long.axMin = $dacceler=-1.5
182 Driver.Long.ayMax = 4.0
183 Driver.Long.GGExp:
184 50 1.0 1.0
185 Driver.Long.DevMax = 0.0
186 Driver.Long.tReact = 0.0
187 Driver.Long.TractionControl = 1
188 Driver.DecShift.UseBrakePark = 0
189 Driver.DecShift.tSwitchGear = 1.0
190 Driver.DecShift.nEngine.Limits:
191 1500 4000
192 Driver.DecShift.nEngine.Shift:
193 2000 3000
194 Driver.Lat.DevMax = 0.0
195 Driver.Lat.tReact = 0.0
196 Driver.Knowl.Long.tActionMin = 4
197 Driver.Knowl.Lat.StWhlAngleMax = 630
198 Driver.Knowl.Lat.StWhlAngleVelMax = 500
199 Driver.Knowl.Lat.StWhlAngleAccMax = 3000
200 Driver.Learn.VehicleLimits.TestRun =
201 Driver.Learn.VehicleLimits.Date = 0
202 Driver.Learn.ControllerDyn.TestRun =
203 Driver.Learn.ControllerDyn.Date = 0
204 Driver.Learn.MaxSpeed.TestRun =
205 Driver.Learn.MaxSpeed.Date = 0
206 Driver.Learn.Remember = 0
207 Driver.Knowl.Long.tPreviewBra = 0.6
208 Driver.Knowl.Long.tPreviewAcc = 1.5
209 Driver.Knowl.Lat.tPreview = 0.8
210 Driver.Learn.NEng_S = 1
```

Listing E.1: Beispiel einer Testszenariobeschreibung