Forschungsberichte

IPEK
Institut für Produktentwicklung
am Karlsruher Institut für Technologie

Sebastian Lutz

Beitrag zur Entwicklung von Validierungsumgebungen für Fahrerassistenzsysteme im Kontext des IPEK-XiL- Ansatzes auf Gesamtfahrzeugebene mit Hilfe der Sensorstimulation

A contribution to the development of validation environments for advanced driver assistnce systems in the context of the IPEK-XiL approach at the complete vehicle level with sensor stimulation

Band 206

Systeme ▪ Methoden ▪ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Forschungsberichte

Sebastian Lutz

Beitrag zur Entwicklung von Validierungsumgebungen für Fahrerassistenzsysteme im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes auf Gesamtfahrzeugebene mit Hilfe der Sensorstimulation

A contribution to the development of validation environments for advanced driver assistance systems in the context of the IPEK-XiL approach at the complete vehicle level with sensor stimulation

Band 206

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2026
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Beitrag zur Entwicklung von Validierungsumgebungen für Fahrerassistenzsystemen im Kontext des IPEK-XiL-Ansatzes auf Gesamtfahrzeugebene mit Hilfe der Sensorstimulation

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M. Sc. Sebastian Lutz

Tag der mündlichen Prüfung:	24.07.2026
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

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

Vorwort zu Band 206

Die Fahrzeugtechnik befindet sich seit Jahren in einem tiefgreifenden Wandel. Neben der Elektrifizierung, der Digitalisierung und der Vernetzung ist insbesondere die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen zu einem prägenden Innovationsfeld geworden. In zahlreichen Teilbereichen der Technikentwicklung konnten beachtliche Fortschritte erzielt werden. Zugleich zeigt sich jedoch immer deutlicher, dass gerade die Entwicklung hoch automatisierter und autonomer Fahrfunktionen mit einer außerordentlich hohen technischen, methodischen und organisatorischen Komplexität verbunden ist. Die Herausforderung liegt dabei nicht allein in der funktionalen Realisierung entsprechender Automatisierungen für die Fahrzeugen, sondern in einem besonderen Maße in deren belastbaren Absicherung und Validierung. Erkennbar ist diese große Herausforderung auf dem Gebiet des autonomen Fahrzeugs in der doch relativ langsamen Realisierung echter Fahrzeuglösungen im Markt. Natürlich gibt es Nischenlösungen, wie die Waymo Taxis, aber insgesamt ist selbst die Darstellung von Level-3-Fahrzeugen noch eine große Herausforderung, so dass ihr Anteil am Markt gering ist. Gerade für hohe Automatisierungsgrade - hin bis zu fahrerlosen Systemen - wird immer klarer, dass eine rein konventionelle Erprobung auf der Straße an prinzipielle Grenzen stößt. In der Literatur wird seit Jahren darauf hingewiesen, dass zur statistischen belastbaren Absicherung hoch automatisierter Fahrzeuge auf Basis der klassischen, realen Fahrerversuche Testumfänge erforderlich wären, die praktisch nicht mehr beherrschbar sind. Kalra und Paddock zeigen in ihrer oft zitierten Veröffentlichung „Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability?" aus dem Jahre 2016, dass autonome Fahrzeuge je nach zugrunde gelegter Fragestellung hunderte Millionen bis hin zu vielen Milliarden Testkilometer absolvieren müssten. Für den häufig diskutiert Fall des Nachweises einer um 20 % besseren Sicherheitsleistung gegenüber menschlichen Fahrern werden demnach mehr als 10 Milliarden Kilometer angegeben, was selbst bei einer Flotte von 100 Fahrzeugen mehrere Jahrhunderte beanspruchen würde. Für andere statistische Nachweisfragen liegen die Größenordnungen noch immer im Bereich von Milliarden Kilometern. Damit wird sehr deutlich, dass der Validierungsaufwand für hohe Automatisierungsgrade mit konventionellen Mitteln allein nicht wirtschaftlich und teilweise nicht einmal grundsätzlich realisierbar ist. Vor diesem Hintergrund müssen neue Ansätze der Validierung erforscht, methodisch fundiert beschrieben und in geeigneten Entwicklungs- und Prüfprozessen verankert werden. Hierzu zählen insbesondere gemischt-physisch-virtuelle Ansätze, mit denen sich reale und virtuelle Anteile der System-, Umwelt- und Nutzungsrepräsentation in geeigneter Weise kombinieren lassen.

Genau hier liegt seit mehr als 25 Jahren ein zentrales Forschungsgebiet in der Forschungsgruppe des Unterzeichners. Ein wesentlicher Kernbaustein der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung ist dabei der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL). Dieser greift etablierte XiL-Ausprägungen auf, integriert deren jeweilige Stärken und erweitert sie konsequent um die Belange der Mechanik und Mechatronik, bis hin zu cyberphysischen Systemen, als die man moderne Fahrzeuge einordnen kann. Dabei geht es auch um die systematische Einbindung von Gesamtsystem, Umwelt und weiteren interagierenden Systemen und natürlich ganz besonders auch des Fahrers. Die Wechselwirkungen mit der Infrastruktur, die zunehmend auch eine Rolle spielen, durch einen konsequenten Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen, aber auch zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur, wie zum Beispiel Ampelsystemen, ist ein weiteres Gebiet, das hier integriert wird. Ziel ist es, mit dem IPEK-XiL-Ansatz eine durchgängige, ganzheitliche und am Produktentstehungsprozess orientierte Validierung technischer Systeme unter Nutzung gemischt physisch-virtueller Entwicklungs- und Validierungsumgebungen zu gestalten und zu realisieren. Vor diesem Hintergrund kommt natürlich der Erforschung und Entwicklung neuer Validierungsumgebungen für automatisierte Fahrfunktionen eine hohe Bedeutung zu. Genau hier ist auch die Arbeit von Herrn Sebastian Lutz einzuordnen. Sie adressiert die Frage, wie sensorstimulierte, gemischt physisch-virtuelle Validierungsumgebungen auf Gesamtfahrzeugebene aufgebaut und benutzt werden können, um die Absicherung von Fahrassistenz und Automatisierungsfunktionen methodisch weiterzuentwickeln und deren Übergang zwischen konventioneller Erprobung, Prüfstandsuntersuchung und virtueller Absicherung systematisch zu gestalten. Sein Fokus liegt dabei in der Sensorstimulation.

September, 2026 Albert Albers

Kurzfassung

Der Automobilindustrie begegnen aktuell mehrere Megatrends. Neben der Elektrifizierung des Antriebsstrangs (Siebenpfeiffer, 2013) und einer immer stärkeren Vernetzung mit der Umwelt (Sikora, Lill, Schappacher, Gutjahr & Gerber, 2013), stellt die Automatisierung der Fahrzeugführung eine große Herausforderung für Fahrzeughersteller sowie deren Zulieferer dar (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2015). Klassische mechanische Komponenten treten bei diesem Wandel immer weiter in den Hintergrund. Diese Veränderungen bringen neue Firmen auf das Gebiet der Fahrzeugentwicklung. Dabei engagieren sich mittlerweile immer mehr IT Unternehmen wie Google (/Waymo) (DPA, 2024), Sony (Sony Group Corp., 2022) oder Samsung (Mouchegh, 2023) sowie Chipentwickler Intel (McDowell, 2024), Qualcomm (Freund, 2024) oder Nvidia (Nuttall, 2020) in Fahrzeugentwicklungsprojekten. Mit den neuen technischen Lösungen bedarf es auch neuer Ansätze in der Produktentwicklung. In diesem Zusammenhang bietet die vorliegende Forschungsarbeit Unterstützung beim Aufbau von Validierungsumgebungen für Fahrerassistenzfunktionen. Hierzu wirken mit Hilfe der Sensorstimulation gemischt physisch-virtuelle Umwelteindrücke auf das zu entwickelnde System. Auf diesem Weg ist die Kombination von hoher Reproduzierbarkeit mit einer starken Repräsentanz der Untersuchung möglich. Der Fokus wird in der vorliegenden Arbeit auf die Gesamtfahrzeugebene gelegt, um eine Absicherung der einzelnen Komponenten (Sensorik, Perception, Pathplaning, Aktorik) und deren Zusammenwirken im Systemverbund zu ermöglichen. Zum Einsatz kommt hierzu der Fahrzeugrollenprüfstand, welcher bereits heute in der Entwicklung eingesetzt wird und eine reproduzierbare Umgebung auf Gesamtfahrzeugebene bietet (Düser et al., 2011).

Der Rollenprüfstand hat sich in den letzten Jahren als effektives Entwicklungswerkzeug für Untersuchungen am Antriebsstrang des Gesamtfahrzeugs etabliert (Paulweber & Lebert, 2014). Seine Vorteile hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Kontrollierbarkeit der Untersuchungsbedingungen bieten ein großes Potential für Untersuchungen an Fahrerassistenzfunktionen im Verbund mit dem Restfahrzeug. Um dies zu realisieren müssen aktuellen Prüfstände allerdings weiterentwickelt werden. Beispielsweise bedarf es Erweiterungen, sodass Fahrzeugsensoren trotz der notwendigen Prüfstandsaufbauten, wie der Fahrzeugfixierung oder Kühlung, ihre Funktion uneingeschränkt erfüllen können.

Etablierte Entwicklungsumgebungen, wie das Testgelände oder der öffentliche Straßenverkehr, werden in dieser Arbeit zu Beginn analysiert. Bei diesem Vorgehen wird sowohl das Verhalten von Fahrerassistenzfunktionen unter rein physischen Umwelteindrücken erfasst, als auch die Vor- sowie Nachteile dieser Umgebungen nachvollzogen. Basierend auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz wird anschließend ein Vorgehen entworfen, das auf den Aufbau von gemischt physisch-virtuellen Validierungsumgebungen für automatisierte Fahrfunktionen ausgerichtet ist. Ergebnis dieses Vorgehens ist die stärkere Verlagerung von Entwicklungsfahrten von der Straße auf einen Rollenprüfstand.

Vor diesem Hintergrund wird das zuvor entworfene Vorgehen für den Aufbau einer Umgebung für Untersuchungen an der Ultraschall-Einparkhilfe mit Einbindung des Rollenprüfstands durchlaufen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden daraufhin beim Aufbau einer Umgebung zur Validierung kamerabasierter Assistenzfunktionen weiter vertieft. Hierdurch werden Untersuchungen möglich, die Szenario-basiert Grenzen des Gesamtsystems herausarbeiten.

Um die Anwendung des Vorgehens zu veranschaulichen, werden darauf folgend drei Beispiele vorgestellt. Diese demonstrieren die Anwendung für Aufbauten an einem Monokamera-basierten Assistenzsystem. Als erstes wird dabei analysiert, wie der vom Fahrenden am ACC-System eingestellte Wunschabstand die Auffahrt auf ein stehendes Fahrzeug beeinflusst. Das gleiche Szenario wird auch verwendet, um Untersuchungen auf dem Testgelände bei ungünstigen Lichtverhältnissen durch einsetzende Dämmerung in die Prüfstandsumgebung zu übertragen. Hierbei beeinträchtigt das stärker werdende Bildrauschen und die längere Belichtungszeit die Objekterkennung, sodass die zunehmende Dunkelheit eine besondere Herausforderung für die Kamerasensorik sowie deren Bildauswertealgorithmen darstellt. Zuletzt wird eine Umgebung für die Vorentwicklungen an einer multikriteriellen Fahrstrategieplanung aufgebaut. Hierdurch wird die Möglichkeit geschaffen, schon zu einem früheren Entwicklungszeitpunkt Erkenntnisse über Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugautomatisierung und dem Antriebsstrang des Gesamtfahrzeugs zu gewinnen. Es wird gezeigt, dass das entwickelte Vorgehen bei einer Vielzahl von Entwicklungsstadien eingesetzt werden kann und somit ein fließender Übergang zwischen den etablierten Entwicklungsumgebungen ermöglicht wird.

Abstract

The automotive industry is currently facing several megatrends. In addition to the electrification of the powertrain (Siebenpfeiffer, 2013) and increasing connectivity with the environment (Sikora, Lill, Schappacher, Gutjahr & Gerber, 2013), the automation of vehicle control poses a major challenge for vehicle manufacturers and their suppliers (VDA: German Association of the Automotive Industry, 2015). Traditional mechanical components are increasingly taking a back seat in this transformation. These changes are bringing new companies into the field of vehicle development. As a result, more and more IT companies such as Google (/Waymo) (DPA, 2024), Sony (Sony Group Corp., 2022), and Samsung (Mouchegh, 2023), as well as chip developers Intel (McDowell, 2024), Qualcomm (Freund, 2024), and Nvidia (Nuttall, 2020), are now involved in vehicle development projects. With these new technical solutions, new approaches to product development are also required. In this context, the present research provides support for the creation of validation environments for driver assistance functions. To this end, mixed physical-virtual environmental stimuli are applied to the system under development using sensor stimulation. This approach makes it possible to combine high reproducibility with strong representativeness of the investigation. This study focuses on the complete vehicle level to enable the validation of individual components (sensors, perception, path planning, actuators) and their interaction within the system-vehicle. For this purpose, a vehicle roller test bench is used, which is already used in development today and provides a reproducible environment at the complete vehicle level (Düser et al., 2011).

In recent years, the roller dynamometer has established itself as an effective development tool for testing the powertrain of the complete vehicle (Paulweber & Lebert, 2014). Its advantages in terms of reproducibility and controllability of test conditions offer great potential for testing driver assistance functions in conjunction with the rest of the vehicle. To achieve this, however, current test benches must be further developed. For example, modifications are needed so that vehicle sensors can function without restriction despite the necessary test bench fixtures, such as vehicle mounting or cooling systems.

This thesis begins by analyzing established development environments, such as test tracks and public roads. This approach captures the behavior of driver assistance functions under purely physical environmental conditions and identifies the

advantages and disadvantages of these environments. Based on the IPEK X-in-the-Loop approach, a methodology is then designed that focuses on the creation of hybrid physical-virtual validation environments for automated driving functions. The result of this approach is a greater shift of development driving from the road to a roller test bench.

With this in mind, the previously outlined procedure for setting up an environment to test the ultrasonic parking assist system, incorporating the roller test bench, will be implemented. The insights gained from this process will then be further developed when setting up an environment to validate camera-based assistance functions. This will enable scenario-based testing to identify the limits of the overall system.

To illustrate how this approach is applied, three examples are presented below. These demonstrate its application to the architecture of a single-camera-based driver assistance system. First, we analyze how the target distance set by the driver in the ACC system affects the approach to a stationary vehicle. The same scenario is also used to transfer investigations conducted on the test track under unfavorable lighting conditions—due to the onset of twilight—to the test bench environment. Here, the increasing image noise and longer exposure time impair object detection, so that the growing darkness poses a particular challenge for the camera sensors and their image analysis algorithms. Finally, an environment is being established for preliminary development of a multi-criteria driving strategy planning system. This creates the opportunity to gain insights into the interactions between vehicle automation and the powertrain of the entire vehicle at an earlier stage of development. It is demonstrated that the developed approach can be applied across a wide range of development stages, thereby enabling a seamless transition between established development environments..

Danksagungen

Diese Forschungsarbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entstanden.

Allen voran gilt ganz besonderer Dank meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, welcher durch die vielen wissenschaftlichen Gespräche und Diskussionen maßgeblich Einfluss auf die Forschungsarbeit genommen hat. Ohne das entgegengebrachte Vertrauen, wertvollen Impulse und Offenheit für neue Lösungen wäre diese Arbeit nicht denkbar gewesen.

Bei Herrn Professor Dr. Ing. Marcus Geimer bedanke ich mich sehr für die Übernahme des Korreferats, wodurch nochmals neue Blickwinkel auf Forschungsthemen ermöglicht sowie wertvolle Impulse gegeben wurden.

Über die gesamte Zeit am Institut hinweg bietet das IPEK als Forschungsumgebung ganz besondere Möglichkeiten und Chancen zur Weiterentwicklung. In diesem Zusammenhang möchte ich dem ganzen IPEK-Team danken, das durch seine vielfältigen Kollegen einen ganz besonderen Einfluss auf die persönliche Weiterentwicklung in dieser Zeit hatte. In diesem Zusammenhang sticht natürlich die Forschungsgruppe NVH/Systemvalidierung ganz besonders hervor. Als sicherer Hafen und Anlaufstelle zur Diskussion von Forschungsfragen bestand damit immer die Möglichkeit zum wissenschaftlichen Austausch.

Neben den wissenschaftlichen Kollegen tragen allerdings auch die liebevolle Administration mit einer unermüdlichen Geduld und Übersicht für Abläufe und Prozesse in den Mühlen einer universitären Organisation zum immer positiven Arbeitsklima bei. Hier stellvertretend besonderer Dank an Frau Müller und das Team im 8. OG.

In Zeiten von Homeoffice und Zoom-Lehre rückt eine Tatsache ganz besonders in den Fokus. Ohne IT bewegt sich im Alltag nichts. An dieser Stelle einen ganz besonderen Dank dem Rückgrat der Instituts-IT Uwe Weber und Branko Trömer, die jede Herausforderung bereitwillig angenommen haben und auch vor neuem technischem Gerät nie zurückschreckten.

Auch möchte ich mich ausdrücklich bei all den Studierenden bedanken, welche ich über die Zeit am Institut bei ihren Abschlussarbeiten betreuen durfte oder die als wissenschaftliche Hilfskräfte ihren Beitrag geleistet haben. Ohne deren Mitarbeit und regelmäßigen Austausch wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen.

Bei meiner Freundin Pina möchte ich mich an dieser Stelle von ganzen Herzen für Ihre grenzenlose Hilfsbereitschaft und die vielen Korrekturen bedanken. Als Stütze in langwierigen Prozessen wäre diese Arbeit ohne sie nicht denkbar.

Abschließend gilt mein größter Dank meiner Familie. Ohne meine Eltern und deren unermüdliche Unterstützung auf diesem herausfordernden Weg wäre dieser Erfolg nicht möglich gewesen.

Karlsruhe, den 27.09.2026

Sebastian Lutz

„Ein Mann, der recht zu wirken denkt, muss auf das beste Werkzeug halten.“
Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832).

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung ..... **i**

Abstract ..... **iii**

Inhaltsverzeichnis ..... **ix**

Abbildungsverzeichnis ..... **xiii**

1 Einleitung **1**
1.1. Motivation 1
1.2. Fokus der Arbeit 3
1.3. Aufbau der Arbeit 5

2 Stand der Forschung und Technik **7**
2.1. Fahrzeugführung und deren Automatisierung 7
2.1.1. Grundlegende Modelle der Fahrzeugführung 8
2.1.2. Aufbau und Ablauf von automatisierten Fahrfunktionen 13
2.1.3. Einsatz von Sensoren zur Fahrzeugautomatisierung 19
2.1.4. Bildauswertung und adaptive Abstandsregelungen im Automobil 31
2.1.5. Fahrzeugarchitekturen und Vernetzung für automatisierte Fahrfunktionen 39
2.1.6. Bezeichnungen von Fahrerassistenz- und Automatisierungsfunktionen 44
2.2. Validierung im Produktentstehungsprozess 50
2.2.1. Verifikation und Validierung als Bestandteil des IPEM 50
2.2.2. Das IPEK-X-in-the-Loop-Framework 53
2.3. Wie erfolgt Validierung von Fahrerassistenzsystemen heute? 57
2.3.1. Leitgedanken für die Entwicklung von Testabläufen und Validierungsumgebungen 60
2.3.2. Richtlinien für die Unterstützung bei der Entwicklung von Testabläufen 62
2.3.3. Etablierte Ansätze zur Validierung von Fahrzeugautomatisierungen 63
2.3.4. Ergebnisse vorheriger Forschungsprojekte 79

2.3.5. Herausforderungen und Einschränkungen bei der Entwicklung von Automatisierungen 80
2.3.6. Anwendung des IPEK-XiL-Ansatz bei der Validierung von ADAS/AD zur Verkleinerung der Lücken zwischen den Validierungsumgebungen 80

3 Bedarf und Zielsetzung 85
3.1. Forschungsbedarf 85
3.2. Grundannahmen und Forschungsziel 87
3.3. Forschungsfragen 90

4 Forschungsumgebung und -vorgehen 93
4.1. Forschungsumgebungen und Randbedingungen 93
4.1.1. Forschungsfahrzeuge 93
4.1.2. Der Akustikrollenprüfstand des IPEK 98
4.1.3. Testgelände auf dem Campus Ost des KIT 99
4.2. Forschungsvorgehen 100

5 Entwicklung eines Vorgehens zum Aufbau einer Sensorstimulation 103
5.1. Entwurf eines Vorgehens zum Aufbau einer Sensorstimulation 104
5.1.1. Definition der Validierungsziele 105
5.1.2. Auswahl eines geeigneten Szenarios 106
5.1.3. Gestaltung des Systemmodells „Umwelt“ 107
5.1.4. Aufbau der Sensorstimulation 111
5.1.5. Beispiele: Helligkeits-, Regen- und Beschleunigungssensor 115
5.1.6. Einbindung in Restumgebung mit Integration des Rollenprüfstands 119
5.1.7. Signalübertragung und -wandlung zwischen den Elementen der Umgebung 120
5.2. Anwendung des Vorgehens für die Validierung der ultraschallbasierten Parkhilfe 124
5.2.1. Definition des Validierungsziels mit der Auswahl eines geeigneten Szenarios und der Gestaltung des Systemmodells „Umwelt“ 124
5.2.2. Konzeption der Ultraschall-Stimulation 127
5.2.3. Kombination von Rollenprüfstand mit Ultraschall-Stimulatoren und virtueller Umweltsimulation 133
5.2.4. Weiterentwicklung des Vorgehens aus der Anwendung auf das Ultraschall-Einparksystem 134
5.3. Weiterentwicklung des Vorgehens zur Stimulation der Kamera-Sensorik 135
5.3.1. Konzeption der Kamerastimulation 139

5.3.2. Anwendung der Leinwand zur Stimulation des kamerabasierten ACC -Systems 142
5.3.3. Anwendung des kompakten Kamerastimulators zur Validierung kamerabasierter ACC-Systeme 144
5.3.4. Kombination des kompakten Kamera-Stimulators mit dem Rollenprüfstand zur Validierung des kamerabasierten ACC-Systems .. 149
5.3.5. Zwischenfazit zur Weiterentwicklung des Vorgehens durch die Anwendung auf das kamerabasierten ACC-System 150
5.4. Kenngrößen für die Optimierung eines ACC-Systems bei Auffahrmanövern 151
5.5. Zusammenfassung und Zwischenfazit 152

6 Anwendung des Vorgehens zur Validierung der kamerabasierten Assistenzfunktionen 155
6.1. Untersuchungen an den Wunschabstandsstufen des ACC-Systems ... 157
6.1.1. Vorstellung der eingesetzten Validierungsumgebungen 160
6.1.2. Aufbau der Sensorstimulation 169
6.1.3. Einbindung in die Restumgebungen 172
6.1.4. Vorstellung der Referenzmesswerte vom Testgelände 174
6.1.5. Einsatz einer virtuellen Umweltsimulation (online generiertes Bildmaterial durch IPG CarMaker) 176
6.1.6. Einsatz eines Bilderkatalogs (offline generiertes Bildmaterial) 182
6.1.7. Zusammenfassung der Untersuchungen an den vier Stufen des ACC-Wunschabstands 186
6.2. Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Dämmerungsszenarien . 188
6.2.1. Messungen auf dem Testgelände mit physischem Target 189
6.2.2. Messungen mit Rollenprüfstand und stimulierter Dämmerung ... 191
6.2.3. Vergleich der Messungen und Erkenntnisse aus den Untersuchungen 193
6.3. Ermöglichung von frühen Validierungsaktivitäten einer multikriterielle Fahrstrategieplanung 195
6.3.1. Integration der Trajektorienplanung in ein hybridelektrisches Fahrzeug 195
6.3.2. Definition des Validierungsziels und Auswahl des Fahrszenarios 196
6.3.3. Gestaltung des System-Modells „Umwelt“ 198
6.3.4. Aufbau der Sensorstimulation 205
6.3.5. Einbindung in die Restumgebung und Durchführung von Messungen 208
6.4. Zusammenfassung und Fazit 212

7 Zusammenfassung und Ausblick 215
7.1. Zusammenfassung 215
7.2. Ausblick 219

Literaturverzeichnis I

Publikationsliste XIX

Anhang XXI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit 5

Abbildung 2.1: Drei Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe (Donges, 1982) 9

Abbildung 2.2: Verhaltenstaxonomie (Rasmussen, 1983)..... 10

Abbildung 2.3: Handlungsmodell nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe (Radlmayr & Bengler, 2015)..... 10

Abbildung 2.4: System-Modelle für „Fahrer“ und „Fahrzeug“ zur Beschreibung der Fahraufgabe (Abendroth, 2001)..... 11

Abbildung 2.5: Modell menschlicher Informationsverarbeitung (Wickens & Carswell, 2006) 12

Abbildung 2.6: Geschlossene Prozesskette des kognitiven Systems (Haun, 2013) 13

Abbildung 2.7: Vereinfachtes Flussdiagramm für Fahrzeugautomatisierungen (Thorn et al., 2018)..... 14

Abbildung 2.8: Sensorschnittstellen nach der ISO TC22/SC31 WG9 „Sensor interface for automated driving functions“ (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2019) 16

Abbildung 2.9: Zusammenfassung der Informationsübertragung von der Reiz-Aufnahme durch den Sensor (Sense) zur -Wahrnehmung (Perception) im Umweltmodell nach (Thorn et al., 2018) und (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2019) 17

Abbildung 2.10: Wahrnehmung (Perception) der automatisierten Fahrfunktion und dafür primär verantwortliche Umweltsensoren für das NVIDIA DRIVE-System (NVIDIA, 2021) 18

Abbildung 2.11: Ultraschallsensor HC-SR04 mit visualisierter Schallausbreitung und Reflexion; 1. Sender, 2. Reflexion an schallharter Oberfläche, 3. Empfänger (Lutz, 2016) 21

Abbildung 2.12: Binäre Aufzeichnung des gesendeten und empfangenen Signals; 1. Gesendetes Signal bei ca. 44 kHz; 2. Zeitpunkt, bei dem die Impulse am Hindernis reflektiert werden; 3. Empfang des Echos (Lutz, 2016) 22

Abbildung 2.13: Links: Ultraschallsensor in einem Stoßfänger eines PKW Rechts: Ultraschallsensor mit Fixierung am Stoßfänger (Winner et al., 2015) 23

Abbildung 2.14: Sensoreinheit für Regen-/ Lichterfassung an der Frontscheibe (Reif, 2012), 1 Regentropfen, 2 Frontscheibe, 3 Umgebungslichtsensor, 4 IR-Leuchtdioden, 5 IR-Photodiode, 6 in die Entfernung gerichteter Lichtsensor.....24

Abbildung 2.15: Foto vom Helligkeits- und Regensensor von Hella, wie er etwa in einem BMW i3 verbaut wird – links die Hauptplatine mit den im Kreis angeordneten Dioden, rechts der Verschlussdeckel mit den eingearbeiteten optischen Linsen.....25

Abbildung 2.16: Kamera (1) und Helligkeits- und Regensensor (2) am Innenspiegelfuß an der Frontscheibe eines BMW i3.....26

Abbildung 2.17: Dreifach-Kamerasystem des Tesla Model 3 mit unterschiedlichen Optiken (SystemPlus, 2020b).....27

Abbildung 2.18: Dreifachkamera S-Cam4 von ZF mit integrierten Bildverarbeitungs-Chips (SystemPlus, 2020c).....28

Abbildung 2.19: Steuergerät (links geschlossen (B-Parts, 2021), rechts die Hauptplatine (Johansson & Oden, 2015) für kamerabasierte Assistenzfunktionen des BMW i3, ausgestattet mit dem Chip EyeQ2 von MobilEye 29

Abbildung 2.20: Foto vom Kamerasystem zum Nachrüsten von Fahrerassistenzfunktionen und Display zur Kommunikation mit dem Fahrer von MobilEye.....30

Abbildung 2.21: Geöffnetes Kamerasystem von MobilEye, bestückt mit dem MobilEye EyeQ2 (FCC, 2012).....31

Abbildung 2.22: Vertikales (1) und horizontales (2) Blickfeld einer Frontview-Kamera (Winner et al., 2015) 32

Abbildung 2.23: Auffahrszenario auf Test-Target mit Anzeige der erfolgreichen Erkennung im Cockpit (1) bestehend aus einem rechteckigen Quader als Grundkörper, einem Schatten unter dem Heck (2) und symmetrisch angebrachten Heckleuchten (3).....33

Abbildung 2.24: Abstandsschätzung durch Projektion der Fahrzeughöhe nach Stein et al. (2003) 34

Abbildung 2.25: Abhängigkeiten zur Schätzung des Abstands zwischen Ego- und Target-Fahrzeug (Stein et al., 2003) 34

Abbildung 2.26: Visualisierung zur abstandsabhängigen Lage des Target-Fahrzeugs aus Sicht des Egofahrzeugs nach (Stein et al., 2003) .35

Abbildung 2.27: Visualisierung der Verschiebung des Horizonts durch eine Bergauf- und Bergabfahrt nach (Stein et al., 2003) 36

Abbildung 2.28: Anzeige der vier Stufen für die Sollzeitlücke und Bedienelemente zur Einstellung des ACC-Systems am Lenkrad eines BMW i3 37

Abbildung 2.29: Überlagerung aus realer Fahrzeug Umgebung und virtueller Repräsentanz des virtuellen Umweltmodells der Fahrzeugautomatisierung eines Tesla Model S im Jahr 2021 (YouTube AI DRIVR, 2021) 39

Abbildung 2.30: Die Domänenarchitektur im Fahrzeug (Habermann et al., 2020) 40

Abbildung 2.31: Steuergerätebaum des BMW i3 (Krause, 2018)..... 42

Abbildung 2.32: Steuergerätebaum zur Veranschaulichung der Komplexität einer modernen Fahrzeugarchitektur am Beispiel des Audi Q7 (Audi AG, 2015a) (zur besseren Lesbarkeit siehe Anhang)..... 43

Abbildung 2.33: Zentrale Architektur im Fahrzeug (Habermann et al., 2020) 44

Abbildung 2.34: Einteilung von Fahrzeugautomatisierungen nach SAE J3016 (SAE, 2016) (ODD – Operational Design Domain; OEDR – Object and event detection, recognition, classification, and response) 45

Abbildung 2.35: Einteilung von Fahrzeugautomatisierungen nach SAE J3016 (SAE, 2016)..... 46

Abbildung 2.36: V-Modell nach VDI 2206 (links) und dessen Weiterentwicklung (rechts) 50

Abbildung 2.37: Das integrierte Produktentstehungsmodell (Albers, Reiß et al., 2016) 51

Abbildung 2.38: IPEK-X-in-the-Loop-Framework (Albers, Behrendt et al., 2016) . 54

Abbildung 2.39: Validierung und Verifikation im Produktentstehungsprozess nach Mandel et al. (Mandel et al., 2020) 55

Abbildung 2.40: Test in physischer Umgebung, Vorgaben durch NHTSA (Forkenbrock & Snyder, 2015) & (Albrecht, Gerdus, Snyder & Sun, 2022) 58

Abbildung 2.41: Optionen beim Aufbau einer HiL-Umgebung (Sievers, Graf, Peperhowe & Seiger, 2018)..... 59

Abbildung 2.42: Testpyramide für Software-Testing nach Wittle (2019) 61

Abbildung 2.43: Testplattformen und Gegenstände zur Verifikation und Validierung von automatisierten Fahrfunktionen (Wood et al., 2019)..... 64

Abbildung 2.44: Aufbau einer HiL-Umgebung für einen Scheinwerfer mit integriertem Steuergerät und Simulationsumgebung sowie Hardware zur Schnittstellenkopplung (Tellmann, 2011)..... 66

Abbildung 2.45: HiL-Aufbau für die Validierung einer kamerabasierten Assistenzfunktion mit rechts dem Umweltbild auf der Leinwand (Baderschneider & Mertke, 2010).....67

Abbildung 2.46: HiL-Aufbau für die Validierung eines Radarsensors von dSpace mit Radarsensor 1 und Radar-Empfänger sowie Sende-Array 2 (dSPACE, 2021) und rechts Einblick in das virtuelle Szenario und Blick auf das Array aus Sicht des Radarsensor (YouTube dSPACE Group, 2021).....68

Abbildung 2.47: Aufbau und in Betrieb befindlicher Prüfstand für ADAS (Gietelink et al., 2006) mit (1) Rollenprüfstand, (2) Target-Fahrzeug und (3) Umweltsimulation.....69

Abbildung 2.48: Radar-Stimulation in einem ViL-Aufbau der AVL mit Radar-Target-Stimulator, ausgeführt als Antennen-Array (1) (Gadringer et al., 2018).....70

Abbildung 2.49: Einfache Kamera-Stimulation in einem ViL-Aufbau (Galko, Rossi & Savatier, 2014).....71

Abbildung 2.50: DiL-Umgebung mit Hexapoden für das Fahrercockpit und 180 Grad Projektionsfläche aufgebaut von AVL (AVL List GmbH, 2019) 72

Abbildung 2.51: DiL-Umgebung mit Hexapoden für das Gesamtfahrzeug und 360° Projektionsfläche des FKFS in Stuttgart (FKFS, 2014) (FKFS, 2012).....73

Abbildung 2.52: Fahrerkabine mit Simulationsprojektion zur Erprobung von neuen Bedienkonzepten für mobile Arbeitsmaschinen (Lehr et al., 2023)74

Abbildung 2.53: Probefahrt auf dem Testgelände mit Versuchs-Target (Seiniger et al., 2012).....76

Abbildung 2.54: Umweltbedingungen mit denen Fahrzeugautomatisierungen umgehen können müssen und entsprechend getestet werden (Thorn et al., 2018).....77

Abbildung 2.55: Testfahrt auf öffentlicher Straße (BMW Group AG, 2014).....78

Abbildung 2.56: Entwicklungsablauf für automatisierte Fahrfunktionen bei NVIDIA (2021).....79

Abbildung 2.57: Anwendung des IPEK-XiL-Frameworks für die Validierung automatisierter Fahrfunktionen, hier für ein kamerabasiertes System in einer gemischt virtuell-physischen Umgebung nach Lutz, Behrendt & Albers (2020).....81

Abbildung 2.58: Schichtenmodell zur Veranschaulichung der Einflüsse und Abhängigkeiten beim Aufbau von Validierungsumgebungen für Fahrzeugautomatisierungen (Lutz, Albers, Hettel & Behrendt, 2017) 83

Abbildung 4.1: Forschungsfahrzeug BMW i3 bei einer Testfahrt auf dem Campus Ost des KIT 94

Abbildung 4.2: Foto von BMW i3 mit vier der zehn Sensoren der Ultraschall-Park-Sensorik (links) und optische Ausgabe der Abstandsinformation (rechts) 95

Abbildung 4.3: Foto von BMW i3 mit Mono-Kamera Sensorik..... 96

Abbildung 4.4: Zusammenhang aus Folgegeschwindigkeit und eingestelltem Folgeabstand bei Verwendung des kamerabasierten ACC-Systems in Stufe 1 des gewünschten Wunschabstands, linearisiert durch die rote Linie 97

Abbildung 4.5: Versuchsfahrzeug BMW i3 auf dem Akustikrollenprüfstand des IPEK am Campus Ost..... 98

Abbildung 4.6: Übersicht auf den Campus Ost des KIT mit der 100 Meter langen Teststrecke und dem Rollenprüfstand des IPEK (Apple Inc., 2022) 100

Abbildung 4.7: Forschungsvorgehen mit Bezug zu den Forschungsfragen..... 101

Abbildung 5.1: Die vollzogenen Schritte zur Entwicklung des Vorgehens zum Aufbau einer Sensorstimulation..... 103

Abbildung 5.2: Zusammengefasste Schritte des Vorgehens zum Aufbau einer Validierungsumgebung für Fahrerassistenzsysteme mit dem zentralen Element der Sensorstimulation..... 105

Abbildung 5.3: Anforderungspyramide für die Validierungsumgebung am Beispiel eines ACC/AEB-Szenarios 107

Abbildung 5.4: Beispiel für eine virtuelle Umweltsimulation und deren visuelle 3D Repräsentation erstellt mit IPG CarMaker..... 108

Abbildung 5.5: Informationsübertragung aus der virtuellen Umweltsimulation per Stimulation zum Sensor..... 110

Abbildung 5.6: Informationsflüsse und iteratives Vorgehen bei der Ausrichtung sowie Kalibrierung des Stimulators..... 114

Abbildung 5.7: Prinzip des Umgebungs-Helligkeitsstimulators, 1 Frontscheibe, 2 Umgebungslichtsensor, 3 in die Entfernung gerichteter Lichtsensor, 4 Leuchtdioden im sichtbaren Licht, 5 IR-Leuchtdiode..... 116

Abbildung 5.8: Aufbau des Regensensor-stimulators, 1 PU-Kunststoff-Gel Pad als Auskoppelkörper, 2 Frontscheibe, 3 IR-Leuchtdioden des Sensors, 4 IR-Photodiode des Sensors, 5 IR-Phot,odioden des Stimulators, 6 IR-Leuchtdioden des Stimulators 117

Abbildung 5.9: Aufbau zur Stimulation eines Beschleunigungssensors 118

Abbildung 5.10: Mikrocontroller zur Übersetzung zwischen CAN und Ethernet .. 123

Abbildung 5.11:Entwickelte Vorrichtung zur Übersetzung zwischen CAN und Ethernet, 1 CAN-Anschluss, 2 USB-Anschluss, 3 Stromversorgung, 4 Ethernet-Anschluss..... 124

Abbildung 5.12: Eindrücke vom gefahrenen Manöver. Anfahrt zur freien Parklücke (1); Einfahrt in den Parkplatz (2a & 2b) und Erreichen der finalen Parkposition vor einer den Parkplatz begrenzenden Mauer (3)... 126

Abbildung 5.13: Ultraschall-Receiver-Emitter-Platine (HC-SR04) von vorne (links) und hinten (rechts) (Lutz, 2016) 129

Abbildung 5.14: Ultraschallstimulator mit Schallabsorbern im Aufbau (1 & 2) und am Fahrzeug (3 & 4) (Lutz, 2016) 130

Abbildung 5.15: Wechselwirkungen bei der Ausrichtung und Kalibrierung der Ultraschallstimulation..... 131

Abbildung 5.16: Zeitlicher Ablauf der Aktivitäten zwischen Sensor und Stimulator aus (Lutz, 2016)..... 132

Abbildung 5.17: Kombination der Ultraschallstimulation am Frontstoßfänger mit dem Rollenprüfstand am Versuchsfahrzeug BMW i3..... 134

Abbildung 5.18: Geschwindigkeitsprofil des Target-Fahrzeugs für das Manöver einer ersten Kamerastimulation des ACC-Systems 137

Abbildung 5.19: Prinzipieller Aufbau einer leinwandbasierten Kamerastimulation auf einem Rollenprüfstand..... 140

Abbildung 5.20: Prinzip des kompakten Kamerastimulators 141

Abbildung 5.21: Rollenprüfstand mit Leinwand vor dem Versuchsfahrzeug zur Stimulation der Mono-Kamera..... 142

Abbildung 5.22: Geschwindigkeitsprofil von Ego- und Target-Fahrzeug bei der Stimulation per Leinwand 143

Abbildung 5.23: Teilzusammenbau und fertiger, kompakter Kamerastimulator... 144

Abbildung 5.24: Stimulation der Fahrzeugkamera mittels kompakten Kamerastimulator auf dem Rollenprüfstand 145

Abbildung 5.25: Parameter der Kamerastimulation als Ausrichtung und Kalibrierung..... 146

Abbildung 5.26: Wechselwirkungen bei der Ausrichtung und Kalibrierung der Kamerastimulation 147

Abbildung 5.27: Beispiel für die Kalibrierung des virtuellen Kameramodells für das virtuelle Field of View (vFoV) in der Simulation mit Abstandsmessungen bei einer stationären Folgefahrt mit 30 km/h 148

Abbildung 5.28: Folgeabstand über verschiedene Folgegeschwindigkeiten nach erfolgreicher Kalibrierung des virtuellen FoV (bei 25° vFoV) 149

Abbildung 6.1: Anwendungen des entwickelten Vorgehens auf die kamerabasierte ACC-Funktion..... 155

Abbildung 6.2: Idealisierter Geschwindigkeitsverlauf des Egofahrzeugs sowie Manöverübersicht mit Einteilung in die drei Manöver-Phasen: „Beschleunigung“, „Konstantfahrt“ und „Abbremsung“..... 158

Abbildung 6.3: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf des Egofahrzeugs über den Restabstand mit Einteilung in die drei Manöver-Phasen: „Beschleunigung“, „Konstantfahrt“ und „Abbremsung“..... 160

Abbildung 6.4: Versuchsübersicht zur Wahl des ACC-Wunschabstands..... 161

Abbildung 6.5: Übersicht auf die Teststrecke des Campus Ost mit Markierung der Fahrzeugpositionen und Entfernung zwischen den Fahrzeugen sowie Sicht auf die Teststrecke aus der Ausgangsposition (rechts oben) und Blick auf die Endposition (rechts unten)..... 163

Abbildung 6.6: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für das Testgelände mit physischem Fahrzeug als Target..... 164

Abbildung 6.7: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für das Testgelände mit virtuell generiertem Fahrzeug als Target..... 165

Abbildung 6.8: Stimulator an Versuchsfahrzeug auf Testgelände ohne und mit den Abdeckungen des Stimulators 166

Abbildung 6.9: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für den Rollenprüfstand mit virtueller Umweltsimulation und virtuell generiertem Fahrzeug als Target 167

Abbildung 6.10: Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand mit montierter Kamerastimulation (ohne und mit Abdeckung)..... 168

Abbildung 6.11: Kamerastimulation bei Ausrichtung auf dem Rollenprüfstand ohne Abdeckung 169

Abbildung 6.12: Vermessung der Sensitivität für die Kameraausrichtung hinsichtlich der virtuellen Verschiebung in X-Richtung (Fahrzeuglängsrichtung) mit sechs verschiedenfarbig dargestellten Versuchswiederholungen..... 171

Abbildung 6.13: Kalibrierung des Kamerastimulators als Anbringung der virtuellen Kamera auf dem Fahrzeugmodell 172

Abbildung 6.14: Prinzipieller Aufbau der Informationsübertragung zwischen Versuchsfahrzeug und virtueller Umweltsimulation..... 173

Abbildung 6.15: Testgelände am Campus Ost mit aufgebauter drahtloser Übertragungstechnik..... 174

Abbildung 6.16: Referenzmessungen in der physischen Umwelt für die vier ACC-Stufen zur Wahl des Wunschabstands..... 175

Abbildung 6.17: Messungen an den vier ACC-Stufen zur Wahl des Wunschabstands auf dem Testgelände mit Kamerastimulation und Online-Berechnung der Umweltsimulation 178

Abbildung 6.18: Messungen an den vier ACC-Stufen zum Wunschabstand auf dem Rollenprüfstand mit Kamerastimulation und Online-Berechnung der Umweltsimulation..... 180

Abbildung 6.19: Vergleich der drei Validierungsumgebungen anhand des Erkennungs- und Endabstands 181

Abbildung 6.20: Abstufungen des Bilderkatalogs 183

Abbildung 6.21: Messungen an den vier ACC-Stufen zum Wunschabstand auf dem Testgelände mit Kamerastimulation und Verwendung des Bilderkatalogs als Offline-Generierung der grafischen Ausgabe . 184

Abbildung 6.22: Messungen an den vier ACC-Stufen zum Wunschabstand auf dem Rollenprüfstand mit Kamerastimulation und Verwendung des Bilderkatalogs als Offline-Generierung der grafischen Ausgabe . 185

Abbildung 6.23: Eindrücke von den Lichtverhältnissen zum Start um 19:52 Uhr (links) und dem Ende der Versuchsreihe um 21:46 Uhr 189

Abbildung 6.24: Messungen auf dem Testgelände mit physischem Target über die Abenddämmerung zwischen ab 19:52 Uhr bis 21:46 Uhr..... 190

Abbildung 6.25: Darstellung der Stimulatoreindrücke zu Beginn und am Ende der Messreihe 191

Abbildung 6.26: Messungen auf dem Rollenprüfstand mit stimulierter Dämmerung durch Anpassung der Stimulatorhelligkeit 192

Abbildung 6.27: Vergleich der Messwerte zur Dämmerungsfahrt zwischen Testgelände mit physischem Target-Fahrzeug (links) und stimuliertem Prüfstandsaufbau (rechts)..... 194

Abbildung 6.28: Integration der Trajektorienplanung in den Informationsfluss des Fahrzeugs und die Umfeldsensorik 196

Abbildung 6.29: Manöver zur Validierung der Trajektorienplanung als Geschwindigkeitsprofil des Target-Fahrzeugs 198

Abbildung 6.30: Konfiguration des IPEK-XiL-Aufbaus für die Ausrichtung und Kalibrierung der Kamerastimulation 199

Abbildung 6.31: Entwurf des HiL-Aufbaus zur Kalibrierung und Ausrichtung des IPEK-XiL-Aufbaus zur Kamerastimulation 200

Abbildung 6.32: HiL-Aufbau zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Stimulator und Fahrzeugkamera 201

Abbildung 6.33: IPEK-XiL-Aufbau zur Validierung der Trajektorienplanung am Gesamtfahrzeug 202

Abbildung 6.34: Konzept der Validierungsumgebung im Wechselspiel mit dem Versuchsfahrzeug 204

Abbildung 6.35: Übersicht des Gesamt-Aufbaus für die Trajektorienplanung am Gesamtfahrzeug auf dem Rollenprüfstand 205

Abbildung 6.36: Messergebnis einer weiter verwendeten Parametrisierung (Ausrichtung und Kalibrierung) der Kamerastimulation 206

Abbildung 6.37: Abstandsschätzung bei unterschiedlich eingestellter Positionierung in X-Richtung zwischen Kamera und Stimulator . 207

Abbildung 6.38: Abstandsschätzung bei unterschiedlich eingestelltem virtuellem Field of View 208

Abbildung 6.39: Fünf Messwiederholungen des Abstands zwischen Ego- und Target-Fahrzeug bei konstanter Ego-Geschwindigkeit 209

Abbildung 6.40: Schätzungen der Target-Geschwindigkeit basierend auf den Abstandsinformationen der Kamera 210

Abbildung 6.41: Messwertübersicht mit Einblick in Batterie-Lade-Strategie bei der wiederholten Manöverdurchführung 211

1 Einleitung

Das Führen moderner Fahrzeuge ist heutzutage nicht mehr vergleichbar mit dem von vor 30 Jahren. Dabei hat sich vor allem die Aufgabenverteilung zwischen Fahrenden und Fahrzeug hinsichtlich der Längs- und Querführung maßgeblich gewandelt. Viele der unkomfortablen Aufgaben werden zunehmend von Fahrerassistenzsystemen stark erleichtert und das Fahren sicherer (K. Bengler, K. Dietmayer, B. Färber, M. Maurer, C. Stiller, H. Winner, 2014). Beispielsweise das Spurhalten und die Abstandsregelung im alltäglichen Verkehrsfluss oder bei der Fahrt im Stau wird durch Assistenzfunktionen stark vereinfacht. Damit liegt beim menschlichen Fahrer immer stärker eine kontrollierende Aufgabe. Automatisierte Pilot-Funktionen hingegen zeigen für spezialisierte Fahrsituationen, dass die Fahraufgabe im Stau oder beim Parkieren dem Fahrenden ganz abgenommen werden kann (Mercedes-Benz Group AG, 2024). Das Potential von Fahrerassistenzfunktionen lässt sich auch an Unfallstatistiken ablesen. Demnach ließen sich beispielsweise rund 30 % aller Unfälle mit Personenschaden auf deutschen Autobahnen verhindern, wenn 50 % der Fahrzeuge mit einer Automatisierung zur Autobahnfahrt ausgestattet wären (Rösener et al., 2019). Diese Funktionsvielfalt muss selbstverständlich vor der Marktreife entsprechend entwickelt und in Bezug auf Funktionserfüllung sowie Kundenempfinden getestet werden. Durch Bestrebungen der Gesetzgebenden wird diese Entwicklung weiter beschleunigt, wonach beispielsweise seit Juli 2022 in der EU-Neufahrzeuge Notbrems-Systeme vorweisen müssen (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2019).

1.1. Motivation

Die Automobilindustrie befindet sich heutzutage mehr denn je im Wandel. Dabei stehen die Hersteller vor Herausforderungen wie der Elektrifizierung des Antriebs und einer immer stärkeren Vernetzung des Fahrzeugs mit dessen Nutzern und der Umwelt. Überdies schreiten die Digitalisierung und Automatisierung der Fahrzeugführung immer weiter voran. Durch diese Trends wird allerdings die Entwicklung vor neue Herausforderungen gestellt und muss sich mit neuen Technologien und deren Entwicklungsdomänen befassen. Ein Großteil dieser Neuerungen wird durch Softwarefunktionen realisiert. (Braess & Seiffert, 2013) Diese bringen durch ihre Kombinationsmöglichkeiten steigende Komplexität mit

sich. Gleichzeitig sind kürzere Entwicklungszyklen und eine höhere Anzahl an virtuellen Prototypen (Schmidt & Frings, 2018) zu bewältigen. Auf diese Weise müssen also nicht nur neue Innovationen zur Marktreife gebracht, sondern gleichzeitig auch neue Wege zum Erreichen dieser Innovationskraft begangen werden. Als zentrale Aktivität des Produktentstehungsprozesses (Albers, 2010) wandelt sich demnach die Validierung von Fahrzeugfunktionen, um den größer werdenden Anteil digitaler Systembestandteilen zu berücksichtigen. Dies setzt voraus, dass neben einer stärkeren Validierung in vollständig virtuellen Umgebungen auch die Abstufungen von gemischt virtuell-physischen Umgebungen feiner sowie schneller eingesetzt werden.

Der starke Fokus auf rein virtuelles Testen stößt an Grenzen der Modellierungsdetails und Echtzeitfähigkeit, wenn die physische Umgebung immer realistischer abgebildet werden soll. Diese Umgebungen bringen in aller Regel synthetische und damit sehr „saubere“ Untersuchungsbedingungen mit sich (Sovani, 2017). Hierdurch werden Umwelteinflüsse, die Streuung im Systemverhalten verursachen, nicht immer vergleichbar zur realen Umgebung abgebildet. Andererseits kommen physisch aufgebaute Validierungsumgebungen, zum Beispiel Testgelände zum Einsatz, welche eine Vielzahl von schwer kontrollierbaren Umwelteinflüssen mitbringen und somit die Reproduzierbarkeit eingeschränkt ist (IIHS - Insurance Institute for Highway Safety, 2018). Dabei bedingt der Wechsel von der rein virtuellen in die physische Umgebung große Veränderungen bei den Umwelteinflüssen. Hierdurch entsteht ein hohes Entwicklungsrisiko, welches hohe Kosten verursachen kann. So wird bei einem Fehlverhalten auf dem Testgelände in aller Regel wieder die Ursachenuntersuchung mit einer virtuellen Simulation durchgeführt. Dies bringt die Problematik mit sich, dass das beobachtete Verhalten akkurat in der virtuellen Umwelt nachgebildet werden muss. Zusätzlich besteht die Unsicherheit, dass trotz der Simulationen das ungewünschte Verhalten beim Test in der realen Umgebung wieder auftritt, da die Unterschiede im Verhalten genau beim Wechsel der Testumgebung verursacht werden. Zusätzlich zum Wechsel zwischen den unterschiedlichen Umgebungen, sollen zukünftige Systeme zur Fahrzeugautomatisierung auch immer weniger menschlichen Input benötigen. Hierdurch nimmt der Absicherungsbedarf erheblich zu. Dies zeigt, dass zukünftig ein noch stärkerer Einsatz von virtuellen Entwicklungsumgebungen notwendig wird. Vor allem wenn die Fahrzeuge vollkommen ohne menschliche Fahrer die Fahraufgabe übernehmen sollen.

Das Kapitel „Stand der Forschung und Technik“ dieser Arbeit zeigt, dass Fahrerassistenzsysteme schon seit mehreren Jahrzehnten entwickelt werden (Lalli, 2020). Neben Systemen zur Steigerung der Sicherheit sind auch immer mehr Assistenten zum Komfortgewinn aus aktuellen Fahrzeugen nicht mehr

wegzudenken (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2019). Damit müssen die Entwickelnden auch für günstigere Fahrzeugmodelle preiswerte Lösungen finden und bei deren Erarbeitung möglichst wenig Kosten verursachen.

All diesen Systemen gemein sind Sensoren, welche die Fahrzeugumgebung erfassen und den Abstand zu umgebenden Objekten sowie deren Größe messen. Diese Informationen werden für die darauffolgende Regelung verwendet. Bei Tests in der Entwicklung müssen diese Eindrücke für die zu untersuchenden Szenarien von der Validierungsumgebung zur Verfügung gestellt werden. Hierdurch lassen sich dann die Funktionsweise im Grenzbereich oder die Erreichung von Zielwerten überprüfen. Vor diesem Hintergrund kann die Entwicklungsarbeit am Gesamtfahrzeug nicht wie bisher mit bis zu 2 Millionen Testkilometern (Maurer, Gerdes, Lenz & Winner, 2015) auf Testgeländen oder dem öffentlichen Straßenverkehr erfolgen. Schon jetzt ist absehbar, dass der Aufwand bei zunehmend komplexen Fahrfunktionen den leistbaren Umfang sowohl zeitlich als auch finanziell übersteigt. Zusätzlich stellen Umwelteinflüsse wie Regen, Nebel oder Eis größere Herausforderungen dar, da sich diese schwieriger beim Testen reproduzieren lassen (Stanley, 2021). Zukünftige Systeme müssten jedoch auch unter solchen Bedingungen erprobt werden, da sie auch dann noch ihre Funktion uneingeschränkt erfüllen sollen. Damit erzwingt die Vielfältigkeit der Nutzungsszenarien und Anwendungsmöglichkeiten in Kundenhand eine bisher nicht dagewesene Vielfältigkeit der zu berücksichtigenden Validierungsszenarien.

Zusätzlich müssen die Systeme vor der Markteinführung von Institutionen wie dem TÜV freigegeben und für die Verwendung im öffentlichen Straßenverkehr zertifiziert werden. Auch hierbei muss das Gesamtsystem Fahrzeug möglichst reproduzierbar hinsichtlich eines korrekten Verhaltens im automatisierten Betrieb untersucht werden können.

All diese Entwicklungen machen neue, enger verzahnte Entwicklungsumgebungen notwendig, bei denen beginnend mit der Entwicklung in rein virtuellen Umgebungen bis hin zur Sensorstimulation am Gesamtfahrzeug kontinuierlich einzelne (Teil-) Systeme ausgetauscht werden und so Entwicklungsrisiken überschaubar bleiben. Zusätzlich steigert die Weiterverwendung von Teilsystemen die Effizienz im Entwicklungsprozess.

1.2. Fokus der Arbeit

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt darin, die Lücken zwischen den etablierten Entwicklungsumgebungen für Fahrerassistenzsystemen zu verringern. Hierzu wird

eine vielseitigere Kombination aus virtuellen und physischen Umwelteindrücken eingesetzt. Die Sensorstimulation verbindet die virtuelle Umwelt mit den physischen Teilsystemen des Fahrzeugs. Hierbei hilft ein feingliedrigerer Wechsel und der Austausch nur einzelner Bestandteile der Validierungsumgebung. Somit bleiben den Entwickelnden die Vorteile der virtuellen Umgebungen teilweise erhalten (hohe Reproduzierbarkeit und gezieltes Einstellen von Umweltparametern). Hinzu kommt die Repräsentanz und Validität physischer Entwicklungsumgebungen, welche in kleinen Schritten kombiniert werden können. Aufgrund von realen Umweltbedingungen erzeugen diese Umgebungen Streuungen im Systemverhalten, was dem Verhalten in Kundenhand entspricht. Aufwändige Tests, zum Beispiel mit mehreren beteiligten Verkehrsteilnehmern, lassen sich so deutlich schneller, als auf der Straße, wiederholen und damit ein breiteres Testspektrum realisieren.

Die Kombination von realen und virtuellen Fahreindrücken wird anhand von zwei Beispielen exemplarisch aufgebaut. Als erstes wird eine Lösung zur Stimulation der Einpark-Sensorik entwickelt, sodass beispielsweise Parkassistenten am Gesamtfahrzeug reproduzierbar Testszenarien durchlaufen können. Anhand dieses technologisch einfachen Beispiels kann der Fokus auf den grundlegenden Ablauf einer Stimulation gelegt werden und es können Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie die Integration in eine umfassendere Validierungsumgebung, hier den Rollenprüfstand, erfolgen kann. Außerdem werden ungewollte Einflüsse untersucht, welche durch Gegenmaßnahmen mittels Abschirmungen unterbunden werden können. Als zweites Beispiel wird die Stimulation einer Monokamerabasierten Fahrerassistenz untersucht. Hierbei steht die Reproduzierbarkeit der damit durchgeführten Untersuchungen im Fokus. Durch die Verwendung eines kompakten Stimulations-Aufbaus lassen sich Szenarien sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch auf dem Testgelände durchführen. Die Ergebnisse geben Aufschluss wie vergleichbar die Resultate dieser Umgebungen sind und welche Besonderheiten es zu beachten gilt.

Eine nach dieser Idee aufgebaute Validierungsumgebung kann auch von OEMs (Original Equipment Manufacturer) unter anderem dazu genutzt werden, möglichst früh in der Produktentwicklung Zielwerte für zukünftige Automatisierungsfunktionen abzuleiten. Auf diesem Weg kann beispielsweise in Kombination mit dem Rollenprüfstand einfacher eine Prognose hinsichtlich der Energieeffizienz oder der Fahrbarkeit des automatisiert gesteuerten Fahrzeugs erstellt werden. Damit lassen sich später im Entwicklungsprozess teurere Umplanungen und komplexe Tests vermeiden.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in 7 Kapitel gegliedert, welche in Abbildung 1.1 dargestellt sind und im Folgenden kurz vorgestellt werden.

1	Einleitung mit Motivation, Fokus und Aufbau der Arbeit
2	Stand der Forschung und Technik
3	Bedarf und Zielsetzung
4	Forschungsumgebung und -vorgehen
5	Entwicklung eines Vorgehens zum Aufbau einer Sensorstimulation
6	Anwendung und Weiterentwicklung der sensorstimulierten Validierung von Fahrerassistenzsystemen
7	Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

Einleitend wird auf die Motivation, den Fokus und den Aufbau der Arbeit eingegangen. Der Stand der Forschung und Technik wird in Kapitel 2 erläutert. Hierbei werden die Grundlagen von Fahrzeugführungen und deren Automatisierung diskutiert sowie Vorgehen zur methodischen Verifikation und Validierung vorgestellt. Im Anschluss wird aufgezeigt, wie heutzutage Fahrerassistenzsysteme entwickelt und validiert werden. Hieraus lassen sich Potentiale und Forschungslücken ermitteln. In Kapitel 3 wird der Forschungsgegenstand näher vorgestellt, wobei der Forschungsbedarf und die Zielsetzung der Arbeit im Fokus stehen. Anhand der Forschungshypothese und der Forschungsfragen wird die Zielerreichung festgehalten. Die Randbedingungen unter denen diese Forschungsarbeit entstanden ist und das davon abhängige Forschungsvorgehen wird in Kapitel 4 näher erläutert. Die Forschung ist dabei stark iterativ, wodurch in Kapitel 5 ein erster Entwurf eines Vorgehens zur sensorstimulierten Validierung von Fahrerassistenzsystemen vorgestellt und in Kapitel 6 dieses an drei Beispielen auf kamerabasierte Fahrerassistenzsysteme angewendet wird. Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt anschließend einen Ausblick auf weiterführende Forschungsfelder.

2 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird auf den aktuellen Stand der Forschung und Technik von Fahrzeugautomatisierungen eingegangen. In Kapitel 2.1 wird die Fahrzeugführung sowie deren Automatisierung vorgestellt, sodass ein Überblick für diese Systeme entsteht. In Kapitel 2.2 wird auf die Bedeutung der Validierung als zentrale Aktivität der Produktentwicklung (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016) eingegangen. Diese Grundlagen werden in Kapitel 2.3 aufgegriffen und hinsichtlich der Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen vertieft. Darauf aufbauend wird ein Verständnis für heutige Validierungsumgebungen von Fahrerassistenzsystemen sowie deren Entwicklung geschaffen.

2.1. Fahrzeugführung und deren Automatisierung

Seit den frühen Anfängen der Automobilentwicklung Ende des 19. Jahrhunderts zählt die Lenkung und Führung des Fahrzeugs zu den Aufgaben eines menschlichen Fahrers. Damals steuerte man beispielsweise den Benz Patent-Motorwagen (Maurer et al., 2015) mit Hilfe einer Kurbel um die Kurve und regelte den Motor über Hebel. Schon bei der Pferdekutsche, dem konzeptionellen Vorgänger des Kraftfahrzeugs, war der Menschen als Steuerer und Lenker in der Verantwortung. Auch wenn sich die Betätigung der Lenkung und Motorsteuerung, durch das Lenkrad und die Pedalerie, über die Jahre gewandelt hat, steuert man das Fahrzeug noch immer nach dem Grundprinzip, dass ein Mensch als Regler die Umwelt wahrnimmt und daraufhin entsprechend Steuerbefehle an das Fahrzeug gibt. Durch die Entwicklung des Tempomaten, oder Cruise-Control, ändert sich dieses Prinzip, sodass die Fahrenden zwar immer noch die Verantwortung tragen, sie jedoch für ausgewählte Funktionen nicht mehr permanent Steuerbefehle an das Fahrzeug geben müssen (ISO 22179). Schlussendlich führt dieser Trend über moderne Fahrerassistenzsysteme hin zu pilotierten Systemen, welche die Längs- und Querführung über längere Zeitspannen, zum Beispiel bei der Autobahnfahrt, dem Fahrenden ganz abnehmen können.

Das folgende Kapitel geht der Frage nach „*Wie erfolgt die Automatisierung der Fahrzeugführung in modernen PKW?*“. Dabei werden beginnend mit den Grundlagen der Fahrzeugführung die Aufgaben und Funktionen vorgestellt, welche vom menschlichen Fahrer zu diesem Zweck übernommen werden müssen. Diese

werden daraufhin abstrahiert und in einem Ablauf für automatisierte Fahrfunktionen zusammengesetzt. Im Anschluss erfolgt eine Vorstellung der dazu verfügbaren Sensoren sowie deren Funktionsprinzip und Vernetzung, um damit ein tieferes Verständnis für aktuell übliche Fahrerassistenzfunktionen zu ermöglichen. Da diese Arbeit den Schwerpunkt auf kamerabasierte Assistenzfunktionen legt, werden dafür verwendete Kamerasysteme tiefergehend vorgestellt. Zur automatischen Verarbeitung kamerabasierter Daten werden Bildauswertesysteme benötigt, welche die aufgenommenen Eindrücke zu Informationen über umgebende Objekte aufarbeiten. Abschließend erfolgt eine Vorstellung der unterschiedlichen Architekturen zur Vernetzung, womit auch ein Ausblick auf zukünftige Automatisierungsformen gegeben wird.

2.1.1. Grundlegende Modelle der Fahrzeugführung

Die Führung eines Fahrzeugs lässt sich im ersten Schritt in die Navigation sowie Kontrolle der Längs- und Querführung unterteilen (Braess & Seiffert, 2013). Diese zunächst einfach anmutenden Aufgaben müssen aber unter Berücksichtigung der Umwelt mit deren Gesetzen und Regeln umgesetzt werden. Bis heute ist dazu immer noch ein menschlicher Fahrer in der Verantwortung und kontrolliert Assistenten und Automatiken des Fahrzeugs. Um ein besseres Verständnis für diese Aufgabe zu bekommen, wird nun die Umsetzung durch den menschlichen Fahrer anhand gängiger Modelle der Fahrzeugführung genauer vorgestellt (Donges, 1982) (Rasmussen, 1983). Basierend darauf wird im darauffolgenden Schritt diese Abstrakt beschrieben und auf die Automatisierung der Fahraufgabe angewendet.

Das Zusammenspiel aus Fahrerenden, Fahrzeug und Umwelt wurde 1982 durch Emil Donges in einem Drei-Ebenen-Modell, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, beschrieben. So wird die Transportaufgabe durch den „Fahrer“ mittels der „Navigation“, „Führung“ und „Stabilisierung“ wahrgenommen. Auf der anderen Seite steht die „Umwelt“, in welcher der „Fahrer“ und das „Fahrzeug“ agieren. Diese setzt sich aus dem „Straßennetz“, dem „Fahrraum“ und der „Fahrbahn-Oberfläche“ zusammen. Das „Fahrzeug“ stellt das verbindende Glied der beiden bisher genannten Systeme dar und führt die Längs- sowie Querdynamik vom „Fahrer“ kommend in der „Umwelt“ aus. Der Regelkreis wird durch die Rückkopplung aus der „Umwelt“ an den „Fahrer“ geschlossen. So verarbeitet dieser Einflüsse aus der „Umwelt“, wie den „Straßenverlauf“ oder die „Straßenbeschaffenheit“, in seiner „Navigations- oder Bahnführungseben“.

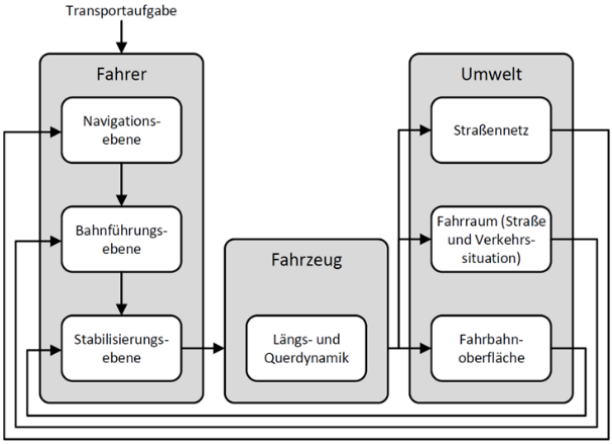


Abbildung 2.1: Drei Ebenen-Modell der Fahrzeugführungsaufgabe (Donges, 1982)

Das 1983 von Rasmussen entwickelte Verhaltensmodell, siehe Abbildung 2.2, teilt die vom „Fahrer“ ausgeübten Handlungen in drei „Verhalten“ ein. Das „Wissensbasierte Verhalten“ stellt für den „Fahrer“ zunächst die Grundlage dar, aus der mit Zeit und Erfahrung „Regelbasiertes“, bis hin zu „Fertigkeitsbasiertes Verhalten“ wird. Auf diese Art und Weise kann beispielsweise aus einem anfänglich „Wissensbasierten Verhalten“ zum Wechseln des Fahrgangs oder des exakten Spurhaltens mit der Zeit eine Routine werden, über die während der Fahrzeugführung nicht mehr nachgedacht werden muss und so „Fertigkeitsbasiert“ gehandelt wird.

Werden die Modelle von Donges und Rasmussen, wie in Abbildung 2.3, miteinander kombiniert, können die unterschiedlichen Verhaltensformen den vielfältigen Aufgaben des „Fahrers“ bei der Fahrzeugführung zugeordnet sowie Vorzüge bei der Abarbeitung nachvollzogen werden. Dabei wird zum Beispiel die „Navigation“ größtenteils durch wissensbasiertes Verhalten wahrgenommen. Die „Fahrzeugführung“ wiederum setzt sich je nach Erfahrungsstand und fahrerischem Können aus allen drei Verhalten zusammen. Die „Stabilisierung“, beispielsweise bei einer Fahrt auf regennasser Fahrbahn oder bei Schnee, muss aufgrund der sehr kurzen Reaktionszeiten immer durch fertigkeitsbasiertes Verhalten geleistet werden, sodass dies für Fahranfänger erfahrungsgemäß eine größere Herausforderung darstellt (Radlmayr & Bengler, 2015).

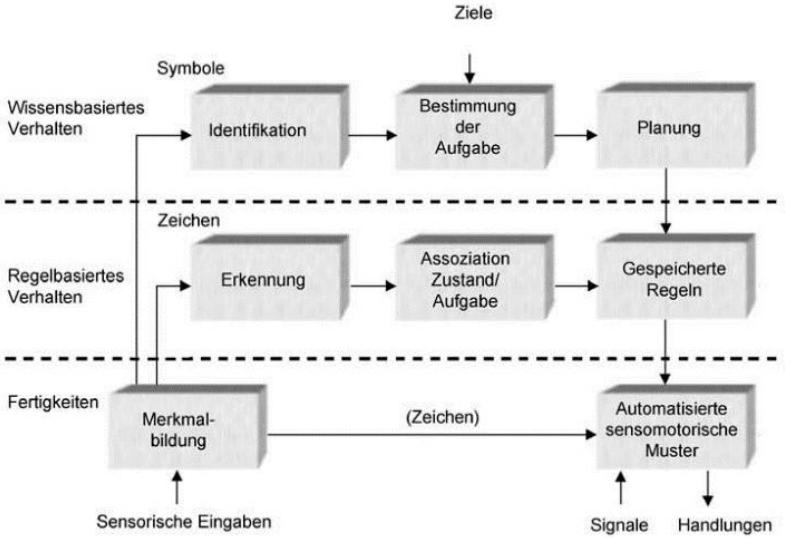


Abbildung 2.2: Verhaltenstaxonomie (Rasmussen, 1983)

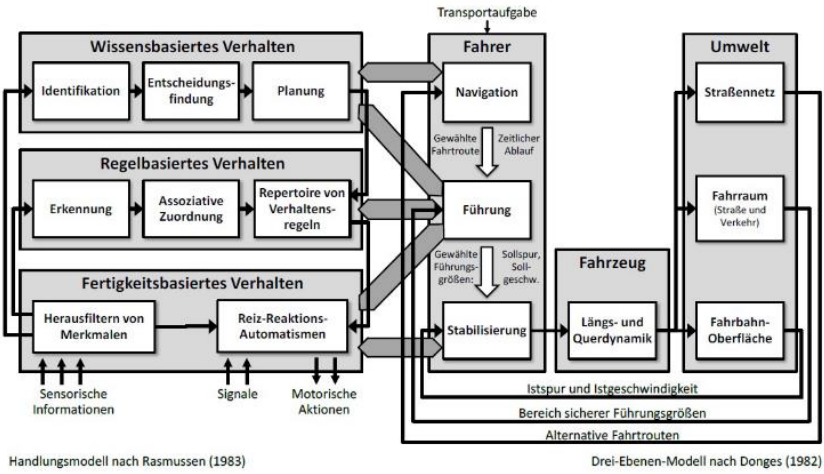


Abbildung 2.3: Handlungsmodell nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe (Radlmayr & Bengler, 2015)

Da mit steigender Fahrzeugautomatisierung die Aufgaben vom Fahrenden auf das Fahrzeug übertragen werden sollen, ist es hilfreich, ein umfassenderes Verständnis für die Aufgaben und Vorgehensweisen des menschlichen Fahrers zu gewinnen. Dazu zeigt Abbildung 2.4 (Abendroth, 2001) eine genauere Analyse der Abläufe und Abhängigkeiten im Wahrnehmen der Fahraufgabe.

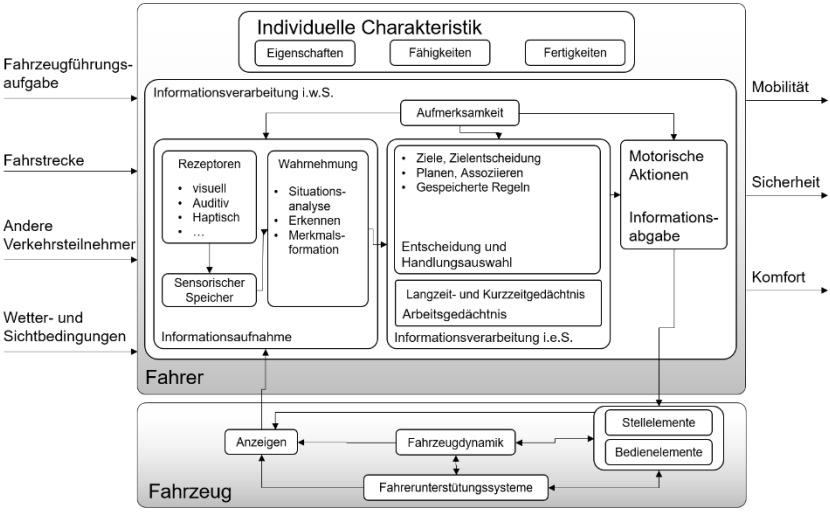


Abbildung 2.4: System-Modelle für „Fahrer“ und „Fahrzeug“ zur Beschreibung der Fahraufgabe (Abendroth, 2001)

Allgemein kann dabei die Fahraufgabe durch die folgenden drei zentralen Teile beschrieben werden:

- Informationsaufnahme
  Rezeptoren (beispielsweise visuelle, auditive oder haptische) erfassen die Fahrzeugumwelt und überführen durch einen sensorischen Speicher ihre Informationen in die Wahrnehmung, welche die Eindrücke mittels einer Merkmalsfunktion analysiert und entsprechend erkennt.

- Informationsverarbeitung
  Die erkannten und analysierten Eindrücke werden in der Informationsverarbeitung mit Zielen abgeglichen und mit bekannten Eindrücken assoziiert. Darauf basierend erfolgt die Planung und Einarbeitung gespeicherter Regeln, sodass sensumotorische Muster an die Informationsabgabe übergeben werden.

- Informationsabgabe
  Die Handlungen aus der Informationsverarbeitung werden über das Hand-Arm-System, bzw. das Fuß-Bein-System als motorische Aktionen auf die Schnittstellen im Fahrzeug, Human Machine Interface kurz HMI, übertragen.

Wird der Fokus weiter auf die Wechselwirkungen zwischen menschlichem Fahrer und der Umwelt sowie den Schritten zur Erfüllung der Fahraufgabe gelegt, zeigt das Modell menschlicher Informationsverarbeitung nach Wickens & Carswell (Abbildung 2.5) einen allgemeingültigen Ansatz auf, der sich aus vier Kernschritten zusammensetzt.

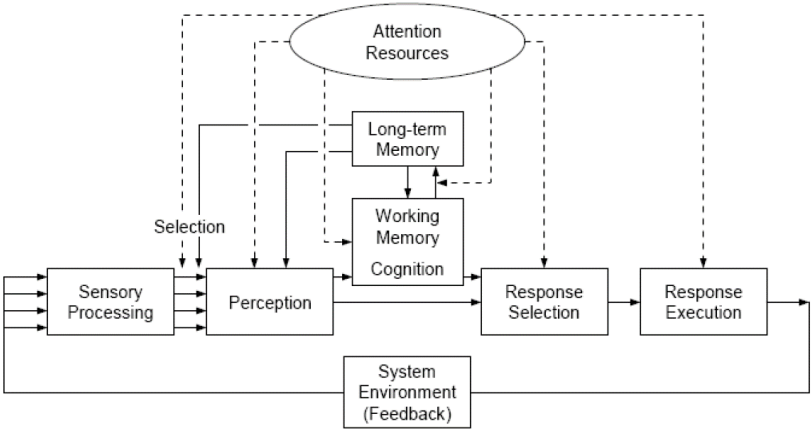


Abbildung 2.5: Modell menschlicher Informationsverarbeitung (Wickens & Carswell, 2006)

Bei dem Vorgehen nach Wickens & Carswell wird im ersten Schritt die Umwelt durch das „Sensory Processing“ erfasst. Die Informationen werden dann durch die „Attention Resources“ in Kombination mit dem „Long-term Memory“ zu einer „Perception“, als Wahrnehmung und damit Modellbildung, zusammengesetzt. Diese wird einerseits in einen Arbeitsspeicher, dem „Working Memory / Cognition“, abgelegt und für die „Response Selection“, als Auswahl eines geeigneten Verhaltens verwendet. Auch für diesen Schritt ist die Aufmerksamkeit als „Attention Resources“ von nöten, welche dann den letzten Schritt, die „Response Execution“ initiiert. Die umgesetzte Handlung wirkt auf das „System Environment“, sodass ab

hier der Regelkreis geschlossen wird und wiederum die sich ändernde Umwelt durch Sinne erfasst wird (Salvendy & Karwowski, 2021).

2.1.2. Aufbau und Ablauf von automatisierten Fahrfunktionen

Im vorangegangen Kapitel wurden Ansätze vorgestellt, die den Menschen und dessen Vorgehen zur Fahrzeugführung durch Informations-Aufnahme sowie - Verarbeitung genauer analysieren. Ausgehend von diesem Verständnis wird im Folgenden das Vorgehen zum Aufbau und Ablauf einer Automatisierung der Fahraufgabe aufgezeigt. Eine nahtlose Anknüpfung an die menschlichen Abläufe stellt das „Robotic paradigm" dar, welches als sequentielle Robotersteuerung in eine Abfolge von „Sensor", „Planung" und „Aktor" darstellt (Haun, 2013).

Das allgemeine Vorgehensmodell wird für automatisierte Systeme weiter detailliert, sodass die geschlossene Prozesskette detaillierter die Umweltaufnahme mit „Reizaufnahme" und „Transformation" beschreibt. Planung setzt sich dann aus „(Vor)Verarbeitung", Wahrnehmung" und „(Wieder)Erkennung" zusammen. Zuletzt wird mit „Handlung" eine Tätigkeit als Reaktion auf die Umwelt ausgeführt. Abbildung 2.6 stellt die detailliertere Prozesskette dar.

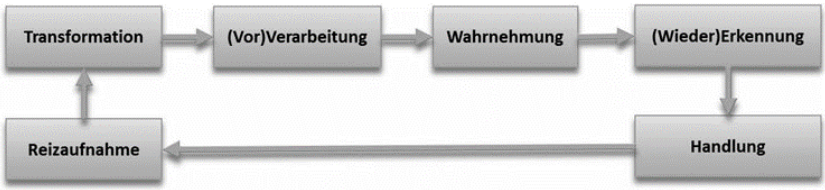


Abbildung 2.6: Geschlossene Prozesskette des kognitiven Systems (Haun, 2013)

Eine solche Erweiterung teilt den Punkt „Sensor" in eine Reizaufnahme und Transformation auf, sodass die reine Umweltabtastung von der Informationswandlung zur weiteren Verarbeitung unterschieden wird. Auch die Planung wird feiner untergliedert. Hier wird die (Vor-)Verarbeitung, Wahrnehmung und (Wieder-)Erkennung als Schritt zur Vorbereitung der Handlung gesehen. Diese schließt den Kreislauf äquivalent zum „Aktor" ab.

Die so allgemein für Roboter aufgestellte Ablaufkette lässt sich auf Fahrzeugautomatisierungen unter Einbindungen der Umwelt übertragen, wie in der Norm DOT HS 812 623 (Thorn, Kimmel & Chaka, 2018) veröffentlicht (Abbildung 2.7). Noch weiter detailliert wird dies im „SAE International Autonomous Mode Functional Architecture Flow Diagram" der noch im Entwurf befindlichen Norm

J3131 (Thorn et al., 2018) beschrieben, siehe dazu entsprechende Darstellung im Anhang.

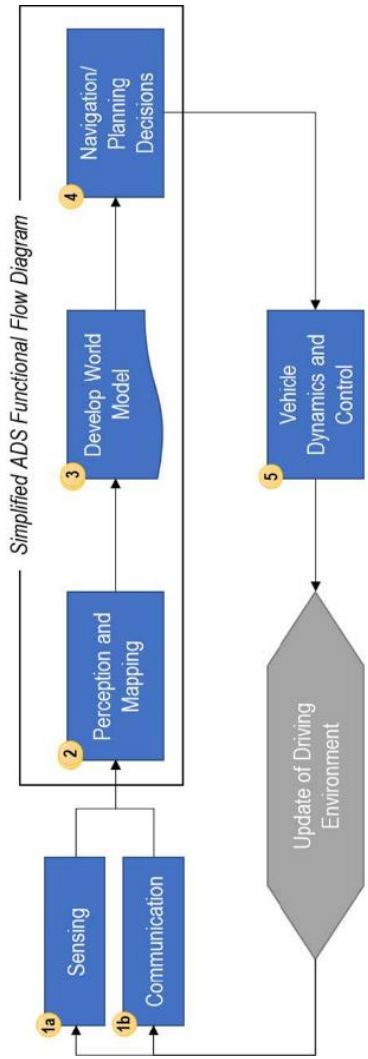


Abbildung 2.7: Vereinfachtes Flussdiagramm für Fahrzeugautomatisierungen (Thorn et al., 2018)

Basierend auf dem so gewonnenen Verständnis arbeitet die Arbeitsgruppe WG9 „Sensor interface for automated driving functions“ der ISO TC22/SC31 daran, die Schnittstellen zwischen den einzelnen Sensoren und der darauffolgenden Informationsverarbeitung industrieweit zu standardisieren. Ein erstes Ergebnis dieser Arbeit ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Informationsverdichtung erfolgt dabei in drei Stufen (von unten nach oben). Stufe 3 liegt direkt hinter dem jeweiligen Sensor und definiert die Schnittstelle der Rohdatenausgabe. Stufe 2 beinhaltet die elektrischen und mechanischen, aber auch die logischen Schnittstellen zwischen den Rohdaten und der Zusammenführung. Die oberste Stufe 1 definiert den Zugriff der einzelnen Automatisierungsfunktionen auf das zusammengestellte Umweltmodell.

Abbildung 2.9 greift das zuvor vorgestellte Modell der WG9 (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2019) in vertikaler Richtung auf und überführt die Perspektive auf die Schnittstellen der Reizaufnahme, Transformation und Vorverarbeitung bis hin zur Bildung einer Wahrnehmung in einem zentralen Umweltmodell als horizontale Informationsverarbeitung. Auf diesem Weg nehmen ein oder mehrere Sensoren Umwelteindrücke auf. Diese Reize werden dann an das dafür zuständige Steuergerät weitergeleitet, welches die Informationen aufbereitet und bewertet. Die verdichteten Informationen werden abschließend mit anderen verfügbaren Daten zusammengesetzt und in das Umweltmodell integriert. Die anschließende Ableitung von Schritten zur Navigation und Fahrzeugsteuerung liegt außerhalb der Betrachtung. Bei der Gestaltung von Validierungsumgebungen für Fahrzeugfunktionen, die auf eine solche Struktur zurückgreifen, ist es hilfreich, den Ablauf und die unterschiedlichen Schritte der Informationsverdichtung im Fahrzeug einschätzen zu können. Aus diesem Grund wird dieses Modell im späteren Verlauf der Arbeit in Kapitel 5.1.3 für Abbildung 5.5 wieder aufgegriffen und die Auswirkungen der Validierungsumgebung auf die Wahrnehmung im Fahrzeug näher betrachtet.

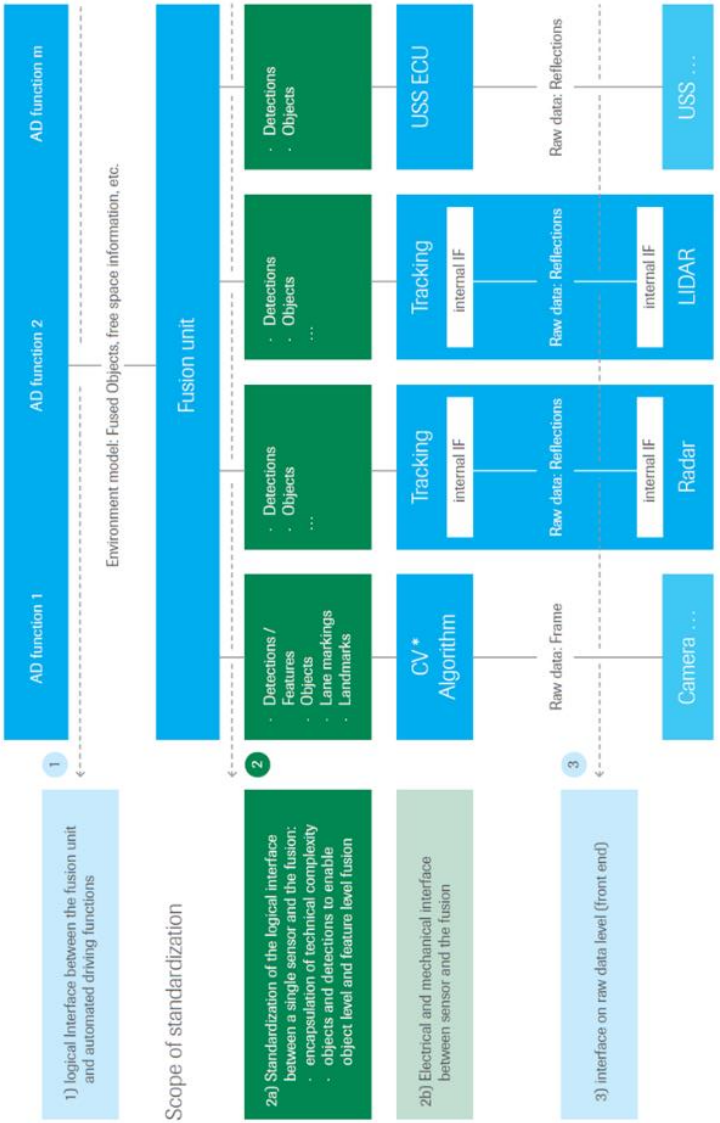


Abbildung 2.8: Sensorschnittstellen nach der ISO TC22/SC31 WG9 „Sensor interface for automated driving functions“ (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2019)



Abbildung 2.9: Zusammenfassung der Informationsübertragung von der Reiz-Aufnahme durch den Sensor (Sense) zur -Wahrnehmung (Perception) im Umweltmodell nach (Thorn et al., 2018) und (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2019)

Der letzte Schritt in der zuvor vorgestellten Verarbeitungskette stellt die Erzeugung des Umweltmodells dar. Dieser als „Perception“ bezeichneter Vorgang wird Beispielhaft an der Umsetzung von Nvidia (NVIDIA, 2021) in Abbildung 2.10 näher betrachtet. Dabei wird die Wahrnehmung in vier Module Unterteilt. Die ersten Beiden sind die Objekt- und die Pfad-Wahrnehmung. Ergänzt werden diese durch die Erfassung von Bedingungen zum Warten, etwa an Ampeln oder Verkehrsschildern, und eine Erkennung für weiterführende Funktionen, zum Beispiel einer Blendungserkennung, welche auch eine Erkennung von Lichtquellen ermöglicht. Allen vier Wahrnehmungs-Modulen ist gemein, dass sie maßgeblich auf Informationen aus einer kamerabasierten Bilderkennung zurückgreifen. Diese zentrale Rolle der Fahrzeugkamera ist einer der Gründe, weshalb in dieser Arbeit die Validierung für diese Sensorik näher betrachtet wird.

Nachdem ein Einblick in die Informations-Weiterleitung sowie -verarbeitung für automatisierte Fahrfunktionen gegeben wurde, werden nun die dafür eingesetzten Sensoren näher betrachtet.

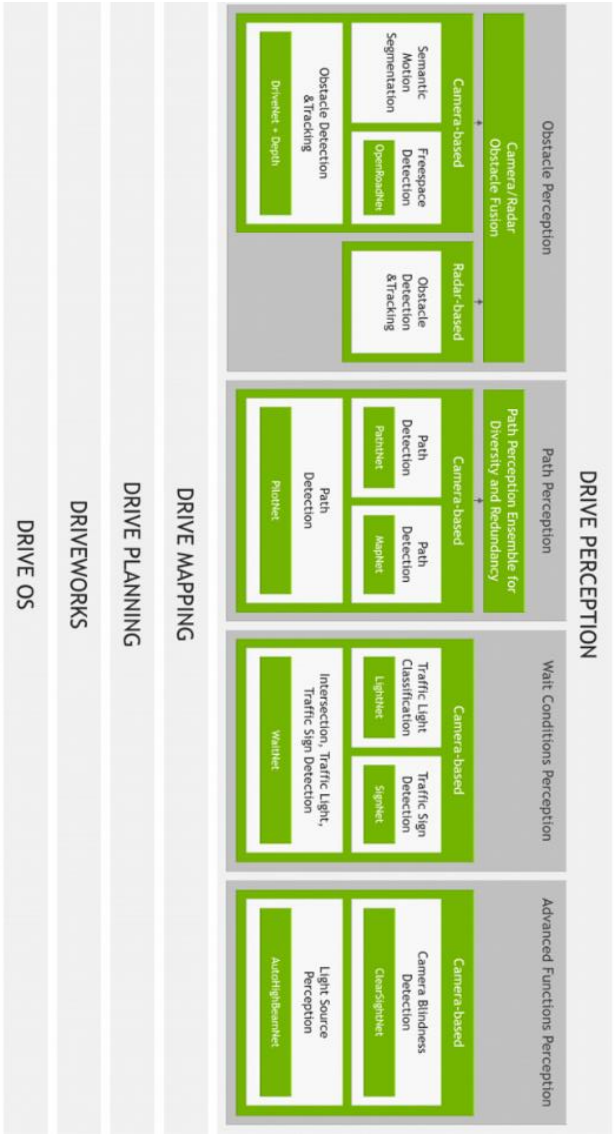


Abbildung 2.10: Wahrnehmung (Perception) der automatisierten Fahrfunktion und dafür primär verantwortliche Umweltsensoren für das NVIDIA DRIVE-System (NVIDIA, 2021)

2.1.3. Einsatz von Sensoren zur Fahrzeugautomatisierung

Automatisierungssysteme im Fahrzeug stehen in direktem Austausch mit anderen Fahrzeugkomponenten und der Umwelt (Haken & Klement, 2013). Um dabei situationsabhängig reagieren zu können, müssen Informationen möglichst unter den folgenden Eigenschaften erfasst werden (Reif, 2012):

- Robustheit: unabhängig von Umweltstörungen wie Regen oder Kälte sein
- Zuverlässigkeit: hinsichtlich einer möglichst hohen Ergebnistreue – „gleiche Ergebnisse unter gleichen Randbedingungen“
- Wirtschaftlichkeit/Kosten: Im automobilen Spannungsfeld hinsichtlich der Kosten für Sensoren und dem Zeitdruck bei der Entwicklung Sorge tragen

Dabei übersetzen Sensoren zunächst die erfassten physikalischen Größen in elektrische Signale (Reif, 2012). Das folgende Kapitel wird einen Überblick vermitteln, welche Sensoren aktuell zur Fahrzeugautomatisierung zum Einsatz kommen. Es wird dabei näher auf die Sensoren eingegangen, die im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit zur Anwendung bei der Sensorstimulation in einer Validierungsumgebung kommen.

Neben Tastern und Schaltern als taktile Sensoren zur Interaktion mit dem Menschen, lassen sich in Anlehnung an das Handbuch Robotik (Haun, 2013) die Sensoren initial in zwei weitere Hauptkategorien einteilen:

Interne Sensoren (ermitteln den Eigenzustand des Fahrzeugs)

- Drehwinkel (bspw. als Einschlag des Lenkrads)
- Raddrehzahl
- Drehmoment (als Traktionsmoment im Antriebsstrang)
- Position auf Globus (GPS)
- Reifendruck
- Ermittlung von Beschleunigungskräften (Längs-/Quer- oder Gierrate)
- Druck in hydraulischen Leitungen (bspw. Bremsleitungen)
- Temperatur von Subsystemen (bspw. Batterie, Leistungselektronik, Berechnungshardware)

Externe Sensoren (ermitteln Eigenschaften der Umwelt um das Fahrzeug)

- Ultraschall (siehe Abschnitt a.)
- Radar (Radio detection and ranging)
- Lidar (Light detection and ranging)
- Kamera (Mono- & Stereo- Anordnung)
- Helligkeits- und Regensensor
- Infrarot (zur Nachtsicht)
- C2X (als Kommunikation mit umgebenden Objekten wie Infrastruktur oder anderen Verkehrsteilnehmern)
- Internet/Mobilfunk/5G (zur Kommunikation mit Infrastruktur)

Die in dieser Arbeit näher untersuchten Systeme greifen hauptsächlich auf Umweltsensoren, wie Kamera oder Ultraschallsensoren, zu. Aus diesem Grund werden im Folgenden die für das spätere Verständnis notwendigen Sensoren tiefergehend vorgestellt.

a. Ultraschall-Abstandssensor

Die Abstandsmessung mit Hilfe von Ultraschall (bei ca. 44 kHz) eignet sich für Strecken bis sechs Meter. Bei größeren Entfernungen wird die Genauigkeit und Zuverlässigkeit maßgeblich durch Umweltgeräusche beeinträchtigt (Winner, Hakuli, Lotz & Singer, 2015). Grundlegend wird bei dieser Sensorik, wie in Abbildung 2.11 dargestellt, ein Ultraschallimpuls vom Sender ausgesendet (1), die Zeit gemessen, bis dieser Impuls von der schallharten Umgebung reflektiert (2) und wieder zum Empfänger zurückkommt (3).

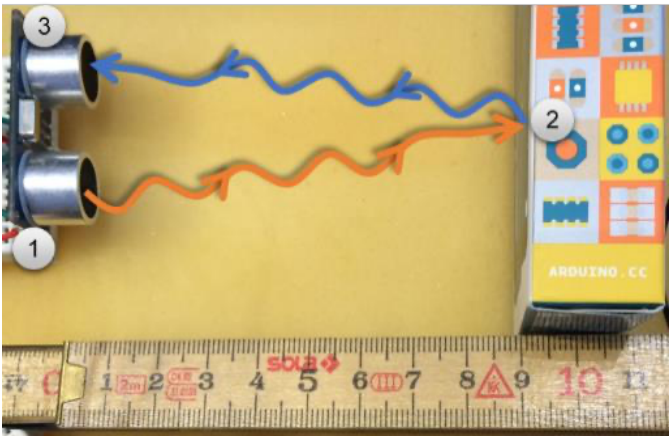


Abbildung 2.11: Ultraschallsensor HC-SR04 mit visualisierter Schallausbreitung und Reflexion; 1. Sender, 2. Reflexion an schallharter Oberfläche, 3. Empfänger (Lutz, 2016)[1]

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Luft bei 20 Grad beträgt ca. 343 m/s und ist nur von der Umgebungstemperatur abhängig. Der Zusammenhang kann jedoch linear beschrieben werden, sodass mittels Temperaturmessung der Einfluss korrigierbar ist. Somit kann aus der Dauer zwischen Aussenden und Empfangen eines Impulses die zurückgelegte Strecke ermittelt werden. Dieses als „Time-of-Flight“ Prinzip genannte Vorgehen (Reif, 2012) ist im Diagramm in Abbildung 2.12 für einen Abstand zwischen Sensor und Hindernis von 9 cm zu sehen. Das Empfangssignal ist dabei meistens länger, da Echo-Effekte den Impuls im Empfang nachschwingen lassen.

[1] Abschlussarbeit des Autors

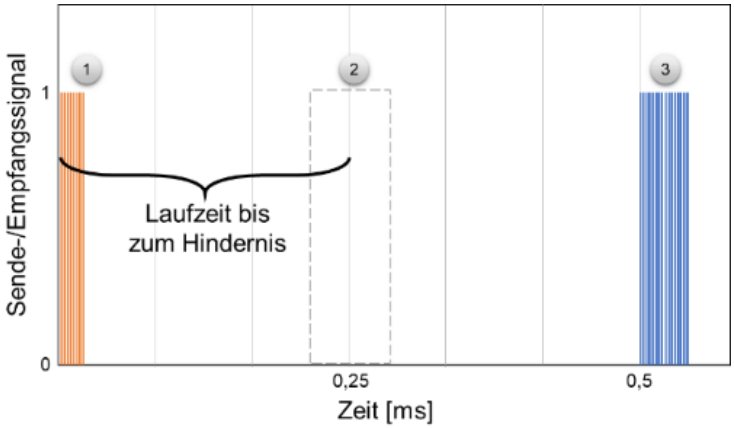


Abbildung 2.12: Binäre Aufzeichnung des gesendeten und empfangenen Signals; 1. Gesendetes Signal bei ca. 44 kHz; 2. Zeitpunkt, bei dem die Impulse am Hindernis reflektiert werden; 3. Empfang des Echos (Lutz, 2016)[2]

Am Fahrzeug werden Sensoren eingesetzt, welche nur aus einem einzigen Schallwandler bestehen und mittels zusätzlicher Entkopplungselementen am Fahrzeug befestigt werden, was in Abbildung 2.13 dargestellt ist. Dieser Wandler dient nacheinander sowohl als Sender, als auch als Empfänger. Dadurch ist der Aufbau deutlich kompakter und lässt sich unauffälliger in den Stoßfängern integrieren. Ein solcher Aufbau bringt jedoch auch den Nachteil mit sich, dass nicht unmittelbar nach dem Aussenden des Ultraschallimpulses die zurückkommende Reflexion detektiert werden kann. Erst muss die Membran des Schallwandlers vom Aussenden ausschwingen, womit der Mindest-Abstand zu Detektion bei einem solchen Aufbau größer als beim Aufbau mit zwei Schallwandlern ist. Typischerweise senden Fahrzeuge alle 0,1 Sekunden einen Impuls aus (Alonso et al., 2011) und sind in der Zwischenzeit zum Empfangen des reflektierten Impulses bereit. Untersuchungen an einem solchen System

[2] Abschlussarbeit des Autors



Abbildung 2.13: Links: Ultraschallsensor in einem Stoßfänger eines PKW Rechts: Ultraschallsensor mit Fixierung am Stoßfänger (Winner et al., 2015)

Gegenstände mit schallabsorbierender Oberfläche, z.B. Schnee, verhindern eine korrekte Abstands-Erfassung, da hier die Reflexion stark gedämpft wird, sodass die Detektion teilweise nicht mehr erfolgen kann. Basierend auf den hier vermittelten Grundsätzen wird in Kapitel 5.2.2 die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Sensorstimulation näher vorgestellt.

b. Helligkeits- und Regensensor

Moderne Fahrzeuge verfügen über Sensorik zur Automatisierung des Fahrtlichts und der Scheibenwischanlage. Die beiden Sensoriken werden meist in einer Einheit kombiniert verbaut, was in Abbildung 2.14 zu sehen ist. Diese sitzt oft im Fuß des Innenspiegels, sodass die Umwelterfassung direkt an der Windschutzscheibe erfolgt. Die Umgebungshelligkeit wird über zwei getrennt voneinander arbeitende Sensoren erfasst (Reif, 2012). Dazu ist eine Photodiode nach oben in das „Globalfeld“ gerichtet (3), während ein zweiter Sensor über Linsen Licht aus dem „Vorfeld“ aufnimmt (6). Durch einen solchen Aufbau können beispielsweise Verdunkelungen aus Brücken oder Bäumen von Tunneln und allgemeiner Dämmerung unterschieden und damit entsprechend das Fahrtlicht situationsgerecht eingeschaltet werden.

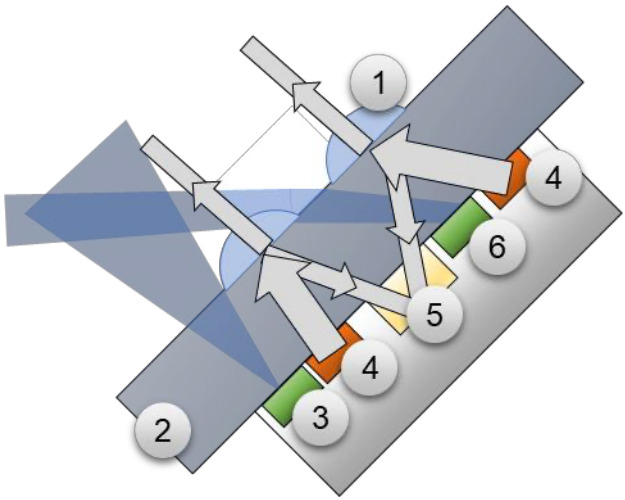


Abbildung 2.14: Sensoreinheit für Regen-/ Lichterfassung an der Frontscheibe (Reif, 2012), 1 Regentropfen, 2 Frontscheibe, 3 Umgebungslichtsensor, 4 IR-Leuchtdioden, 5 IR-Photodiode, 6 in die Entfernung gerichteter Lichtsensor

Die Regenerkennung an der Frontscheibe arbeitet mit Infrarotlicht, welches von innen in die Frontscheibe eingestrahlt wird (4). In trockenem Zustand wird dieses Licht an der äußeren Grenzschicht aus Glas und Umgebungsluft total-reflektiert, sodass der Großteil der ausgestrahlten Lichtintensität auf eine innen gelegene Fotodiode (5) trifft. Um möglichst robust gegen äußere Lichteinflüsse zu sein, erfolgen die ausgestrahlten Lichtimpulse nach einem bestimmten Muster, sodass nur zu bestimmten Zeitpunkten vom Sensor ausgesendete Impulse eine entsprechende Intensität auf der Photodiode bewirken.

Wird die Oberfläche der Frontscheibe durch Regen oder Tau benetzt (1), verändern sich die Brechungseigenschaften an der äußeren Grenzfläche der Frontscheibe, sodass der Brechungsindex von Glas zu Wasser die Totalreflexion aufhebt. Die in der Frontscheibe verbleibende Lichtintensität nimmt auch auf der Photodiode ab und die Automatik betätigt den Scheibenwischer. Die so beschriebene Sensoreinheit mit den Sende- und Empfangs-Dioden sowie den optischen Linsen wird in Abbildung 2.15 dargestellt.



Abbildung 2.15: Foto vom Helligkeits- und Regensensor von Hella, wie er etwa in einem BMW i3 verbaut wird – links die Hauptplatine mit den im Kreis angeordneten Dioden, rechts der Verschlussdeckel mit den eingearbeiteten optischen Linsen

c. Kamera

Digitale Kameras sind eine kostengünstige Lösung, um ein umfassendes Bild von der Fahrzeugumgebung zu erhalten. Solche Systeme bestehen aus mindestens einem optischen Sensor sowie einer möglichst leistungsstarken und zugleich energieeffizienten Recheneinheit. Der Sensor für Fahrfunktionen wird für eine gute Sicht vor das Fahrzeug am Fuß des Innenspiegels unter die Frontscheibe montiert, wie in Abbildung 2.16 dargestellt. Dabei ist die räumliche Nähe zum Helligkeits- und Regensensor zu beachten, sodass auch die Kamera vom Scheibenwischer mit überstrichen wird. Weitere Kameras zur Rundumsicht werden häufig in den Außenspiegeln, der B-Säule und über dem Nummernschild am Heck angebracht. Aus der Kombination von Weitwinkel-Objektiven und digitalen Bild-Transformationen, sogenanntem „Stitching“, eine 360-Grad Abdeckung ermöglicht. Je nach Anwendung können ergänzend Optiken zur Variation des horizontalen Sichtfelds verbaut werden, sodass die Eignung für Fern- oder Nahsicht optimiert wird. Damit bietet ein geringerer Blickwinkel zwar weniger Sichtbereich, allerdings werden damit auch Änderungen im Randbereich weniger stark verzerrt dargestellt, was gerade für Umwelterfassung im Fernbereich wichtig ist. Soll hingegen so viel

Bereich wie möglich in unmittelbarer Nähe zum Fahrzeug erfasst werden, kommen Kamerasysteme mit breiterem Blinkwinkel (Audi AG, 2015b), (Winner et al., 2015) zum Einsatz. Die Auflösung des Sensors liegt bei Assistenzfunktionen, wie sie der BMW i3 bietet, bei 640x480 und damit 0,3 Megapixeln, wohingegen Fahrzeuge mit umfassenden Automatisierungen wie beispielsweise ein Tesla Model 3 (SystemPlus, 2020a) oder Audi Q7 über 1280x960 und damit 1,2 Megapixeln verfügen (Audi AG, 2015b). Je höher die Auflösung des Sensors, desto besser können Objekte in der Ferne erfasst, oder ein breiterer Blickwinkel mit nur einer Kamera abgedeckt werden. Allerdings steigt auch mit der Auflösung die benötigte Rechenleistung, sodass hier erst mit aktuellen Entwicklungen kostengünstige Rechen-Chips verfügbar werden und dadurch höher aufgelöste Sensoren zum Einsatz kommen (Winner et al., 2015), (NVIDIA Corporation, 2023).

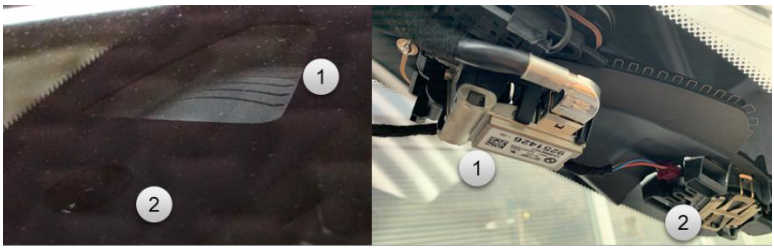


Abbildung 2.16: Kamera (1) und Helligkeits- und Regensensor (2) am Innenspiegelfuß an der Frontscheibe eines BMW i3

Neben Systemen mit Monokamera sind auch Stereokameras am Markt verfügbar. Diese ermöglichen eine präzisere räumliche Umgebungserfassung im Nahbereich mittels Stereoskopie. Hierbei wird das Geschehen vor dem Fahrzeug von zwei Kameras lateral nebeneinander angeordnet aufgenommen. Somit kann aus dem bekannten Abstand zwischen den Kameras die Deviation und damit der Abstand zu den umgebenden Objekten ermittelt werden (Winner et al., 2015). Die Deviation verschwindet jedoch für größere Entfernungen, sodass der Vorteil gegenüber monokamerabasierter Systeme oft nur bei Spezial-Anwendungen im Nahbereich zum Tragen kommt. Etwa ein Baustellenassistent kann mittels Stereokamera Fahrbahnmarkierungen präziser bestimmen, was bei den beengten Platzverhältnissen und damit kürzeren Reaktionszeiten von Vorteil ist (Munsch, 2013).

Mittlerweile werden auch Systeme mit mehreren Kameras eingesetzt, welche nicht den Zweck einer Stereoskopie verfolgen. Diese Anordnungen verfügen über unterschiedliche Blickwinkel und Brennweiten, um den Nah- sowie Fernbereich

präziser beobachten zu können (Yoshida & Di Paolo Emilio, 2020). Beispielsweise verfügt das Tesla Model 3 über eine Dreifach-Kamera-Anordnung, in der zur Kostenoptimierung drei Mal der exakt gleiche Sensor mit unterschiedlichen Optiken ohne weitere Bildauswerte-Logik verbaut ist, was in Abbildung 2.17 dargestellt wird. Die Datenauswertung findet dann in der, an anderer Stelle im Fahrzeug verbauten, zentralen Recheneinheit statt, in welcher die Bildströme aller Kameras zusammenlaufen.



Abbildung 2.17: Dreifach-Kamerasystem des Tesla Model 3 mit unterschiedlichen Optiken (SystemPlus, 2020b)

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 2.18 die Lösung von ZF Friedrichshafen AG. Neben den Kameras sind bei diesem Beispiel auch die Mikroprozessoren zur Bildverarbeitung, hier von Mobileye Global Inc., auf der Trägerplatine installiert. Ein so aufgebautes System bringt im Vergleich zum vorher gezeigten Beispiel höhere Kosten von 165$ gegenüber 65$ bei Tesla mit sich (SystemPlus, 2020c). Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Bildauswertung bei Tesla nicht mit in der Kamera-Einheit liegt und so noch Mehrkosten im nachgeschalteten Zentral-Computer des Fahrzeugs anfallen.



Abbildung 2.18: Dreifachkamera S-Cam4 von ZF mit integrierten Bildverarbeitungs-Chips (SystemPlus, 2020c)

Die Recheneinheit zur Bildauswertung wird oft in ein nachgeschaltetes Steuergerät verbaut. Damit lassen sich Informationen aus der Kamera mit denen von anderen Sensoriken aus dem Restfahrzeug fusionieren. Somit benötigt man weniger Bauraum an der Frontscheibe und im Sichtfeld des Fahrenden. Ein solches Steuergerät mit Hardware zur Bildauswertung für den BMW i3 ist in Abbildung 2.19, links geschlossen sowie rechts geöffnet, dargestellt. Somit kann neben den Anschlüssen zur Kommunikation mit der Kamera und dem Restfahrzeug, der Hauptprozessor zur Objekterkennung erkannt werden. In diesem Fall kommt ein EyeQ2 von MobilEye zum Einsatz. Eine solche Lösung wird von vielen OEMs, beispielsweise BMW, GM und Volvo verbaut (Levy, 2010).

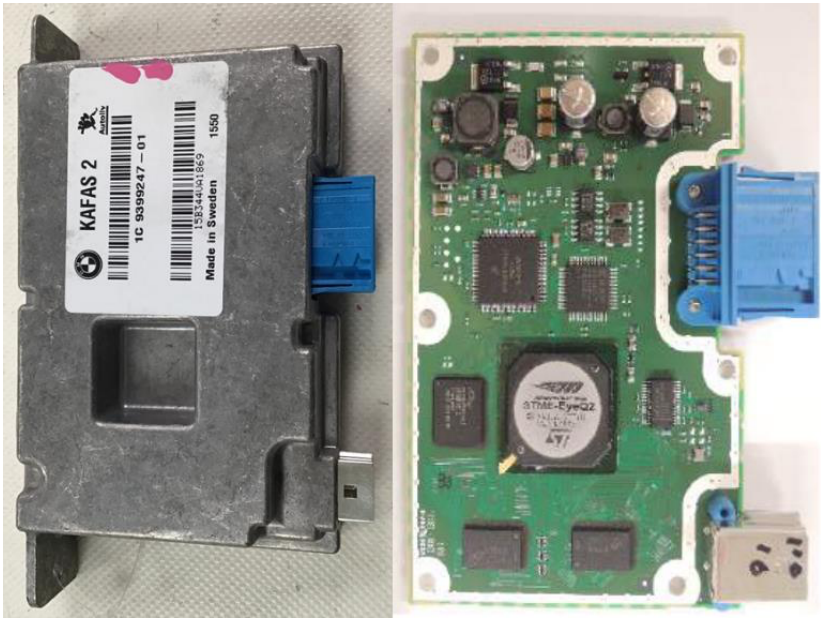


Abbildung 2.19: Steuergerät (links geschlossen (B-Parts, 2021), rechts die Hauptplatine (Johansson & Oden, 2015) für kamerabasierte Assistenzfunktionen des BMW i3, ausgestattet mit dem Chip EyeQ2 von MobilEye

Kamerasysteme für Fahrerassistenzfunktionen werden nicht nur Werkseitig durch OEMs verbaut. Im Folgenden wird eine Nachrüstlösung von MobilEye näher vorgestellt, welche späterhin für Untersuchungen verwendet wird. Mit Hilfe eines solchen Systems können beispielsweise PKW, aber auch Busse oder LKW, mit einem Auffahrwarner, Spurhalte- oder Totwinkelassistenten ausgestattet werden. Die Kamera einer solchen Lösung ist in Abbildung 2.20 links dargestellt.

Bei Nachrüstlösungen, wie der im vorangegangenen Absatz beschriebenen, greift das System auf die fahrzeuginterne Kommunikation per CAN zu, um die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit, den Lenkradeinschlag oder den Zustand des Blinkers zu erfassen. Zusätzlich werden sowohl akustisch, als auch über ein Display dem Fahrer optische Hinweise zur aktuellen Fahrsituation mitgeteilt. Dazu zählen das Einhalten des geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstands, Verkehrszeichen für Geschwindigkeitsbegrenzungen oder das ungewollte Verlassen der Fahrspur ohne vorherige Betätigung des Blinkers. Ein solches Display ist in Abbildung 2.20 rechts dargestellt. Damit greift dieser Assistent also nicht aktiv in das Fahrgeschehen ein, sondern bietet dem Fahrer hinweisende Informationen (MobilEye, 2011).



Abbildung 2.20: Foto vom Kamerasystem zum Nachrüsten von Fahrerassistenzfunktionen und Display zur Kommunikation mit dem Fahrer von MobilEye

Abbildung 2.21 zeigt die Nachrüst-Kamera von MobilEye in geöffnetem Zustand. Im rechten Teil ist die Hauptplatine mit dem Bildauswerte-Prozessor zu erkennen. Auch hier kommt der EyeQ2 zum Einsatz, womit das Systemverhalten hinsichtlich der Objekterkennung und der daraus resultierenden Anzeige für den Fahrer sehr ähnlich zum werksseitig verbauten System im vorher gezeigten BMW i3 ist. Vom Autor dieser Arbeit durchgeführte Vergleichsfahrten mit dem Institutsfahrzeug und der gleichzeitig verbauten Nachrüstlösung bestätigen diese Aussage. Diese Parallelität der verwendeten Hardware wird im Laufe dieser Arbeit noch relevant, wenn vom Verhalten der Nachrüstlösung auf Ansätze zur Stimulation des im BMW i3 verbauten System geschlossen wird.

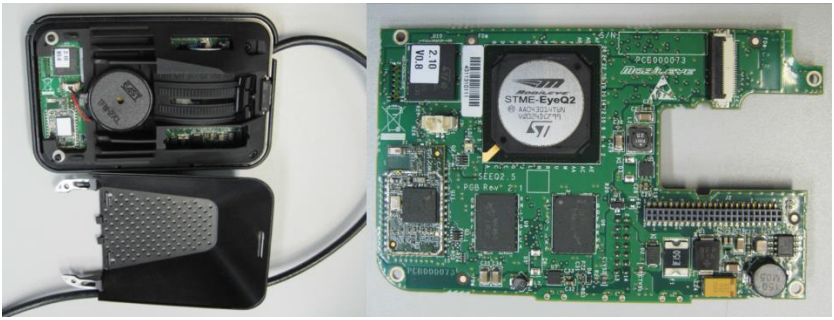


Abbildung 2.21: Geöffnetes Kamerasystem von MobilEye, bestückt mit dem MobilEye EyeQ2 (FCC, 2012)

Nachdem die Hardware aktueller Kamerasysteme zur Umwelterfassung vorgestellt wurde, wird im nachfolgenden Kapitel auf die Auswertung des gewonnenen Bildmaterials und der daraus ermöglichten Umsetzung einer adaptiven Geschwindigkeitsregelung eingegangen.

2.1.4. Bildauswertung und adaptive Abstandsregelungen im Automobil

Wie in Kapitel 2.1.2 *Aufbau und Ablauf von automatisierten Fahrfunktionen* eingeführt wurde, basieren eine Vielzahl von Fahrzeugautomatisierungen auf einer kamerabasierten Umwelterfassung. In diesem Zusammenhang muss der Erfassungsbereich einer Kamera in vertikaler und horizontaler Richtung unterschieden werden (Winner et al., 2015). Der vertikale Blickwinkel (vertikal Field of View – VFOV) bestimmt dabei den Mindestabstand zum noch erfassbaren Target als Bereich der über der Motorhaube auf die Straße blickt. Der horizontale Bereich (horizontal Field of View – HFOV) legt fest, wie weit noch Objekte neben der eigenen Fahrspur erfasst werden können (Winner et al., 2015). Abbildung 2.22 zeigt eine Übersicht der beiden Blickwinkel. Die so definierten Erfassungsbereiche werden im

weiteren Verlauf der Arbeit genauer betrachtet, wenn diese Bereiche durch eine Leinwand oder ein Display mit künstlich erzeugten Bildern möglichst realitätsnah abgedeckt werden sollen.

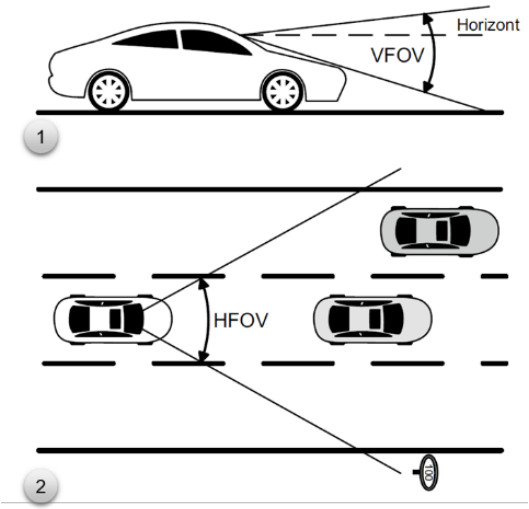


Abbildung 2.22: Vertikales (1) und horizontales (2) Blickfeld einer Frontview-Kamera (Winner et al., 2015)

Damit aus unverarbeitetem Videobildern Informationen über umgebende Objekte und deren Abstand zum eigenen Fahrzeug (auch Egofahrzeug genannt) werden, bedarf es einer rechenintensiven Bildverarbeitung (Winner et al., 2024). In einem ersten Schritt wird dabei eine Objekterkennung durchgeführt. Diese analysiert jedes Einzelbild und wertet scheinbar zusammenhängende Bildbereiche hinsichtlich eindeutiger Objektmerkmale aus. Beispielsweise verfügt ein Fahrzeug über eine rechteckige Außenkontur, an deren Unterseite ein Schatten die Abgrenzung zur Fahrbahn darstellt. Außerdem sind Heckstrahler durch Regularien vorgeschrieben, sodass an der linken sowie rechten Seite symmetrisch rote Flächen erkannt werden können (Speth, 2009). Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind in Zusammenarbeit mit der Co-Betreuten Abschlussarbeit von Davide Mattia (2018)[3] entstanden und zeigen, dass ein so bestückter Quader ausreicht, um von der Automatisierung eines BMW i3 als Heckansicht eines anderen Fahrzeugs erkannt

[3] Co-Betreute Abschlussarbeit

zu werden. Abbildung 2.23 zeigt zwei Bilder der Untersuchungen, bei denen ein solches Target aus dem Cockpit des Versuchsfahrzeugs (links) sowie das Target alleine (rechts) zu sehen ist. Dabei ist einmal im Combi-Instrument die aktivierte Leuchte zur Anzeige eines erkannten vorausfahrenden Fahrzeugs (1) und die notwendigen Objektmerkmale auf dem Target zu erkennen (2 & 3).

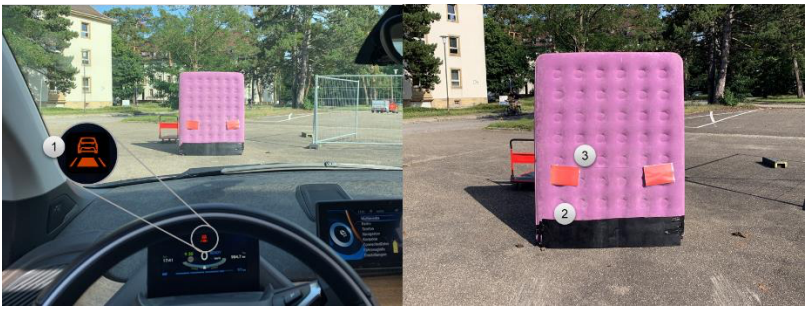


Abbildung 2.23: Auffahrszenario auf Test-Target mit Anzeige der erfolgreichen Erkennung im Cockpit (1) bestehend aus einem rechteckigen Quader als Grundkörper, einem Schatten unter dem Heck (2) und symmetrisch angebrachten Heckleuchten (3)

Bei der Umwelterfassung werden eine Vielzahl von Objekten erkannt, sodass neben motorisierten Fahrzeugen auch Fußgänger oder Fahrradfahrer sowie stationäre Verkehrsinfrastruktur wie Fahrspurmarkierungen, Verkehrszeichen, Ampeln oder Pylonen korrekt wahrgenommen werden (YouTube AI DRIVR, 2021). Ein Beispiel für die Anzeige eines erkannten Objekts ist in Abbildung 2.23 dargestellt.

Neben der Erkennung von Objekten wird auch deren Abstand zum Egofahrzeug von Sensoren gemessen. Bei monokamerabasierten Lösungen wird dabei einerseits die Lage des Horizonts ermittelt und andererseits der Abstand zu anderen Fahrzeugen oder Verkehrsteilnehmern basierend auf bekannten Objektmerkmalen geschätzt. Das hier beschriebe Vorgehen geht aus der Publikation „Vision-based ACC with a Single Camera: Bounds on Range and Range Rate Accuracy“ von Gideon Stein, Ofer Mano und Ammon Shashua hervor (Stein, Mano & Shashua, 2003). Hierbei wird der Forschungsansatz von Mobileye näher vorgestellt. Dazu wird die Höhe einer Fahrzeug-Heckansicht zwischen Oberkante und abschließenden Schatten am Fußpunkt ermittelt und mit einem gebräuchlichen Maß verglichen. Diese Modellierung entspricht einer Abbildung durch eine Lochkamera und ist schematisch in Abbildung 2.24 illustriert (Stein et al., 2003). Mit Hilfe dieses Vorgehens kann aus der Abbildungsgröße auf den dafür verantwortlichen Abstand

geschlossen werden. Neben der Fahrzeughöhe wird auch der Abstand zwischen den Heckleuchten mit einer ähnlichen Auswertung geschätzt.

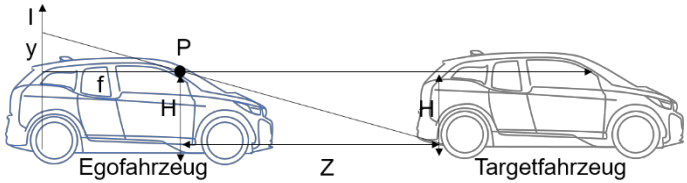


Abbildung 2.24: Abstandsschätzung durch Projektion der Fahrzeughöhe nach Stein et al. (2003)

Für die geometrischen Zusammenhänge gelten die Abhängigkeiten aus Abbildung 2.25. Dabei lässt sich der Abstand zwischen den Fahrzeugen Z schätzen, da H (Höhe der Kamera),y (Abbildungshöhe des Hecks), und f (Brennweite) gegeben sind (Stein et al., 2003).

$$\frac{H}{y} = \frac{Z}{f} \rightarrow Z = \frac{H}{y} \cdot f$$

Abbildung 2.25: Abhängigkeiten zur Schätzung des Abstands zwischen Ego- und Target-Fahrzeug (Stein et al., 2003)

Zusätzlich zur Projektionsgröße wird auch die relative Lage des Target-Fahrzeugs zur Position des Horizonts mit berücksichtigt (Speth, 2009). Dabei liegt ein weiter entferntes Fahrzeug höher und ein näheres Fahrzeug weiter unter dem Horizont. Entsprechendes Verhalten ist in Abbildung 2.26 dargestellt.

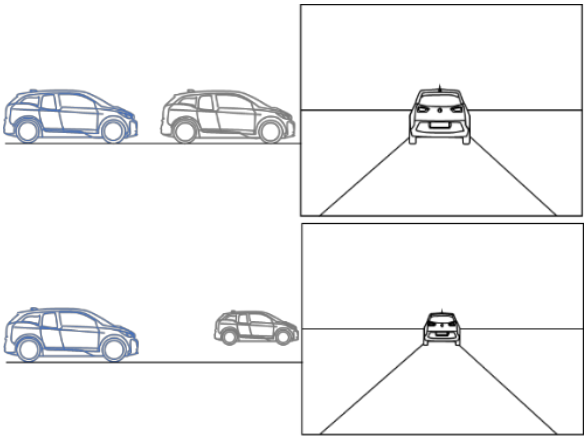


Abbildung 2.26: Visualisierung zur abstandsabhängigen Lage des Target-Fahrzeugs aus Sicht des Egofahrzeugs nach (Stein et al., 2003)

Eine solche Schätzung wird auch durch vertikalen Versatz zwischen den beiden Fahrzeugen beeinflusst, wie es beispielsweise bei einer Fahrt bergauf oder bergab der Fall ist. Dieser Zusammenhang aus Sicht des Egofahrzeugs ist in Abbildung 2.27 dargestellt. Um diesem Einfluss entgegen zu wirken, wird auch die Lage des Horizonts berücksichtigt. Dabei bedeutet eine Verschiebung des Horizonts unter die Mittellage eine Fahrt bergauf und eine Verschiebung über die Mittellage eine Fahrt bergab. Der Einfluss aus den hier vorgestellten Gegebenheiten wird im späteren Verlauf der Arbeit wieder aufgegriffen, wenn die Ausrichtung eines Kamerastimulators die Lage des Horizonts beeinflusst und der Abstand zwischen Kamera und Stimulator die Größe des wahrgenommenen Fahrzeughecks verändert. Siehe dazu Kapitel 5.3.3 (Stein et al., 2003).

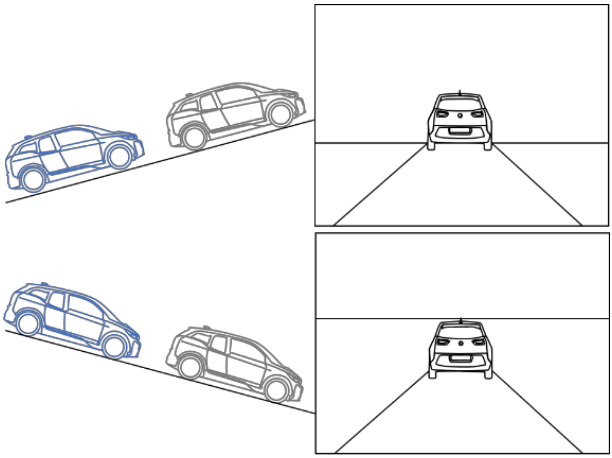


Abbildung 2.27: Visualisierung der Verschiebung des Horizonts durch eine Bergauf- und Bergabfahrt nach (Stein et al., 2003)

Eine auf diesem Weg erfolgte Abstandsermittlung findet beispielsweise in einem ACC-System (Adaptive Cruise Control), also einer adaptiven Fahrgeschwindigkeitsregelung, Anwendung. Diese Systeme können als Assistenzfunktion die Fahrgeschwindigkeit des Egofahrzeugs in Abhängigkeit zum umgebenden Verkehrsgeschehen anpassen. Der Ursprung dieser Regelung liegt in der schon länger etablierten Geschwindigkeitsregelung, welche als Cruise Control oder Tempomat bekannt ist (Winner et al., 2015). Bei solchen Systemen kann der Fahrer über Tasten am Lenkrad oder einen Lenkstockhebel dem Fahrzeug eine gewünschte Soll-Geschwindigkeit vorgeben. Diese wird von der Motosteuerung als Ist-Geschwindigkeit eingeregelt (Winner et al., 2015). Über die Jahre wurde dieses System beispielsweise um einen aktiven Bremseingriff erweitert, sodass auch bei Bergabfahrt die vom Fahrer eingestellte Soll-Geschwindigkeit vom Fahrzeug eingeregelt wird. Mit der Verfügbarkeit von Systemen zur radarbasierten Abstandsermittlung über Distanzen bis 200 Meter wurden Ende der 1990er Jahre ACC-Systeme massentauglich (Mercedes Benz Group AG, 2025).

Die Funktionalität von ACC-Systemen wird über verschiedene Normen genauer spezifiziert. In diesem Zusammenhang beschreibt ISO 15622 die grundsätzlichen Funktionen und ISO 22179 Details für Fahrten im unteren Geschwindigkeitsbereich.

Der Betrieb eines ACC-Systems lässt sich in zwei Zustände unterteilen:

- Geschwindigkeitsgeregelter Betrieb:
  Im geschwindigkeitsgeregelten Betrieb hält das Fahrzeug die vom Fahrer eingestellte Soll-Geschwindigkeit, welche gemeinhin als Setzgeschwindigkeit bezeichnet wird. Das System regelt Fahrwiderstände, wie Steigungen oder Gegenwind aus, und kann auch Beschleunigungen aus Fahrten mit Gefälle mittels aktivem Bremseingriff über das ESP-System entgegengenwirken. Dieser Betrieb ist vergleichbar mit der Funktionalität eines Tempomaten.
- Abstandsgeregelter Betrieb:
  Der abstandsgeregelte Betrieb lässt sich in die drei Betriebszustände unterteilen: Folgefahrt, Annäherung sowie Beschleunigung.

Die Folgefahrt ergibt sich, wenn sich vor dem Egofahrzeug ein Target-Fahrzeug befindet, welches mit einer niedrigeren Geschwindigkeit als der im Egofahrzeug eingestellten Setzgeschwindigkeit fährt. Dabei regelt das ACC-System die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs so, dass ein sicherer Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen eingehalten wird. Diese Distanz wird Sollzeitlücke genannt. Dabei kann über entsprechende Tasten die Länge dieser Sollzeitlücke beeinflusst werden. Gebräuchlich sind hier Einteilungen in vier Stufen, wobei vom Fahrenden keine konkreten Werte in Sekunden oder Meter eingestellt werden. Abbildung 2.28 zeigt die Anzeige im Kombiinstrument sowie die Eingabetasten eines BMW i3. Außerdem übernimmt das System die Geschwindigkeit des Target-Fahrzeugs gedämpft, damit Schwankungen im Geschwindigkeitsverlauf des Target-Fahrzeugs nicht auf das Ego-Fahrzeug übernommen werden.

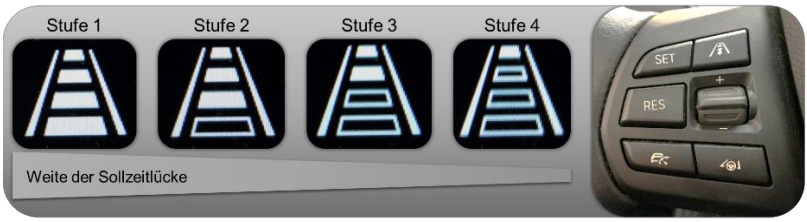


Abbildung 2.28: Anzeige der vier Stufen für die Sollzeitlücke und Bedienelemente zur Einstellung des ACC-Systems am Lenkrad eines BMW i3

Bei der Annäherung erkennt das System, dass sich vor dem Egofahrzeug ein Target-Fahrzeug befindet, welches mit einer geringeren Geschwindigkeit fährt. Daraufhin wird die Egogeschwindigkeit so lange verzögert, bis sich ein konstanter Sicherheitsabstand zwischen den beiden Fahrzeugen eingeregelt hat. Erhöht das Target-Fahrzeug seine Geschwindigkeit oder entfernt es sich aus dem Bereich vor

dem Egofahrzeug, registriert das System dies und beschleunigt bei höher liegender Setzgeschwindigkeit das Egofahrzeug.

Zusätzlich existieren Funktionsgrenzen, welche unter besonderen Bedingungen das Verhalten der Fahrzeugregelung vorgeben. Dazu zählt eine sehr langsame Fahrzeuggeschwindigkeit oder die Regelung beim Auffahren auf ein stehendes Fahrzeug. Konkrete Beispiele für solche Vorgaben sind (BMW Group AG, 2013):

- Mindest-Setzgeschwindigkeit von über 30 km/h Tachogeschwindigkeit
- Regelung des Fahrzeugs bis zum Stillstand mit üblichem Endabstand etwa an Ampeln oder beim Halten an Kreuzungen
- Automatische Wiederanfahrt innerhalb einer bestimmten Zeitspanne, bei einer längeren Standzeit wird eine Reaktion des Fahrers notwendig

Für die Regelung bei Folgefahrt wird die Sollzeitlücke üblicherweise über die "Time to Colission" (TTC oder τ) festgelegt. Nach ISO 15622 *Intelligent transport systems – Adaptive Cruise Control systems* berechnet sich diese wie folgt: $\tau = \frac{x}{v}$, wobei x für den Abstand zum Target-Fahrzeug und v für die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs steht. Diese Größe stellt die Zeit dar, bis mit aktueller Geschwindigkeit der Abstand zum Target aufgebraucht wäre. Darauf basierend wird festgelegt, ab wann die Automatisierung die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs verringern soll und wie stark die Verzögerung in Abhängigkeit zur gefahrenen Geschwindigkeit maximal sein darf.

Moderne Fahrzeuge verfügen über eine Vielzahl von Systemen zur Längsdynamikregelung, sodass vom Fahrenden nicht mehr unterschieden werden kann, welches System aktuell für die Regelung verantwortlich ist. Damit geben die Fahrenden immer mehr die Aufgabe der Fahrzeugführung ab, wodurch sich das Fahren immer mehr einem „Gefahren werden" annähert. Ein Beispiel dafür ist das Tesla Model S, bei dem mittlerweile nicht mehr einzelne Assistenten an den Fahrenden kommuniziert werden, sondern die Funktion „Autopilot" aktiviert wird (Tesla Inc., 2025a). Im Hintergrund arbeitet ein weit entwickelter Spurhalte- und Wechselassistent sowie ein ACC- und ein AEB-System, was vom Fahrenden nicht erkannt werden kann. Diese Bezeichnung kann jedoch auch zu dem Missverständnis führen, dass das System sich tatsächlich um alle Aufgaben der Fahrzeugführung kümmert und man sich als Fahrender vom Fahrgeschehen abwenden könnte. Als Assistenzsystem kenn es dies jedoch nicht leisten, sodass die Verantwortung immer noch beim Fahrenden liegt. Abbildung 2.29 zeigt das Fahrgeschehen in einem Tesla Model S aus Sicht des Fahrenden mit der Überlagerung einer optischen Repräsentanz des virtuellen Umweltmodells aus dem Combi-Display im unteren Bereich des Bildes (YouTube AI DRIVR, 2021). Hierbei

ist zu sehen, wie der umgebende Verkehr auf den Fahrspuren sowie die Ampeln davor auf der Kreuzung erkannt wird.



Abbildung 2.29: Überlagerung aus realer Fahrzeug Umgebung und virtueller Repräsentanz des virtuellen Umweltmodells der Fahrzeugautomatisierung eines Tesla Model S im Jahr 2021 (YouTube AI DRIVR, 2021)

Die bisher vorgestellten Sensoren werden in unterschiedlichen Konfigurationen in das Fahrzeug integriert. Im Folgenden werden deshalb gängige Architekturen zum Aufbau der Informationsverarbeitung im Fahrzeug vorgestellt.

2.1.5. Fahrzeugarchitekturen und Vernetzung für automatisierte Fahrfunktionen

Automatisierungen der Fahrfunktion setzen eine Vernetzung von unterschiedlichen Systemkomponenten des Automobils voraus (Siebenpfeiffer, 2015). In diesem Zusammenhang müssen etwa Sensoren mit Steuergeräten und diese mit Anzeigen, Eingabemöglichkeiten oder Aktoren verbunden sein. Damit nicht für jede Verbindung eine eigene Datenleitung im Fahrzeug verbaut werden muss, haben sich Bus-Systeme durchgesetzt. Der etablierte Standard im Fahrzeug ist der CAN-Bus, welcher in der „Controller Area Network“ 1986 von Bosch sowie Intel vorgestellt und als ISO 11898-1 standardisiert ist. Bei diesem Bus-Netzwerk speist ein angeschlossenes Gerät eine Information in den Controller-Verbund ein, wodurch diese Nachricht allen verbundenen Steuergeräten zur Verfügung steht. Das Format für die Einspeisung der jeweiligen Information erfolgt dabei nach einer Hersteller-spezifischen Kodierung, welche in der CAN-DBC als Übersetzungstabelle

festgehalten ist. Ein solcher Bus wird in allen gängigen Fahrzeugen eingesetzt, wobei er anfänglich zur Vernetzung zwischen Getriebe- und Motorsteuergerät verwendet wurde. Heutzutage sind mehrere solcher Bus-Netzwerke im Fahrzeug miteinander verbunden. Diese Trennung ist notwendig, da die Mitteilungen auf dem Bus mit einer internen Priorisierung versendet werden und so bestimmte Mitteilung mit einer niedrigeren Priorität ab einer höheren Bus-Auslastung nicht mehr gesendet werden würden (Volkswagen AG, 2001). Beispielsweise ist ein Bus für die Antriebsstrang-Komponenten, einer für die Komfortfunktionen und ein dritter für das Infotainment zuständig. Die einzelnen Busse sind über ein Gateway miteinander verbunden, sodass Informationen, wie die Fahrzeuggeschwindigkeit, aus einem Bus in einen anderen Bus übertragen werden und dort beispielsweise zur Regelung der Radio-Lautstärke zur Verfügung stehen. Diese Art der Vernetzung und Aufteilung in unterschiedliche Domänen ist in Abbildung 2.30 dargestellt und wird im Folgenden anhand zweier Beispiele weiterführend vorgestellt. Somit wird klar, dass bei der Entwicklung und dem Aufbau der Vernetzung die zugrunde liegende Architektur maßgeblichen Einfluss auf die Erweiterbarkeit und Leistungsfähigkeit der Fahrzeugfunktionen hat (Habermann, Reuss & Meyer, 2020).

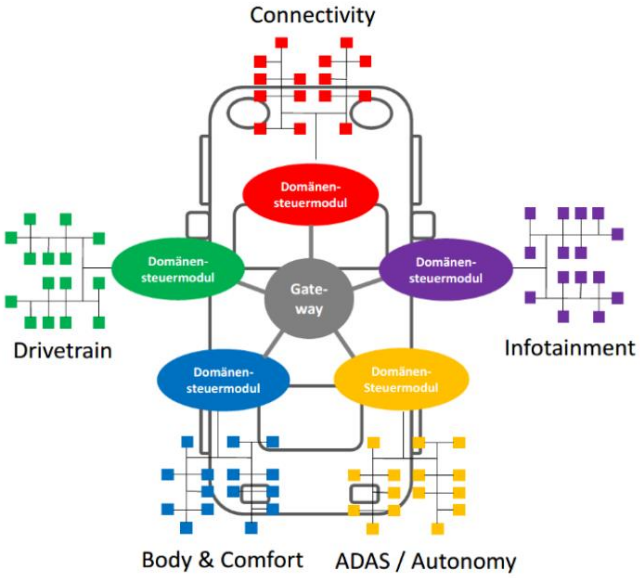


Abbildung 2.30: Die Domänenarchitektur im Fahrzeug (Habermann et al., 2020)

Die Umsetzung der Domänenarchitektur hat seinen Ursprung in der Verwendung für den Antriebsstrang. Durch die stetige Integration zusätzlicher Fahrzeugfunktionen wurden weitere Domänen neben dem Tribstrang mit in die Architektur eingebunden.

Abbildung 2.31 zeigt den Steuergerätebaum des BMW i3 bestehend aus 24 Steuergeräten, welche über fünf unterschiedliche CAN-Netzwerke (PT-CAN, PT-CAN2, K-CAN, K-CAN2, K-CAN3,) miteinander verbunden sind. Der Austausch über die CAN-Grenzen hinweg erfolgt über das Zentrale Gateway Modul (ZGM), welches auch den OBD-Anschluss zur On-Board-Diagnose bereithält. Die Funktionen zur Fahrzeugautomatisierung, wie etwa der Abstandsregeltempomat oder der Notbremsassistent, werden über das „KAFAS"-Steuergerät (**Ka**mera basierte **F**ahrer**as**sistenz) als Steuergerät für kamerabasierte Fahrerassistenzfunktionen zur Verfügung gestellt.

Als weitere Bus-Systeme kommen in PKW oft auch LIN (Local Interconnect Network), für lokal begrenzte Vernetzungen etwa zwischen Sitzverstellung und deren Steuereinheit zum Einsatz. Diese Form der Vernetzung ist technisch weniger aufwändig und damit kostengünstiger. Flexray hingegen stellt die Weiterentwicklung von CAN dar, welcher einen höheren Datendurchsatz sowie geringere Latenz besitzt (Winner et al., 2015).

Die Fortführung einer solchen Architektur stellt das Beispiel aus Abbildung 2.32 dar. Hier wird der Steuergeräte-Baum des Audi Q7 aus dem Modelljahr 2015 gezeigt, bei dem über hundert Steuergeräte zusammenwirken. Es ist zu sehen, wie stark sich die Komplexität der Steuergeräte-Topologie in dieser Zeit erhöht hat.

Um zukünftig die immer weiter ansteigende Komplexität beherrschen zu können, kommen neuartige Architekturen zum Einsatz. Innerhalb dieser werden Funktionen nicht mehr durch einzelne Steuergeräte zur Verfügung gestellt, sondern werden als Software-Bestandteil eines zentralen „Car Servers" realisiert. Eine solche zentrale Architektur wird in Abbildung 2.33 dargestellt. Sie wird aktuell nur in einzelnen Fahrzeugen umgesetzt und ist Gegenstand aktueller Entwicklungsarbeit. Zu dieser Entwicklung trägt der Branchenverbund AUTOSAR (AUTOSAR, 2025) (Schäuffele & Zurawka, 2016) bei.

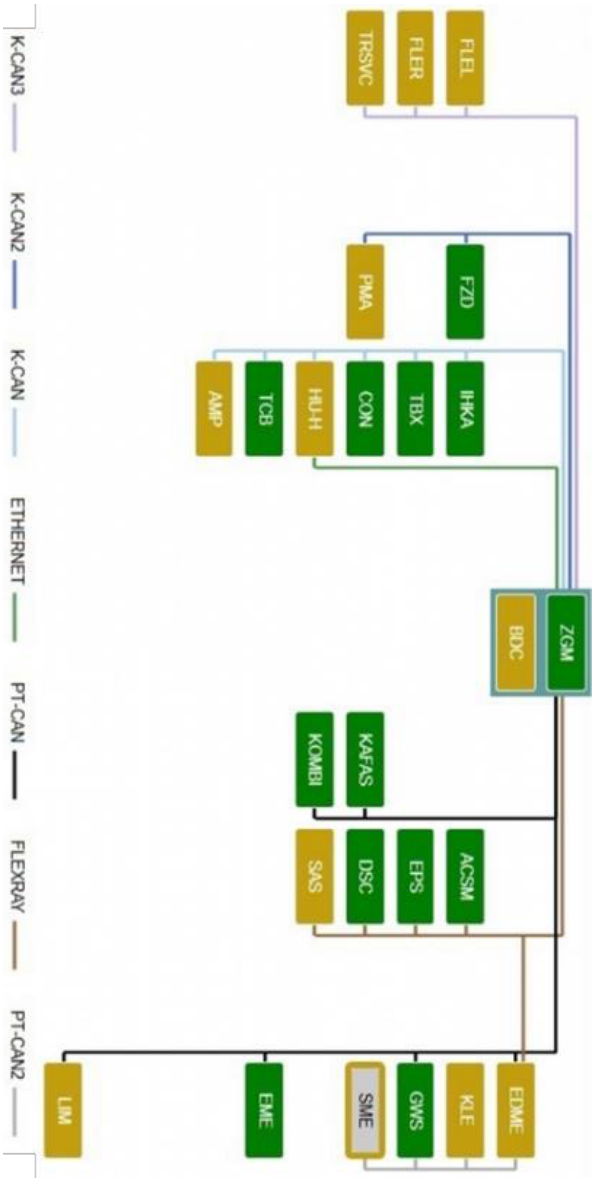


Abbildung 2.31: Steuergerätebaum des BMW i3 (Krause, 2018)

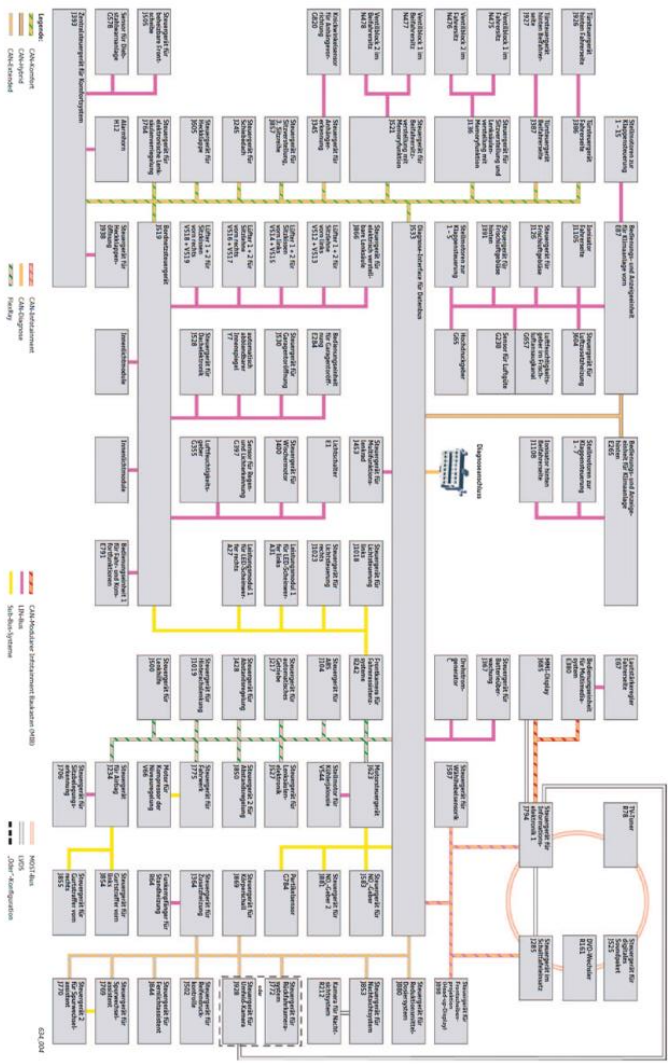


Abbildung 2.32: Steuergerätebaum zur Veranschaulichung der Komplexität einer modernen Fahrzeugarchitektur am Beispiel des Audi Q7 (Audi AG, 2015a) (zur besseren Lesbarkeit siehe Anhang)

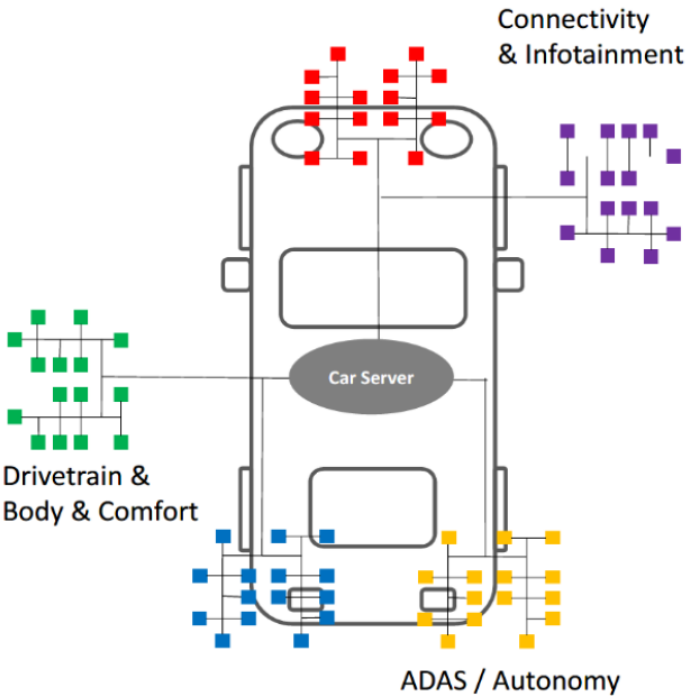


Abbildung 2.33: Zentrale Architektur im Fahrzeug (Habermann et al., 2020)

2.1.6. Bezeichnungen von Fahrerassistenz- und Automatisierungsfunktionen

Die zuvor vorgestellten Sensoren und Fahrzeugarchitekturen bieten die Grundlage für immer umfangreichere Fahrerassistenz- und Automatisierungsfunktionen. Diese werden von den Fahrzeugherstellern mit individuellen Bezeichnungen beworben, besitzen jedoch häufig dieselbe Funktionalität. Als international anerkannte Bezeichnung zur Differenzierung und Einteilung dieser Systeme hat sich die von der SAE (Society of Automotive Engineers, zu Deutsch: „Verband der Automobilingenieure“) erarbeitete Einteilung der Norm SAE J3016 etabliert (SAE, 2016). Diese unterteilt die Schritte zur vollständigen Automatisierung in Level 0 bis 5 (siehe Abbildung 2.34). Die vorgenommene Aufteilung wurde mittlerweile mit der Bundesanstalt für Straßenwesen koordiniert und berücksichtigt somit in der neusten Fassung deren Definitionen von 2012 (Gasser, 2012) und (SAE, 2016) Chapter 8.5.

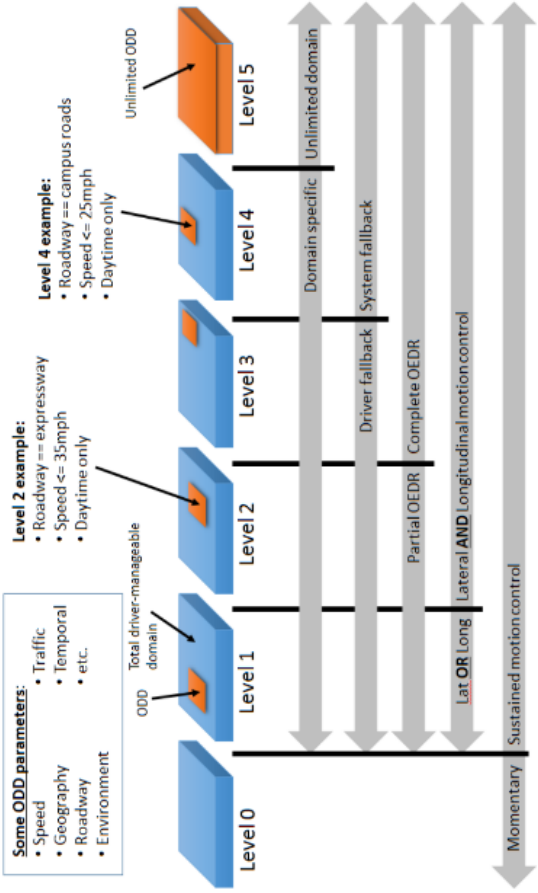


Abbildung 2.34: Einteilung von Fahrzeugautomatisierungen nach SAE J3016 (SAE, 2016) (ODD – Operational Design Domain; OEDR – Object and event detection, recognition, classification, and response)

Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Levels und Zuordnung der Fahraufgabe ist in Abbildung 2.35 dargestellt. Die SAE teilt die Funktionen in 5 Levels auf, wobei 1 das Niedrigste, 5 das Höchste ist. Eine wichtige Trennlinie

Verläuft hierbei zwischen Level 2 und Level 3. Sie markiert die vollständige Übertragung der Verantwortung vom menschlichen Fahrenden auf das Fahrzeug, welches ab Level 3 ohne menschliche Unterstützung die Fahraufgabe übernimmt.

Level	Name	Dynamic Driving Task	Dynamic Driving Task fallback	Operational Design Domain
0	No Driving Automation	Driver	Driver	n/a
1	Driver Assistance	Driver and System	Driver	Limited
2	Partial Driving Automation	**System**	Driver	Limited
Automated Driving System performs the entire DDT (while engaged)		**System**	System	Limited
3	Conditional Driving Automation			
4	High Driving Automation	System	**System**	Limited
5	Full Driving Automation	System	System	**Unlimited**

Abbildung 2.35: Einteilung von Fahrzeugautomatisierungen nach SAE J3016 (SAE, 2016)

Bereits in Kapitel 2.1.4 wurde die Funktionsweise eines adaptiven Abstandsregeltempomaten detailliert aufgezeigt. Im Folgenden werden weitere Assistenten vorgestellt werden, welche zunehmend in PKW zur Verfügung stehen und die Längs- sowie Querführung erleichtern oder gar übernehmen können. Diese Systeme erreichen bis jetzt höchstens eine Automatisierung nach Level 2, also eine teilweise Automatisierung, bei der nach wie vor die Verantwortung beim Fahrenden liegt (SAE, 2016).

a. Park-Assistent

Assistenzsysteme zur Unterstützung beim Parkieren basieren in aller Regel auf den zuvor vorgestellten Ultraschallsensoren (Winner et al., 2015) (Tesla nutzt dazu vermehrt einen Kamera basierten Ansatz (Tesla Inc., 2025b)). Diese Systeme informieren durch akustische Signale oder eine grafische Anzeige über den noch verbleibenden Restabstand zu umgebenden Objekten. Ultraschallbasierte Sensoren konnten sich gegenüber Radarsystemen aufgrund eines deutlich günstigeren Preises sowie einer einfacheren technischen Lösung zur Messung kurzer Abstände beim Parkierendurchsetzen. Neben dem gestiegenen Komfort profitiert auch die Verkehrssicherheit, da die Anzahl von Unfällen und Parkschäden

verringert wird (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2019). Zu diesem Zweck sind mittlerweile nicht nur abstandshinweisende Systeme im Markt etabliert, sondern es werden auch Parkautomatiken angeboten. Diese ermöglichen ein vollautomatisches Einparken parallel sowie quer zur Fahrspur (Volkswagen AG, 2007).

b. Verkehrszeichenerkennung TSA (Traffic Sign Recognition)

Zu hohe Geschwindigkeiten tragen nach wie vor maßgeblich zur Zahl der Verkehrstoten bei (Destatis, 2020). Aus diesem Grund wird durch immer mehr Assistenzsysteme auf eine angemessene Fahrgeschwindigkeit hingewirkt. Ein Beitrag dazu ist die Anzeige sowie Einhaltung von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten durch eine Verkehrszeichenerkennung. Diese greift auf zwei Informationsquellen zurück: Von der Fahrzeugkamera werden Hinweisschilder als Bildmaterial geliefert und daraufhin ausgewertet. Zusätzlich sind aus den Kartendaten des Navigationssystems Geschwindigkeitsbegrenzungen bekannt. Die so verwendbaren Informationen werden sowohl im Kombiinstrument angezeigt, als auch für die Sollgeschwindigkeit des ACC-Systems genutzt. Hierdurch wird nicht nur der Komfort bei der Fahrzeugführung erhöht, sondern auch die Verkehrssicherheit nachhaltig gesteigert. (Winner et al., 2015)

c. Notbremsassistent - AEB (Autonomous Emergency Braking)

Im Gegensatz zu anderen längsregelnden Assistenzsystemen, wie etwa dem ACC-System, greift der Notbremsassistent in kritischen Momenten selbstständig ein, ohne dass dieser in der Situation manuell eingeschaltet werden muss. Das System arbeitet immer unbemerkt im Hintergrund und tritt erst bei einer vom Fahrzeug als kritisch eingeschätzten Situation in Erscheinung. Dabei leitet das System automatisch eine geeignete Verzögerung des Fahrzeugs ein. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein dichtes Auffahren auf ein Hindernis droht, oder eine Kollision unausweichlich ist. Die Funktionsweise und das Testprozedere werden unter anderem in den Normen ISO 15623 oder ISO 19206 beschrieben. Üblicherweise wird für den Notbremsassistenten der Bereich vor dem Fahrzeug durch den Radarsensor, eine Kamera oder einen LIDAR-Sensor erfasst (Pilkington, 2023). Für das System gibt es zwei besondere Herausforderungen. Einerseits müssen die kritischen Situationen zuverlässig erkannt werden, sodass Falschauslösungen mit fatalen Folgen ausgeschlossen sind. Andererseits muss die Datenverarbeitung so schnell erfolgen, dass rechtzeitig geeignete Maßnahmen eingeleitet werden und so der Unfall möglichst verhindert, bzw. die Unfallschwere größtmöglich verringert wird.

d. Spurhalteassistent LKA (Lane Keep Assistant)

Der Spurhalteassistent greift in die Querführung des Fahrzeugs ein und hält dieses selbstständig in der Fahrspur. Somit kann dieses System bei längerer, monotoner Fahrt erheblich entlasten. Aus dem Bildmaterial der vorausschauenden Kamera wird dazu die Fahrzeugposition relativ zur Spurbegrenzung ermittelt. Nähert man sich diesen zu stark an, wird über die elektronische Lenkunterstützung ein korrigierender Lenkeingriff ausgelöst. In Kombination mit einem ACC-System kann somit gerade bei Autobahnstrecken die Fahrzeugführung durch die Automatiken helfen. Die Weiterentwicklung dieses Systems stellt der Spurwechsel-Assistent dar. Dieser führt beispielsweise auf Autobahnen bei Bedarf auch automatisch ein Überholmanöver mit entsprechendem Spurwechsel durch. (Winner et al., 2015)

e. Totwinkelassistent BSD (Blind Spot Detection)

Die vorgeschriebenen Spiegel im Fahrzeug decken nicht alle Bereiche des Umfelds vollständig ab. Gerade seitlich hinter dem Fahrzeug entsteht ein uneinsehbarer Bereich, welcher gerade beim Spurwechsel auf mehrspurigen Straßen eine Unfallgefahr darstellt. Dieser Totwinkel (im Englischen Blind Spot genannt) wird von dem Totwinkelassistent adressiert und durch ihn auf Objekte in diesem Bereich hingewiesen. Zu diesem Zweck überwachen Radare unter der Heckstoßstange an den Ecken des Fahrzeugs die Bereiche, welche durch die Außenspiegel nicht vollständig eingesehen werden können. Alternativ kann diese Überwachung auch durch entsprechend ausgerichtete Kameras erfolgen. Befindet sich ein anderer Verkehrsteilnehmer in diesem Bereich wird eine Anzeige im Außenspiegel aktiviert und so auf die mögliche Gefahr hingewiesen. Wenn trotzdem der Blinker aktiviert und der Spurwechsel begonnen wird, greift das System durch einen Lenkeingriff der elektronischen Lenkkraftunterstützung aktiv in das Geschehen ein und verschärft somit die Warnkaskade weiter. (Winner et al., 2024)

Verwand mit diesem System ist der so genannte Tür-Öffnungswarner (door-opening-warning). Er greift auf dieselben Sensoren zu und warnt im Stand davor die Tür zu öffnen, falls ein Fahrrad oder andere Verkehrsteilnehmer sich der Tür nähern.

f. Fernlichtassistent und Matrix-LED-Scheinwerfer

Die Fahrt bei Nacht stellt besondere Anforderungen an die Fahrzeugführung. Sowohl die Fahrspur, als auch Objekte im Umfeld müssen ausreichend ausgeleuchtet werden, damit diese rechtzeitig erkannt und darauf entsprechend

reagiert werden kann. Der Fernlichtassistent hat sich über die letzten Jahre bis zum Matrix-LED-Scheinwerfer weiterentwickelt. Dieser nimmt über die Fahrzeugkamera und den Umgebungslichtsensor die Lichtbedingungen im Umfeld wahr. Basierend darauf werden die Scheinwerfer so angesteuert, dass diese passend zur Situation bei Fahrt inner- oder außerorts bzw. bei entgegenkommendem Verkehr den Bereich vor dem Fahrzeug bestmöglich ausleuchten und den Gegenverkehr aussparen, um eine Blendung zu vermeiden.

Die zuvor vorgestellten Fahrerassistenzsysteme zeigen, dass die Fahrzeugführung zum Beispiel bei der Längsführung oder in Notsituationen durch eingreifende und hinweisende Assistenzfunktionen immer mehr unterstützt wird. Andererseits nimmt jedoch auch der Aufwand bei der Entwicklung durch die zunehmende Komplexität erheblich zu. Um diesen Mehraufwand effizienter lösen zu können muss der Verifikations- und Validierungsprozess genauer betrachtet werden. Dieser ist in der Entwicklung von zentraler Bedeutung und steht mit der zunehmenden Digitalisierung vor neuen Herausforderungen.

2.2. Validierung im Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess lässt sich mit Hilfe von Produktentstehungsmodellen beschreiben. Diese unterteilen den Entwicklungsprozess in unterschiedliche Phasen, welche zur Entwicklung sowie Fertigung von neuen Produkten durchlaufen werden. Im automobilindustriellen Umfeld hat sich hierzu das V-Modell nach VDI 2206 mit dessen linken Schenkel zum Systementwurf und dem rechten Schenkel zur System- bzw. Funktionsintegration- und Kontrolle etabliert. Dabei hilft die Verbreitung des Modells in den Abläufen vieler wichtiger Entwicklungsdomänen. Mitwirkende aus der Softwareentwicklung, der Elektrotechnik und dem Maschinenbau vollziehen dabei ähnliche Abläufe und teilen Dadurch ein gemeinsames Verständnis über den Entwicklungsprozess. Abbildung 2.36 zeigt das konventionelle V-Modell (links) und dessen weiterentwickelte Form (rechts) nach VDI 2206. Hierdurch wird dem iterativen Charakter der Entwicklung von innen nach außen Sorge getragen.

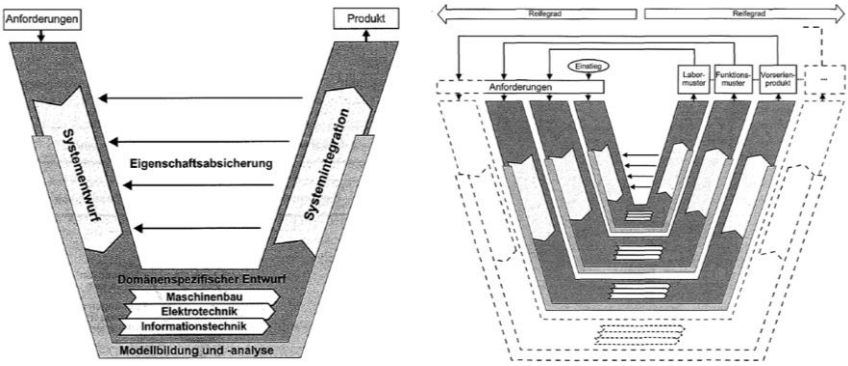


Abbildung 2.36: V-Modell nach VDI 2206 (links) und dessen Weiterentwicklung (rechts)

2.2.1. Verifikation und Validierung als Bestandteil des IPEM

Diese Arbeit stellt einen Beitrag zur Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) dar und widmet sich Aspekten der Validierung von Fahrerassistenzfunktionen unter anderem am Fahrzeug-Rollenprüfstand in Verbindung mit Sensorstimulatoren. Die Validierung nimmt nach Albers bei der Produktentwicklung eine zentrale Rolle ein (Albers, 2010). Hierbei stellt die Validierung im Entwicklungsprozess einen Abgleich zwischen dem erreichten Entwicklungsstand vor dem Hintergrund der Ziele und dem Zwecken des Produktes dar. Das dabei gewonnene Wissen hat maßgeblichen Einfluss auf die nächsten

Entwicklungsschritte und steuert damit auch den kompletten Produktentstehungsprozess. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf den Produktentwicklungsprozess allgemein, und auf die Verortung der Verifikation und Validierung in ihm genauer eingegangen.

IPeM (Integriertes Produktentstehungsmodell)

Das Modell der Integrierten Produktentstehung (IPeM) stellt ein Meta-Modell zur Modellierung von Produktentstehungsprozessen dar. Diese sind nach Albers immer einmalig und einzigartig, sodass das Phasenmodell bei jedem Entwicklungsprozess variiert (Albers & Meboldt, 2007). Dazu greift es die drei Teilmodelle „Zielsystem“ (system of objectives), „Handlungssystem“ (operation system) und „Objektsystem“ (system of objects) auf und ergänzt das Handlungssystem um die Aktivitäten der Produktentstehung (activities of product engineering), die Aktivitäten der Problemlösung (activities of problem solving), ein Ressourcensystem (system of ressources) sowie das Phasenmodell (phase model) (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016). Das so aufgestellte Modell ist in Abbildung 2.37 zu sehen.

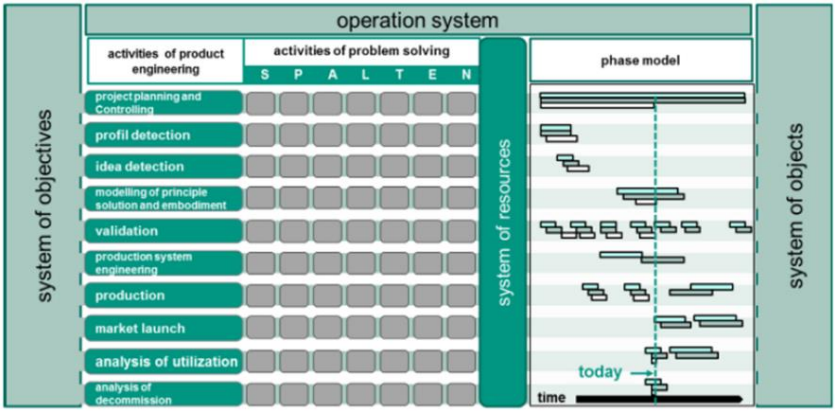


Abbildung 2.37: Das integrierte Produktentstehungsmodell (Albers, Reiß et al., 2016)

Die Aktivitäten der Produktentstehung sind konkrete Vorgänge, welche einerseits wiederkehrend über die Entwicklungsarbeit hinweg vollzogen werden, wozu beispielsweise „Projekte managen“ oder „Validierungen und Verifizieren“ gehört. Andererseits werden Aktivitäten, wie „Produzieren“ erst ab einem konkreten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess durchgeführt. Dieser zeitliche Zusammenhang wird im Phasenmodell abgebildet (Albers, Reiß et al., 2016).

Die Produktentwicklung befasst sich immerwährend mit der Lösung von Problemen. Aus diesem Grund beinhaltet das lPeM Aktivitäten der Problemlösung, welche sich aus den sieben Schritten des SPALTEN Problemlösungsprozesses zusammensetzt. Hierbei wird beginnend mit der **S**ituationsanalyse und **P**roblemeingrenzung das Umfeld sowie der kritische Teil einer Problemsituation abgeklärt und eingegrenzt. Anschließend wird mit der Suche nach **a**lternativen Lösungen begonnen und eine passende **L**ösung ausgewählt. Um die Folgen einer Lösung abschätzen zu können, erfolgt eine **T**ragweitenanalyse. Basierend auf dieser Abschätzung fällt die **E**ntscheidung für eine Lösung, sodass diese im Anschluss umgesetzt werden kann. Der Prozess endet mit der **N**achbereitung und dem Lernen, sodass zukünftig ähnliche Problemsituation vermieden oder effizienter gelöst werde können.

Der Abgleich zwischen „Ist“ und „Soll“ am in der Entwicklung befindlichen Produkt stellt eine zentrale Aktivität dar, welche das Wissen über das Produkt erhöht (Albers, Behrendt et al., 2016). Das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehen stellt einen Beitrag für die Validierung im Entstehungsprozess automatisierter Fahrfunktionen dar, weshalb im Folgenden die Rolle der Validierung im Produktentstehungsprozess näher betrachtet wird.

Validierung im Produktentstehungsprozess

Zuvor wurde grundlegend die Validierung eingeführt. Das Produkt wird im Design-Schritt weiterentwickelt und bei der Validierung überprüft, ob es mit diesen Änderungen dem Zielsystem entspricht. Dabei wird der Ist-Stand durch Stakeholder bewertet und dessen Erwartungen objektiv wiedergegeben. Je früher dabei eine Abweichung und damit ein potentielles Problem identifiziert wird, desto einfacher und damit auch kostengünstiger lässt es sich korrigieren. Hierdurch wird die besondere Bedeutung der Validierung auf die Entwicklungskosten verdeutlicht (siehe dazu „Rule of Ten“ (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017)). Diese Auswirkung treibt den Trend des Frontloadings voran, bei dem möglichst früh im Entwicklungsprozess Aussagen über spätere Produkteigenschaften ermöglicht und Wissenslücken geschlossen werden. Allerdings sind aufgrund von Vereinfachungen und Annahmen in der Modellbildung die damit gewonnen Erkenntnisse Unsicherheiten und Risiken unterworfen. Hierbei kann die Validierung mit gemischt virtuell-physischen Umgebungen die Aussagekraft erhöhen. Eine so erfolgte Validierung hat den Vorteil, dass eine hohe Reproduzierbarkeit mit virtuellen Komponenten, etwa für Umgebungseinflüsse, das Untersuchen von kritischen Zuständen erleichtert. Zusätzlich weisen physische Komponenten, etwa prototypische Bestandteile des Produkts, weitestgehend dieselben Eigenschaften wie das finale Produkt auf, wodurch die Aussagekraft hinsichtlich des späteren

Verhaltens höher ist. Nach wirtschaftlichen Aspekten trägt die Validierung allerdings auch maßgeblich zu den Entwicklungskosten bei. Aus diesem Grund gilt beim Aufbau einer Validierungsumgebung prinzipiell der Grundsatz „So detailliert wie nötig, so einfach wie möglich“ (Albers, Behrendt et al., 2016). Die Gestaltung nach „so detailliert wie nötig“ bringt die Herausforderung mit sich, dass im Rahmen der Vereinfachung auch Effekte vernachlässigt werden könnten, welche jedoch relevante Auswirkungen, bis hin zu Problemen, mit sich gebracht hätten. Um hier das richtige Maß der Vereinfachung und damit auch das Entwicklungsrisiko überschaubar zu halten, gilt es möglichst kontinuierlich die Validierung mit dem Produkt weiterzuentwickeln.

2.2.2. Das IPEK-X-in-the-Loop-Framework

Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz ist in 20-jähriger Forschungsarbeit am Institut für Produktentwicklung des KIT rund um Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers entstanden (Albers, Burkhardt, Meboldt & Saak, 2005) (Albers, Geier, Behrendt & Ott, 2008) (Albers, Düser & Ott, 2008) (Albers, Behrendt, Matros, Holzer & Bohne, 2014) (Albers, Reiß et al., 2016). Er greift die bisher etablierten Ansätze wie SiL (Software-in-the-Loop) oder HiL (Hardware-in-the-Loop) auf und kombiniert deren Vorteile miteinander (Düser & Albers, 2010). Zusätzlich wird er auf den Einsatz bei mechatronischen Systemen ausgerichtet. Eine Übersicht des Frameworks ist in Abbildung 2.38 zu sehen. Die für die Validierung essentielle Einbindung des zu testende System umfasst die Wechselwirkung mit dem übergeordneten Gesamtsystem, der Umwelt und weiteren zu berücksichtigenden Systemen. Die Betrachtung erfolgt dabei auf unterschiedlichen Detaillierungs-Layern, beginnend mit der Wirkfläche unten, bis hin zum Gesamtsystem (Fahrzeug) auf oberster Ebene Hierdurch werden die Wechselwirkungen mit den „Connected Systems“ System-Modell „Fahrer“, „Umwelt“ und dem „Rest-Fahrzeug“ aufgezeigt. Somit stellt das Fahrzeug das sogenannte „System-in-Development“ (SiD) dar. Die beteiligten Systeme durchlaufen im Zuge der Validierung relevante Fahrmanöver und Testfälle (Albers, Behrendt et al., 2016). Im Gegensatz zum SiD stellen Aufbauten, welche für den Test am SiD entwickelt und getestet werden müssen, das „System-under-Investigation“ (SuI) dar. Eine Einschränkung auf ausschließlich virtuelle Teilsysteme, wie beim SiL oder HiL wird erfolgt nicht. Stattdessen können einzelne Systembestandteile physisch, virtuell oder gemischt physisch-virtuell vorliegen und durch entsprechende Kopplungen (Sensoren/Aktoren) eingebunden werden.

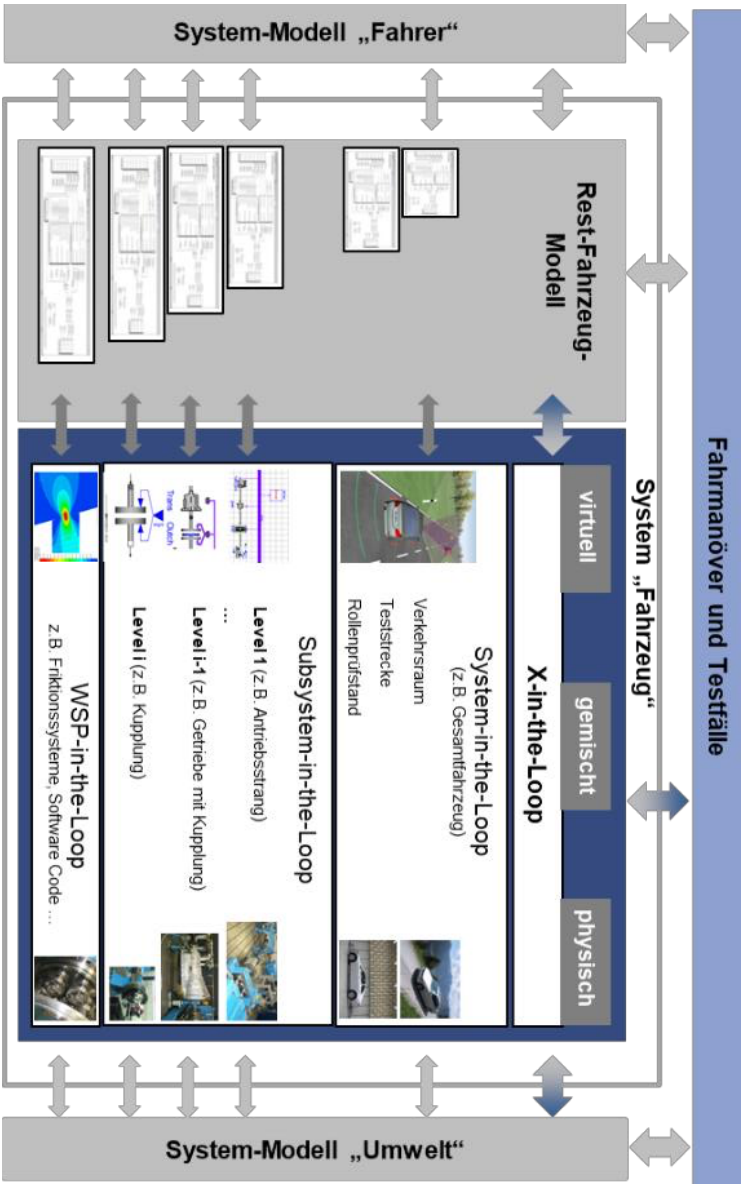


Abbildung 2.38: IPEK-X-in-the-Loop-Framework (Albers, Behrendt et al., 2016)

Abbildung 2.39 zeigt einen Ablauf zur Entwicklung von Validierungssystemen. Zu Beginn wird aus dem Bedarf ein Validierungsziel abgeleitet. Dieses besteht aus Hypothesen, welche im Rahmen der Validierung bestätigt oder widerlegt werden. Damit dies anhand objektiv messbarer Größen nachvollzogen werden kann, werden Kriterien aufgestellt, anhand derer die Interpretation des Tests erfolgt. Schlussendlich wird eine Aussage in Beziehung zum ursprünglich formulierten Validierungsziel getroffen.

Der hier aufgezeigte Weg für die Durchführung von Validierungsaktivitäten wird im späteren Verlauf dieser Arbeit für den Entwurf des Vorgehens in Kapitel 5.1 wieder aufgegriffen.

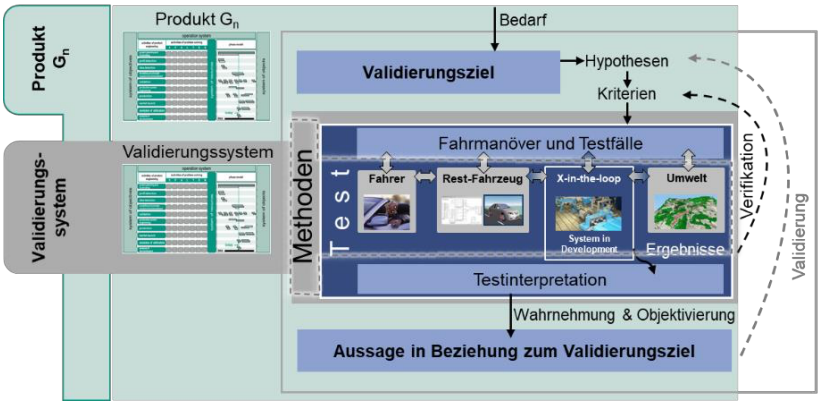


Abbildung 2.39: Validierung und Verifikation im Produktentstehungsprozess nach Mandel et al. (Mandel et al., 2020)

Für die Entwicklung von Teilsystemen eines Fahrzeugs, z.B. dem Triebstrang, sind Tests mit gezielt hierfür geschaffenen Prüfumgebungen etabliert. Auf Gesamtfahrzeugebene wird bereits seit 1924 mit Rollenprüfständen (Hofmann & Johnson, 1924) gearbeitet. Damals wurde die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugs überprüft. Heutzutage sind für die Fahrzeugentwicklung Rollenprüfstande essentieller Bestandteil (Paulweber & Lebert, 2014). Sie werden beispielsweise zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten hinsichtlich Komfort im Innenraum (Fischer, 2018), (Albers, Fischer, Klingler & Behrendt, 2014) und Außenbereich (Landes, 2022), (Albers et al., 2015) oder zur Untersuchung von Schwingungsphänomenen (Schille, 2019), (Albers et al., 2017) eingesetzt. Diese Testumgebung wird als „Vehicle-in-the-loop“ Umgebungen bezeichnet und bringt ein ganzheitliches Systemverständnis in die Entwicklung, um damit komplexe

Zusammenhänge untersuchen und Verbesserungen für Kunde und Umwelt umsetzen zu können.

Solche Entwicklungsumgebungen helfen auch dabei Antriebstopologien und Leistungsflüsse in mobilen Arbeitsmaschinen reproduzierbar untersuchen zu können. Hierbei erhöhen Antriebe für Werkzeuge oder andere Anbauten die Komplexität im Lastprofil der Triebstrangkomponenten. Siehe hierzu den Ansatz MOBiL des Instituts für Mobile Arbeitsmaschinen am KIT (Pohlandt, Brinkschulte & Geimer, 2016).

Nachdem die Validierung im Entwicklungsprozess allgemein vorgestellt wurde, wird im Folgenden ein detaillierter Einblick in die aktuellen Möglichkeiten und Methoden der Validierung von automatisierten Fahrfunktionen gegeben.

2.3. Wie erfolgt Validierung von Fahrerassistenzsystemen heute?

In den folgenden Unterkapiteln werden die grundsätzlichen Leitgedanken für die Entwicklung von Testabläufen und Validierungsumgebungen sowie Richtlinien für die Unterstützung bei der Entwicklung von Testabläufen mittels allgemein gültiger Hinweise geben. Hierbei können Normen Vorgaben für die Entwicklung von neuen Testabläufen und Umgebungen aufstellen. Darauf aufbauend werden gängige Ansätze zur Validierung von Fahrzeugautomatisierungen vorgestellt, womit der Beitrag dieser Arbeit besser nachvollzogen werden kann. Vor diesem Hintergrund sollen im Anschluss die Probleme bei der Entwicklung von Automatisierungen aufgezeigt werden, sodass über die restliche Arbeit hinweg ein Verständnis für die zu lösenden Herausforderungen besteht. Abschließend wird durch Anwendung des IPEK-XiL-Ansatzes aufgezeigt, wie die Lücken zwischen den etablierten Validierungsumgebungen verringert und damit Potentiale bei der zukünftigen Entwicklungsarbeit gehoben werden können.

Die Validierung von Fahrerassistenzfunktionen ist geprägt von der Reaktion des Fahrzeugsystems auf Umwelteindrücke. Dazu zählen beispielsweise Szenarien mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Verkehrsinfrastruktur. Je nach Entwicklungsstand liegt neben der in Entwicklung befindlichen Automatisierung auch ein unterschiedlich weit entwickeltes Restfahrzeug vor. Aus diesem Grund werden die Umwelteindrücke auf unterschiedlichen Wegen dem zu entwickelnden System zugeführt. Etabliert sind Lösungen zur rein virtuellen Funktionsentwicklung mit Simulationsumgebungen. Im Herbst 2018 gab beispielsweise Waymo (Googles Tochterfirma für automatisiertes Fahren) an, insgesamt sieben Milliarden Testkilometer im Simulator und 16 Millionen auf öffentlichen Straßen zurückgelegt zu haben (Fluhr, 2018). Neben dem umfangreichen Testen in der virtuellen Umwelt findet heutzutage ein Großteil der Entwicklungsarbeit auf Testgeländen und dort mit physischen Hindernissen und Testobjekten statt (Winner et al., 2015). Abbildung 2.40 zeigt links ein solches Hindernis für PKW-Auffahrmanöver und rechts für Fußgänger. Diese wurden von der National Highway Traffic Safety Administraion, einer Abteilung des US-Verkehrsministeriums (DOT – US Department of Transportation) entwickelt und standardisiert. Es ist der Heckpartie eines PKW nachempfunden und übersteht im Falle eines Systemfehlers dank elastischer Materialien eine Kollision weitestgehend unbeschadet.





Abbildung 2.40: Test in physischer Umgebung, Vorgaben durch NHTSA (Forkenbrock & Snyder, 2015) & (Albrecht, Gerdus, Snyder & Sun, 2022)

Soll nicht das Verhalten im Gesamtfahrzeug, sondern nur die Reaktion eines einzelnen Teil-Systems getestet werden, kommen HiL-Umgebungen (Hardware-in-the-Loop) zum Einsatz. In dieser wird ein meist physisch vorliegender Funktionsprototyp, beispielsweise ein Steuergerät, in eine simulierte Umwelt eingebunden. Eine solche Konfiguration ist in Abbildung 2.41 dargestellt. Detaillierter wird auf die Unterschiede von SiL- und HiL-Umgebungen in Kapitel 2.3.3 eingegangen.

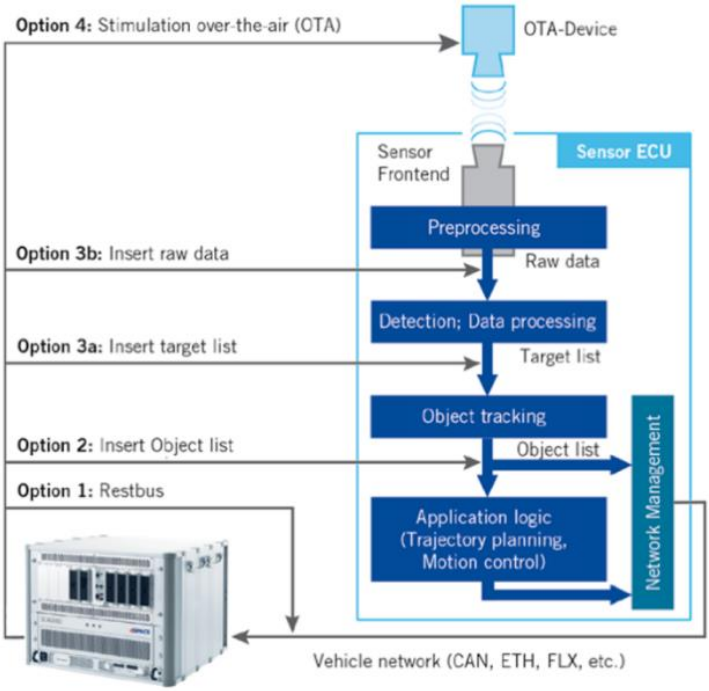


Abbildung 2.41: Optionen beim Aufbau einer HiL-Umgebung (Sievers, Graf, Peperhowe & Seiger, 2018)

In dem Beispiel aus Abbildung 2.41 wird ein Umweltsensor mit integriertem Steuergerät (Sensor ECU) näher betrachtet und Optionen aufgezeigt, wie Umwelteindrücke an unterschiedlichen Stellen der Informationsverarbeitung eingespeist werden können. Um die gesamte Informationsaufnahme und Verarbeitung für Vaildierungszwecke einzubinden, wird in Option 4 der Sensor durch ein „OTA-Device“ (Over-the-Air-Device) mit Umwelteindrücken stimuliert. Die Eigenschaften des Sensors, etwa Abtastrate oder Erfassungsauflösung, werden in Option 3b simulativ erzeugt und damit aufgezeichnete oder virtuell generierte Sensor-Rohdaten in das System eingespeist. Option 3a klammert die Datenauswertung weitestgehend aus, sodass Target-Listen von umgebenden Verkehrsteilnehmern übermittelt werden. Soll hingegen nur die Manöver-Logik getestet werden, werden, wie in Option 2, direkt Objekt-Listen dem Steuergerät zur Verfügung gestellt. Schlussendlich wird in Option 1 der gesamte Sensor ersetzt und die Auswirkungen auf den Restbus simulativ abgebildet. Im Gegensatz zu den hier

vorgestellten Optionen 1 bis 4, binden Umgebungen basierend auf dem IPEK XiL nicht nur Sensoren und deren Steuergeräte, sondern mitunter auch das Gesamtfahrzeug mit dem Hauptleistungsfluss zum Antrieb in die Validierung mit ein.

Die Entwicklungsarbeit wird von einer Vielzahl von Standardisierungsvorhaben begleitet. Eine Übersicht dazu ist im Anhang. Diese ordnet der Funktionsbeschreibung aller gängigen Automatisierungsfunktionen die vorgesehene ISO-Nr. und den dafür vorgesehenen Zeitraum zur Erarbeitung zu. Aktuell werden die Routinen und genauen Abläufe zum Testen neuer Fahrzeugautomatisierungen von öffentlichen Institutionen zur Abnahme der Systeme entwickelt und mit OEMs diskutiert.

2.3.1. Leitgedanken für die Entwicklung von Testabläufen und Validierungsumgebungen

Die Arbeit an Systemen zur Fahrzeugautomatisierung beginnt schon vor mehr als 30 Jahren (Winner et al., 2015). Mitte der Neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurde das heute serienmäßige ESP (Elektronisches Stabilitäts Programm) entwickelt. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, sind parallel zum System auch immer Abläufe zum Testen und Validieren zu entwickeln.

Grundsätzlich werden Validierungsumgebungen als Closed-Loop- sowie Open-Loop-Umgebungen unterteilt (Albers, Behrendt et al., 2016). Erstere binden das zu entwickelnde System mit einer Informationsrückführung in die Umgebung ein, sodass das System nicht nur auf die Umwelt reagiert, sondern durch sein Verhalten Einfluss auf dieses hat und so in Wechselwirkung mit der Umgebung steht. Diese Abhängigkeit setzt die Echtzeitfähigkeit der Umgebung voraus, damit die gegenseitige Beeinflussung zwischen Umgebung und dem zu testenden System realitätstreu abläuft. Im Gegensatz dazu besteht bei Open-Loop-Umgebungen diese Rückführung nicht. Somit reagiert das zu entwickelnde System zwar auf seine Umwelt, daraus abgeleitete Handlungen beeinflussen diese allerdings nicht. Hierdurch können Umwelteindrücke beispielsweise als Aufzeichnung auf das zu entwickelnde System einwirken und beobachtet werden, ob eine gewünschte Reaktion einsetzt. Die Folgen dieser Reaktion können allerdings nicht weiter untersucht werden.

Um die Entwickelnden bei der Arbeit an zukünftigen Fahrzeugautomatisierungen zu unterstützen, hat das Department of Transportation 2018 die Norm DOT HS 812 623 „A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios“ veröffentlicht. Dabei wird ein Rahmenwerk für Testfälle und Szenarien im Umgang mit automatisierten Fahrfunktionen vorgestellt. Grundlegend wird dabei zwischen Blackbox- und Whitebox-Tests unterschieden (Thorn et al., 2018):

Blackbox-Tests überprüfen die Funktionserfüllung eines in der Entwicklung befindlichen Systems. Dabei sind der genaue Aufbau und die genauen Umsetzungen im Inneren der Blackbox prinzipiell unbekannt oder können vom Entwickler zumindest nicht näher nachvollzogen werden. Hierdurch kann die grundsätzliche Funktionserfüllung überprüft werden, beispielsweise, wenn es darum geht, ob auf ein Hindernis sicher und zuverlässig reagiert wird.

Dem gegenüber werden beim Whitebox-Testen gezielt Details der Gestaltung und Zusammenhänge innerhalb der Struktur des zu entwickelnden Systems überprüft. Ziel einer solchen Untersuchung kann beispielsweise die Ermittlung der Erfassungsreichweite des neuen Systems oder die passende Klassifizierung von Hindernissen durch die korrekte Größenabschätzung sein. Auch die Vermessung der Reaktionsgeschwindigkeit des Teilsystems unter Berücksichtigung der genauen Targetposition sind Fragestellungen von Whitebox-Tests.

Die Testpyramide in Abbildung 2.42 veranschaulicht die Einteilung von Whitebox- und Blackbox-Tests für Softwaretests mit den unterschiedlichen Test-Ebenen. Diese besteht aus dem Modultest, welcher das Fundament für die darauf aufbauenden Stufen der Integration darstellt. So werden aus den Modulen Komponenten und darüber Integrationstests durchgeführt. Die Spitze bilden Systemtests, in denen das Gesamtsystem unter Berücksichtigung aller gegenseitigen Wechselwirkungen getestet wird.

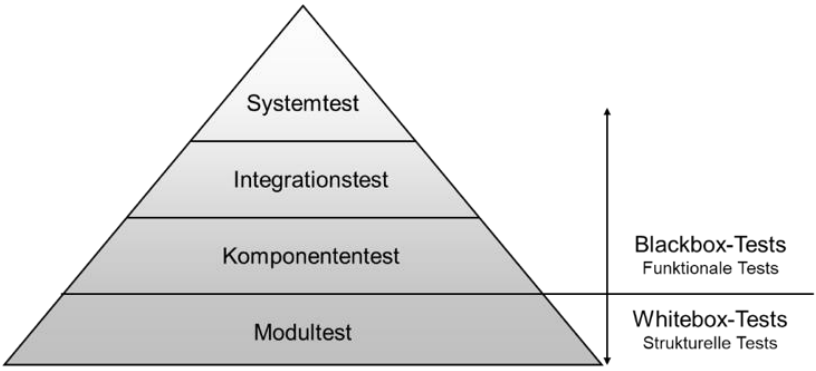


Abbildung 2.42: Testpyramide für Software-Testing nach Wittle (2019)

Neben der grundsätzlichen Aufteilung von Softwaretests werden auch Schritte zum Aufstellen von Testabläufen aufgezeigt. Die Norm DOT HS 812 623 gibt Orientierung, um wichtige Punkte für das Testing im Vorfeld zu klären:

- Gegenstand und Grund des Tests (Test subject and purpose)
- Ressourcen wie zuständiges Personal, Gebäude oder Testgelände und Testequipment (Test personnel, facilities, and equipment)
- Testszenarien (Test scenario) mit:
    - Eingabegrößen (Inputs)
    - Ausgangslage des Tests (Initial conditions)
    - Anweisungen zur Durchführung der Untersuchungen (Execution)
    - Informationen darüber welche Daten erhoben und wie diese gespeichert werden (Data measurement and metrics)

Anhand dieser Punkte werden essentielle Eckdaten festgehalten, welche am besten standardisiert abgefragt und dokumentiert werden. Somit ist für nachfolgende Untersuchungen nachvollziehbar, was bereits getestet wurde und welche Stände oder Kombinationen noch ungeprüft sind. Neben den so festgehaltenen Randbedingungen werden auch Richtlinien aufgestellt, denen das Test-Design bestmöglich folgen soll (Thorn et al., 2018). Ein Einblick wird im folgenden Unterkapitel gegeben.

2.3.2. Richtlinien für die Unterstützung bei der Entwicklung von Testabläufen

Zusätzlich zu den Grundsätzen, auf denen das Testdesign aufbauen soll, werden in der Norm DOT HS 812 623 auch Hilfestellungen gegeben, welche die Entwicklung von Testabläufen unterstützen können. Dabei werden gängige Probleme in der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen adressiert. Nachfolgend wird der Inhalt der Hilfsstellung und deren Motivation vorgestellt:

a) Größen, welche die Validierung beeinflussen, sollen möglichst getrennt voneinander einstellbar sein und keine gegenseitigen Abhängigkeiten aufweisen. Das dazu notwendige Wissen muss durch vorangegangene Untersuchungen erhoben werden. Für das Herausarbeiten von spezifischem Systemverhalten an Grenzen der Funktionserfüllung kann hierdurch die Nachvollziehbarkeit gewahrt werden.
b) Die Umwelt, in der die Untersuchung durchgeführt werden, sollte genau beschrieben und charakterisiert oder so weit wie möglich kontrolliert werden, um eine möglichst gute Wiederholbarkeit zu gewährleisten. Gerade bei

Untersuchungen im Freien zeigen Wettereinflüsse, wie der Sonnenstand, der Validierung bei systematischen Untersuchungen Grenzen auf.

c) Testgrößen sollen über die vermeintlich interessanten Grenzen hinaus untersucht werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass Einflüsse nicht außer Acht gelassen werden, deren Auswirkungen zwar bis jetzt unbekannt sind, zu einem späteren Zeitpunkt jedoch relevant werden könnten. Dabei sind auch dynamische Effekte zu berücksichtigen, welche größere Sprünge in Messwerten verursachen können.
d) Untersuchungen sollen soweit möglich immer auf einer der untersten Integrationsebenen beginnen. So wird einerseits Wissen über zugrundeliegende Mechanismen gewonnen und andererseits können Zusammenhänge oder Wechselwirkungen aus der steigenden Systemintegration besser nachvollzogen werden. Auf diesem Weg können die Untersuchungen auf den unteren Integrationsebenen auch dabei helfen, Grenzwerte für Tests der höheren Integrations-Stufen zu ermitteln.
e) Bei der Aufstellung von Testgrößen und Umweltbedingungen ist von den ungünstigsten Bedingungen auszugehen, welche gerade noch zu erwarten sind. Auf diesem Weg werden in den Untersuchungen auch immer Grenzen mitberücksichtigt, die häufig besondere Herausforderungen für Automatisierungen darstellen.

2.3.3. Etablierte Ansätze zur Validierung von Fahrzeugautomatisierungen

Die Funktionsentwicklung wird geprägt durch drei Validierungsumgebungen (Els (Automotive iQ), 2017):

- virtuelle Modellbildung und Simulation bis hin zu Tests an Steuergeräten mit virtuellen Umgebungen
- Untersuchungen mit Prototypen auf abgetrennten Verkehrsflächen wie Versuchsstrecke und Testgelände
- Fahrten auf öffentlichen Straßen

Diese Umgebungen können als spezifische Ausprägungen des IPEK-X-in-the-Loop Ansatz (siehe dazu Kapitel 2.2.2) verstanden werden. Dabei verfolgt jede Umgebung ein eigenes Validierungsziel und bringt dazu entsprechende Aufbauten und Umgebungsbestandteile in virtuell-physisch-gemischter Ausprägung mit sich. Die grobe Dreiteilung von der vollständig virtuellen Validierungsumgebung bis zum Testen auf der Straße wird bei der Entwicklungsarbeit feingliedriger unterschieden. In diesem Zusammenhang beschreibt etwa das Whitepaper „Safety First for Automated Driving“ zusammenfassend sieben Abstufungen, was als Übersicht in Abbildung 2.43 zu sehen ist.

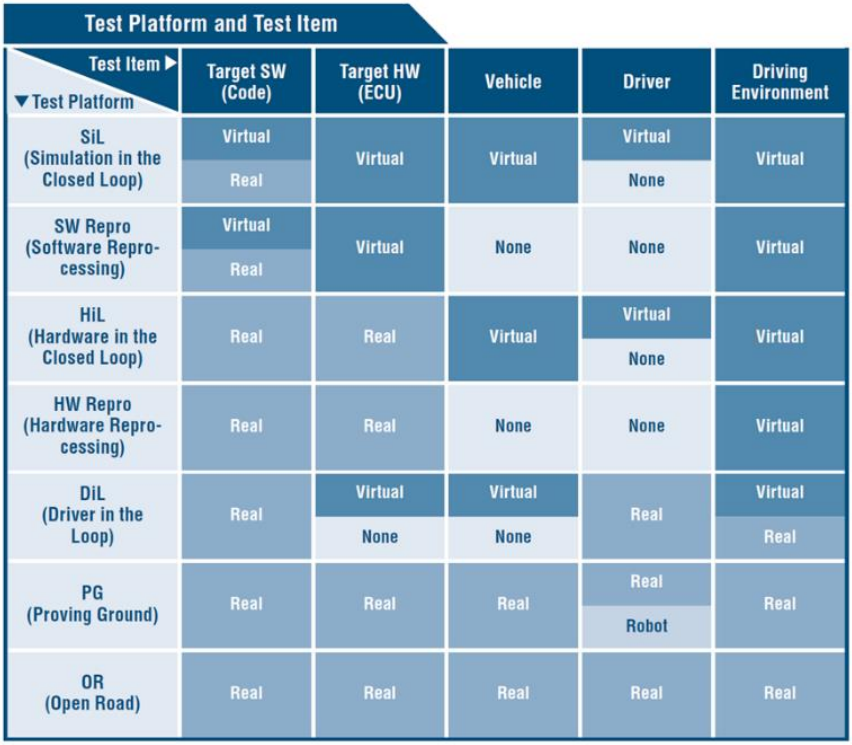


Abbildung 2.43: Testplattformen und Gegenstände zur Verifikation und Validierung von automatisierten Fahrfunktionen (Wood et al., 2019)

Im Folgenden werden die etablierten Ansätze in Reinfolge der Produktreife (vom abstraktem Model bis hin zum Prototypen auf der öffentlichen Straße) durch ihre „in-the-Loop"-Bezeichnung benannt, näher Charakterisiert und mit Aspekten aus Norm DOT HS 812 623 beschrieben:

MiL (Model-in-the-Loop)

Zu Beginn eines Entwicklungsprozesses werden schnelle Erkenntnisse über die prinzipielle Machbarkeit oder notwenige Randbedingungen neuer Funktionen benötigt. Mittels einer modellbasierter Kombination von Funktionsbausteinen kann dazu Wissen über Abhängigkeiten und Zusammenhänge gewonnen werden. Die Modell-Programmierungen aus dieser Phase können nicht unmittelbar für späteren

Programm-Code weiterverwendet werden. Jedoch dienen Funktionsdiagramme als hilfreicher Ausgangspunkt zur Ableitung der späteren Programmstruktur.

SiL (Software-in-the-Loop)

Nachdem die grundsätzliche Funktionalität durch Simulationen in Model-in-the-Loop Umgebungen nachgewiesen wurde, beginnt die Entwicklung von Programm-Code, welcher so auch für das spätere System verwendet werden kann. Um auch schon ohne die spätere Ziel-Hardware den Programmcode entwickeln und testen zu können, werden Simulationsumgebungen eingesetzt und so das Programmverhalten auf seine Funktionserfüllung hin überprüft. Hierbei bringen Simulationslösungen in Verbindung mit dem weiterverwendbaren Programmcode folgende Vorteile mit sich:

- Kontrollierbarkeit: bietet die meisten Möglichkeiten unterschiedliche Aspekte der Validierungsumgebung zu kontrollieren.
- Vorhersagbarkeit: läuft in dem Rahmen ab, den man programmiert hat. Hierdurch verbleiben weniger Einflussmöglichkeiten, welche unvorhergesehenes Verhalten verursachen.
- Wiederholbarkeit: ermöglicht die häufige Wiederholung bei Variation einzelner Randbedingungen. Hierbei führen gleiche Randbedingungen zu gleichen Ergebnissen.
- Skalierbarkeit: ermöglicht die Erstellung unzähliger Szenarien, welche über jeweils leichte Variation verfügen.
- Effizienz: besitzt ihre eigene zeitliche Umgebung. Hierdurch wird eine Beschleunigung des Testablaufs durch einen schnelleren Ablauf als in Echtzeit ermöglicht, sodass eine Vielzahl an Testdurchläufen in kurzer Zeit absolviert werden können.

Aussagen zur Laufzeit von Programmcode lassen sich in SiL Umgebungen nur schwer treffen. Da dies stark von der eingesetzten Hardware und zur Verfügung stehenden Ressourcen abhängt, muss der Programmcode auf Hardware ausgeführt werden, welche möglichst der späteren Zielhardware entspricht. Hierbei spricht man von HiL (Hardware-in-the-Loop) Tests. Die zuvor vorgestellten Vorteile lassen sich dabei jedoch nur teilweise erhalten.

HiL (Hardware-in-the-Loop)

HiL Umgebungen zeichnen sich durch die Verwendung des Programmcodes auf dem Steuergerät oder der Hardware aus, welche nah an der späteren Zielhardware liegt. Damit ist die Laufzeit repräsentativ für den späteren Einsatz im Gesamtfahrzeug und es lassen sich belastbare Aussagen über die benötigten

Ressourcen oder auftretende Latenzen treffen. Allerdings gestaltet sich der Aufbau erheblich aufwändiger gegenüber vollständig virtuell realisierten Umgebungen im SiL. Neben der hohen Reproduzierbarkeit stellt auch die gute Automatisierbarkeit, z.B. zur routinemäßigen Funktionsüberprüfung eines neuen Softwarestands, einen großen Vorteil dar. Abbildung 2.44 zeigt den Aufbau einer HiL-Umgebung für die Entwicklung eines Scheinwerfer-Steuergeräts. Dabei ist zu sehen, dass neben der virtuellen Umweltsimulation auch ein repräsentativer Prototyp eingebunden ist, auf dem der zu testende Code ausgeführt wird. Zusätzlich müssen die Schnittstellen zwischen Prototyp und Umweltsimulation durch Adapter übersetzt werden. Sowohl diese Technik, als auch der Prototyp, bringen zum Teil unbekannte Einflüsse in die Validierungsumgebung mit ein und können somit unvorhergesehene Probleme verursachen. Trotzdem sind Tests in HiL-Umgebungen unumgänglich, wenn Code in Verbindung mit Hardware weiterentwickelt und trotzdem in überschaubaren Umgebungen getestet werden soll.

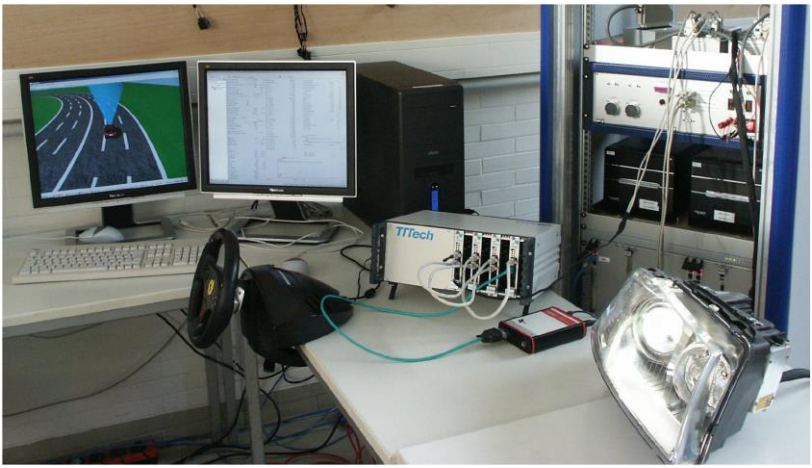


Abbildung 2.44: Aufbau einer HiL-Umgebung für einen Scheinwerfer mit integriertem Steuergerät und Simulationsumgebung sowie Hardware zur Schnittstellenkopplung (Tellmann, 2011)

Für Fahrerassistenzsysteme wird diese Art der Umgebung beispielsweise zum Testen von kamerabasierten Lösungen eingesetzt. Dazu wird die spätere Fahrzeugkamera vor einer Leinwand montiert und computergeneriertes Videomaterial von Verkehrsszenarien abgespielt. Ein solcher Aufbau ist in Abbildung 2.45 dargestellt.



Abbildung 2.45: HiL-Aufbau für die Validierung einer kamerabasierten Assistenzfunktion mit rechts dem Umweltbild auf der Leinwand (Baderschneider & Mertke, 2010)

Für die Entwicklungsarbeit an radarbasierten Systemen (1) sind ebenfalls HiL-Lösungen am Markt erhältlich. Ein solches System ist in Abbildung 2.46 dargestellt. Hierbei werden für jedes Target-Objekt eine eigene Einheit aus Radar-Empfänger sowie Sende-Antenne mechanisch auf einer Kreisbahn um den zu testenden Sensor verdreht (2). Die Anzahl an Empfangs/Sende-Antennen begrenzt die Anzahl maximal gleichzeitig abbildbarer Targets.

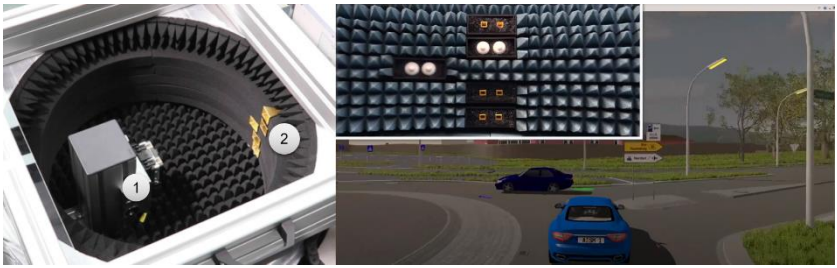


Abbildung 2.46: HiL-Aufbau für die Validierung eines Radarsensors von dSpace mit Radarsensor 1 und Radar-Empfänger sowie Sende-Array 2 (dSPACE, 2021) und rechts Einblick in das virtuelle Szenario und Blick auf das Array aus Sicht des Radarsensor (YouTube dSPACE Group, 2021)

ViL (Vehicle-in-the-Loop)

Beim ViL kommt erstmalig das vollständige Fahrzeug zum Einsatz, sodass das Zusammenspiel der Steuergeräte im Gesamtverbund untersucht werden kann. Werden Umgebungsbedingungen virtuell generiert, müssen die Fahrzeugschnittstellen mit der virtuellen Umweltsimulation verbunden werden. Zu diesem Zweck kann beispielsweise der Antriebsstrang über Rollen- oder Gesamtfahrzeugprüfstände eingebunden werden. Diese Prüfstände können neben der reinen Längsdynamik bei Bedarf je nach Bauart oder Erweiterung auch Lenkbewegungen ermöglichen. Die Sensorik zur Umwelterfassung wird zum Beispiel über physische Modelle in das Szenario eingebunden. Abbildung 2.47 zeigt oben den prinzipiellen Aufbau einer Validierungsumgebung für ein ACC-System der Universität Delft aus dem Jahr 2006 (Gietelink, Ploeg, Schutter & Verhaegen, 2006). Zu erkennen sind dabei die drei Hauptbestandteile der Testumgebung: Der Rollenprüfstand (1), ein vor dem Testfahrzeug bewegliches Target-Fahrzeug (2) und die Integration in eine virtuelle Umweltsimulation (3). Das Foto darunter zeigt den Aufbau in Betrieb. Aufgrund des großen Platzbedarfs muss die umgebende Halle entsprechend groß sein, sodass auch ACC relevante Abstände eingestellt werden können.

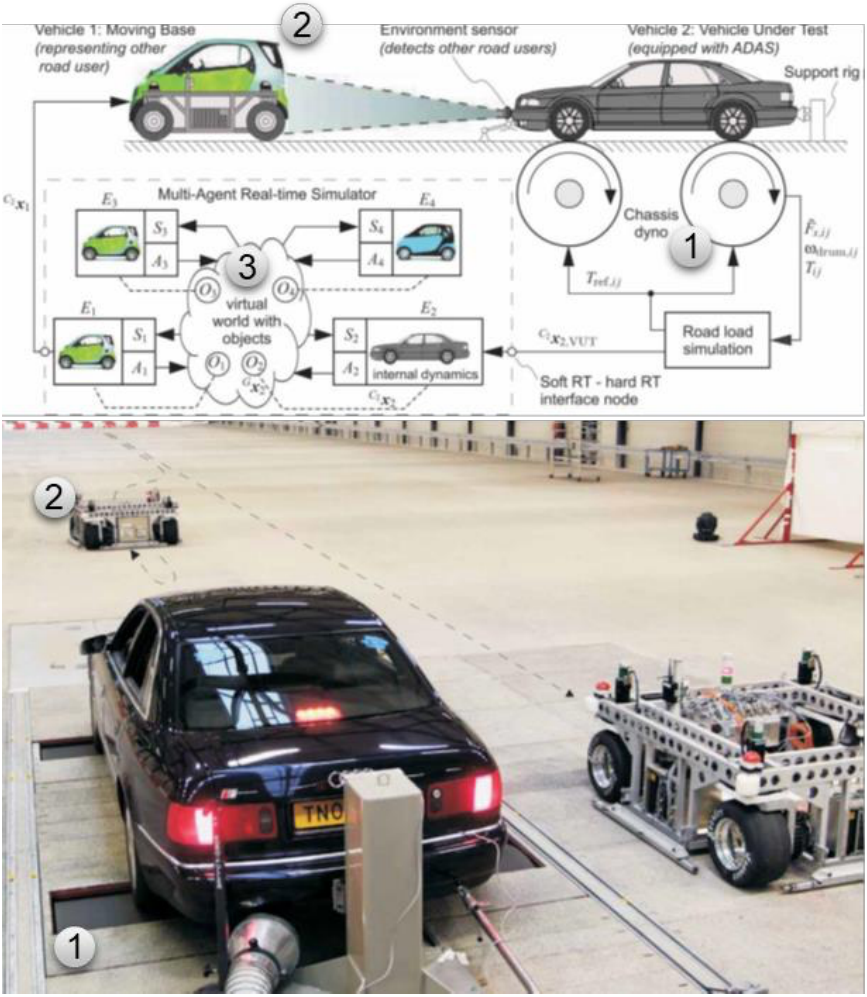


Abbildung 2.47: Aufbau und in Betrieb befindlicher Prüfstand für ADAS (Gietelink et al., 2006) mit
(1) Rollenprüfstand, (2) Target-Fahrzeug und (3) Umweltsimulation

Gerade Rollenprüfstände sind als Entwicklungsumgebung auf Gesamtfahrzeugebene weit verbreitet und gut erprobt (Düser et al., 2011). Damit können beispielsweise Untersuchungen am Antriebsstrang oder Optimierungen

hinsichtlich der Außen- oder Innenakustik von Fahrzeugen in der reproduzierbaren Prüfstandsumgebung durchgeführt werden (Düser et al., 2011). Es lassen sich dabei Entwicklungsaufwände erheblich reduzieren und Ressourcen einsparen (Hasel, 2015), gerade wenn auf Rollenprüfständen der Aufwand zum Aufbau überschaubar und umfangreiche Umbauten am Fahrzeug nicht notwendig sind.

Ein weiteres Beispiel für eine solchen Aufbau ist in Abbildung 2.48 zu sehen. Hierbei wird auf einem Rollenprüfstand auch der Radarsensor in der Fahrzeugfrontschürze stimuliert. Hierzu wird ein Radar-Antennen-Array vor dem Sensor platziert (1). Dieses nimmt die Radar-Signale vom Fahrzeugsensor auf und sendet darauf abgestimmt Radar-signale zum Sensor aus. Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel wird der Aufwand und der benötigte Platz vor dem Testfahrzeug durch die Verwendung eines nicht bewegten Antennen-Arrays erheblich reduziert.

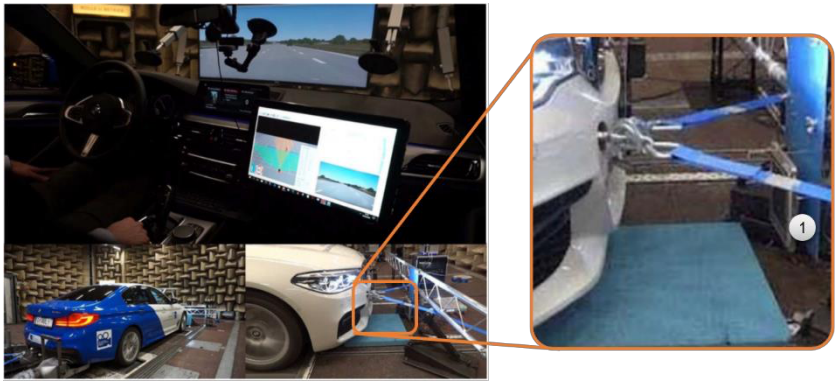


Abbildung 2.48: Radar-Stimulation in einem ViL-Aufbau der AVL mit Radar-Target-Stimulator, ausgeführt als Antennen-Array (1) (Gadringer et al., 2018)

Auch die Validierung von kamerabasierten Fahrerassistenzsystemen ist Gegenstand aktueller Forschung. In Abbildung 2.49 ist die Nachrüstlösung von MobilEye aus Kapitel 2.1.3 in ein Versuchsfahrzeug eingebaut und durch einen Monitor in virtuelle Szenarien eingebunden. Der Regelkreis bei diesem Aufbau ist allerdings nicht ohne menschlichen Fahrenden geschlossen. Das Assistenzsystem zeigt nur Hinweise an und übernimmt nicht selbstständig die Längsdynamikregelung, wie es bei einem ACC-System der Fall wäre. Aus diesem Grund lässt sich dieser Aufbau auch zu den Umgebungen für Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Fahrer und Fahrzeug zählen. Dabei spricht man von Driver-in-the-Loop, was im nächsten Absatz genauer vorgestellt wird.



Abbildung 2.49: Einfache Kamera-Stimulation in einem ViL-Aufbau (Galko, Rossi & Savatier, 2014)

DiL (Driver-in-the-Loop)

Soll der Fahrer in virtuell generierte Fahrsituationen eingebunden werden, müssen die unterschiedlichen Eindrücke auf den Fahrer entsprechend kontrollierbar und in gewünschtem Maße auf den Probanden einwirkbar sein. Zu diesem Zweck gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze, wovon hier nur zwei exemplarische vorgestellt werden.

Im ersten Beispiel ist in Abbildung 2.50 der Fahrsimulator von AVL dargestellt, welcher Teile des Cockpits auf einem Hexapod vor einer 180 Grad Projektionsfläche stellt (AVL List GmbH, 2019). Hierdurch können Beschleunigung bis 1g durch Neigung des Cockpitaufbaus auf den Fahrer wirken. Größere Beschleunigungen und eine Regelung der einwirkenden Beschleunigung unabhängig von der Verschiebung des Fahrersichtfelds ist dabei nicht möglich.



Abbildung 2.50: DiL-Umgebung mit Hexapoden für das Fahrercockpit und 180 Grad Projektionsfläche aufgebaut von AVL (AVL List GmbH, 2019)

Ein weiteres Beispiel für einen Driver-in-the-Loop Aufbau zeigt den Fahrsimulator des FKFS in Stuttgart, welcher in Abbildung 2.51 zu sehen ist (FKFS, 2014). Bei diesem Aufbau wird das Gesamtfahrzeug in eine Kuppel gebracht, welche auf in der Ebene verfahrbare Hexapoden montiert ist. Hierdurch kann das Fahrzeug als Ganzes einschließlich der Projektionsflächen geneigt und so Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung zur Stimulation des Fahrers eingesetzt werden. Zusätzlich kann die Verschiebung der Hexapoden in der Ebene zusätzlich Beschleunigungskräfte einbringen, sodass Beschleunigungswerte von über 1g realisierbar sind. Zur visuellen Einbindung ist um das Fahrzeug eine 360° Projektionsfläche angebracht, sodass auch über alle Spiegel am Fahrzeug das Szenario wahrgenommen werden kann.



Abbildung 2.51: DiL-Umgebung mit Hexapoden für das Gesamtfahrzeug und 360° Projektionsfläche des FKFS in Stuttgart (FKFS, 2014) (FKFS, 2012)

Neben dem Cockpit von PKW werden in Forschungsprojekten auch Kabinen von mobilen Arbeitsmaschinen nachgebaut. Ein solcher Aufbau ist in Abbildung 2.52 dargestellt. Hierbei sind ebenfalls mit Projektionsflächen umgeben, sodass die Fahrenden und Bedienenden in virtuelle Szenarien eingebunden werden. Ein Beispiel hierfür ist das Projekt „Fahrerkabine 4.0“ in dem die kognitive Auslastung des Bedienenden erfasst und ihm adaptiv Nebentätigkeiten angeboten werden (Lehr, Metzger, Geimer & Budde, 2023).



Abbildung 2.52: Fahrerkabine mit Simulationsprojektion zur Erprobung von neuen Bedienkonzepten für mobile Arbeitsmaschinen (Lehr et al., 2023)

Testgelände (Proving Ground)

Die Verwendung von Prüfständen bringt neben dem Aufwand des Aufbaus auch Unsicherheiten mit, ob das dort beobachtete Verhalten so auch später im Straßenverkehr wieder auftritt. Aufgrund dieser Problematik wird bis heute viel Test- und Absicherungsarbeit auf Testgeländen geleistet (Winner et al., 2015). Diese sind vom öffentlichen Straßenverkehr abgetrennt, sodass die Randbedingungen besser kontrolliert und ein Systemversagen weniger folgenschwer ist. Als umgebende Verkehrsteilnehmer kommen Testtargets oder Dummys zum Einsatz. Diese sind realen Fahrzeugen hinsichtlich ihrer Erscheinung und der Eigenschaft nachempfunden von Sensoren wahrgenommen werden zu können. Ein solches Target wurde bereits in Abbildung 2.40 gezeigt. Um bei einer Kollision keinen Schaden zu erleiden, kommen überwiegend weiche Materialien zum Einsatz, welche jedoch beispielsweise deutlich weniger Radarstrahlen reflektieren, sodass zusätzlich Reflektoren am Testtarget angebracht werden müssen. Der Aufbau und die genaue Beschreibung von Test-Szenarien wird durch Gesetzgeber und Zertifizierungsinstitute verfolgt, sodass den Entwicklern für die unterschiedlichen Automatisierungen unter anderem von der EuroNCAP ein Szenariokatalog vorliegt.

Nach DOT HS 812 623 (Thorn et al., 2018) besitzt das Testgelände folgende Vor- sowie Nachteile (übersetzt ins Deutsche):

Vorteile:

- Kontrollierbarkeit: Das Testgelände ermöglicht die Kontrolle über viele Versuchsparameter, einschließlich umgebenden Verkehr und dessen Geschwindigkeiten.
- Bessere Wiedergabetreue: Das Testgelände bildet lebensechte Umgebungsobjekte sowie Umwelteinflüsse ab.
- Übertragbarkeit: Szenarios vom Testgelände lassen sich im Gegensatz zum öffentlichen Straßenverkehr leicht auf anderen Testgeländen nachstellen.
- Wiederholbarkeit: Untersuchungen auf dem Testgelände lassen sich im Vergleich zum öffentlichen Straßenverkehr einfacher auf dieselbe Art und Weise, bei gleichbleibenden Ausgangsbedingungen, wiederholen.

Nachteile:

- Zeit- und Kostenintensiv: Untersuchungen auf dem Testgelände können durch langwierige Auf- sowie Durchführungs-Phasen schnell zu hohen Kosten führen.
- Begrenzte Variabilität: Die Umgebung auf dem Testgelände lässt sich nur begrenzt auf eine breite Vielfalt an Umweltbedingungen anpassen.
- Personal- und Ausrüstungsbedarf: Das Testgelände setzt spezielle Ausbildung sowie Ausstattung voraus.
- Potenzielle Gefahren: Fahrten auf dem Testgelände mit physischen Fahrzeugen und Umgebungsobjekten können zu Gefahren für die Untersuchungsteilnehmer führen

Tests für Notbremssysteme, wie zum Beispiel in Abbildung 2.53 dargestellt, sind schon länger etabliert und mittlerweile Voraussetzung um einen hohen Wert bei Bewertungen der Fahrsicherheit zu erreichen. Gerade die nur bedingt kontrollierbaren Umwelteinflüsse durch das Wetter und der Aufwand zur Versuchs-Vorkonditionierung machen die Arbeit auf dem Testgelände sehr aufwändig und damit zeitintensiv. Wenn zusätzlich komplizierte dynamische Szenarien mit mehreren umgebenden Verkehrsteilnehmern, etwa bei Überholmanövern, zu testen sind, stoßen solche Umgebungen hinsichtlich des Aufwands und der Wiederholbarkeit an ihre Grenzen.



Abbildung 2.53: Probefahrt auf dem Testgelände mit Versuchs-Target (Seiniger et al., 2012)

Straße (Open Road)

Um belastbare Aussagen über das Verhalten in Verkehrssituationen des Alltags zu erhalten, wie sie in Abbildung 2.54 zu sehen sind, müssen Testfahrten auch auf der öffentlichen Straße absolviert werden. Zu diesem Zweck werden unter anderem von öffentlicher Hand Straßen für spezielle Versuchsfahrten, etwa für L3-Erprobungen, freigegeben (invest-in-bavaria.com, 2022). Dabei schränkt die schlechte Kontrollierbarkeit von umgebenden Verkehrsteilnehmern das Spektrum der testbaren Szenarien stark ein. Auch die Wiederholbarkeit ist eingeschränkt, sodass viele Testkilometer absolviert werden müssen um Fahrsituationen zu reproduzieren. Aus dem Mangel an Kontrolle über umgebende Verkehrsteilnehmer liegen keine unabhängigen Informationen über deren Geschwindigkeit sowie die restliche Umgebung wie Wetter oder Lichtbedingungen vor. Diese Randbedingungen erschweren eine Bewertung des Fahrzeugverhaltens unter den vorherrschenden Bedingungen stark.



Abbildung 2.54: Umweltbedingungen mit denen Fahrzeugautomatisierungen umgehen können müssen und entsprechend getestet werden (Thorn et al., 2018)

Außerdem bedarf es besonderer Sicherheitsvorkehrungen, wie speziell geschultes Personal, um solche Prototypen im öffentlichen Straßenverkehr bewegen zu dürfen. Zur besseren Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens sind außerdem zusätzliche Sensoriken und Datenrecorder notwendig, welche ein unabhängiges Abbild der Umgebung für die spätere Systembeurteilung zur Verfügung stellen. Auch Anzeigen zur besseren Verhaltensbeurteilung müssen eingebaut werden, was beispielsweise in Abbildung 2.55 in Form eines zusätzlichen Bildschirms zu sehen ist.



Abbildung 2.55: Testfahrt auf öffentlicher Straße (BMW Group AG, 2014)

In der Praxis werden mehrere der vorgestellten Umgebungen teilweise nacheinander oder je nach Anforderung auch parallel in der Entwicklung zum Einsatz gebracht, um Wissen über das System zu erhöhen. Abbildung 2.56 zeigt einen Entwicklungsablauf von NVIDIA (2021) bei dem in sechs Stufen vom Entwurf zu Beginn bis hin zur Datenauswertung nach einem Test die Schritte aufgeschlüsselt sind.

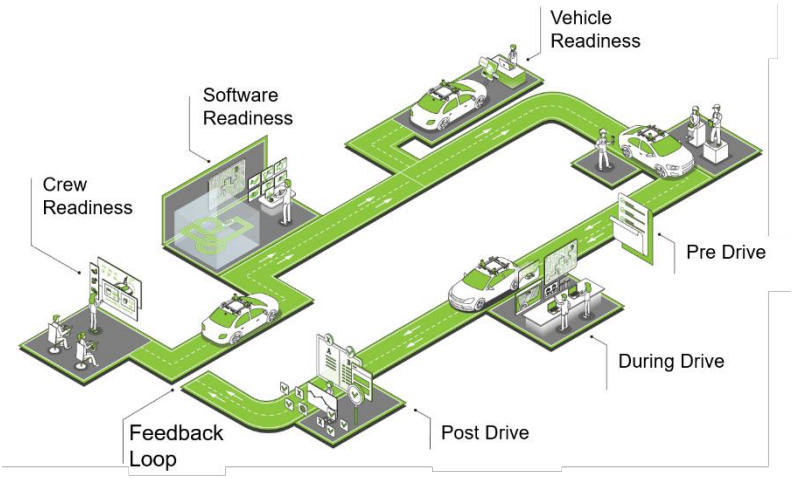


Abbildung 2.56: Entwicklungsablauf für automatisierte Fahrfunktionen bei NVIDIA (2021)

Trotz der Vielfalt und den großen Unterschieden zwischen den einzelnen Validierungsumgebungen prägen einige zentrale Herausforderungen die Validierungsarbeit, welche im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

2.3.4. Ergebnisse vorheriger Forschungsprojekte

Die Problematik der Validierung von automatisierten Fahrfunktionen wurde in der Vergangenheit sowohl von nationalen, als auch internationalen Forschungsprojekten untersucht. In diesem Zusammenhang sei Pegasus (PEGASUS, 2019) und ENABLES-S3 (Leitner, Watzenig & Ibanez-Guzman, 2020) genannt. Ersteres geht als deutsche Initiative der Frage nach „Was muss getestet werden?“ und erarbeitet in diesem Zusammenhang Szenarien für Tests von Fahrzeugautomatisierungen. ENABLES-S3 greift auf europäischer Ebene die Ergebnisse von Pegasus auf und geht der Frage nach „Wie soll getestet werden?“ Als Ergebnis daraus entstand ein modulares Validierungs-Framework, bei dem

unter anderem SiL- und HiL-Umgebungen in eine kontinuierliche Validierung integriert werden.

2.3.5. Herausforderungen und Einschränkungen bei der Entwicklung von Automatisierungen

Die Validierung dient immer dazu Erkenntnisse über das zu entwickelnde System zu erlangen. Dabei liegt jeder Validierungsschritt im Dreieck mit den Ecken: benötigter Zeit, notwendigem Aufwand, beziehungsweise Kosten, und dem Mehrwert, als Umfang an potentiell neuem Wissen über das Produkt. Grundsätzlich sollen Validierungsumgebungen in möglichst kurzer Zeit mit überschaubarem Ressourcenaufwand, möglichst viel Wissen erzeugen können. Zusätzlich muss dabei zwischen Kontrollierbarkeit, Wiederholbarkeit, Skalierbarkeit und Validität, also Belastbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse der jeweiligen Umgebung, abgewogen werden.

Übertragen auf die Validierung von Fahrerassistenzsystemen müssen innerhalb dieses Spannungsfeldes die neuen digitalen Funktionalitäten auch mit neuartigen Entwicklungswerkzeugen entworfen sowie validiert werden. An dieser Stelle sei einerseits das model-based Systems Engineering etwa zur Systemspezifikation oder dem Anforderungsmanagement und neue Validierungsumgebungen für Tests in virtuellen Umgebungen genannt. Der Aufbau und die Pflege von virtuellen Umweltmodellen sowie Modellen von Subsystemen bringt hohe Einstandskosten mit sich. Außerdem reicht oft die Genauigkeit virtueller Modelle nicht aus, um Dynamik oder komplexe Regelzusammenhänge echtzeitfähig abbilden zu können. Zusätzlich sind Abmessungen von Objekten und ihre Lage im Weltkoordinatensystem oft zu ungenau, da physische Komponenten nicht exakt mit ihren virtuellen Repräsentanzen übereinstimmen (Haun, 2013) (z.B. Position eines Sensors im Fahrzeug, wodurch in physischer Umwelt eine abweichende Umwelterfassung im Vergleich zum rein virtuellen Versuchsaufbau entsteht).

2.3.6. Anwendung des IPEK-XiL-Ansatz bei der Validierung von ADAS/AD zur Verkleinerung der Lücken zwischen den Validierungsumgebungen

Auf Basis des in Kapitel 2.2.2 vorgestellten IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes wird die modellbasierte Herangehensweise zum Aufbau von Validierungsumgebungen für die Entwicklungsarbeit an automatisierten Fahrfunktionen erarbeitet. Dabei wird in feingliedrigen Schritten auf vorher genutzten Umgebungen aufgebaut. Somit können neue und meistens unbekannte Einflüsse in der verwendeten Umgebung minimiert werden. Ein solcher modularer Aufbau für die Validierungsumgebung von automatisierten Fahrfunktionen ist in Abbildung 2.57 dargestellt. Dabei liegt in der Mitte das zu entwickelnde System „Fahrzeug“, hier mit den automatisierungsrelevanten Subsystemen Kamera und der Raddrehzahl-Sensorik.

Je nach Validierungsfall wird beispielsweise für Arbeiten auf unteren System-Layern ein entsprechend aufwändiges Rest-Fahrzeug-Modell aufgebaut. Die Fahraufgabe wird von einem „virtuellen“ Fahrer in Form eines Steuergeräts oder zur Konditionierung durch einen menschlichen Fahrer wahrgenommen. Als Fahrmanöver können zum Beispiel ACC- oder AEB Manöver durchgeführt werden; hierfür dienen Normen und Standards als Ausgangspunkt (siehe dazu Kapitel 2.1.6). Beim Aufbau der Validierungsumgebung steht im Folgenden jedoch das System-Modell „Umwelt“ im Fokus. Hierbei wird für weite Teile der Umgebungskonfigurationen eine virtuelle Umweltsimulation aufgebaut. Die relevanten Eindrücke werden dann über entsprechende Schnittstellen, zum Beispiel per Dateninjektion oder Stimulation, zum System „Fahrzeug“ übertragen.

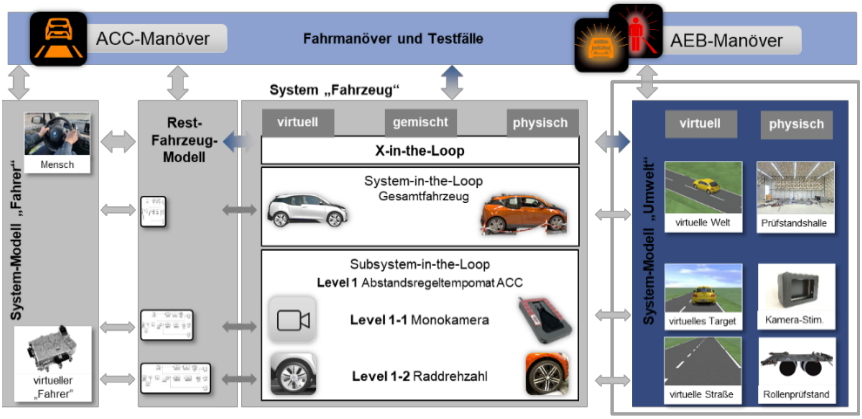


Abbildung 2.57: Anwendung des IPEK-XiL-Frameworks für die Validierung automatisierter Fahrfunktionen, hier für ein kamerabasiertes System in einer gemischt virtuell-physischen Umgebung nach Lutz, Behrendt & Albers (2020)

Bei der Gestaltung von Validierungsumgebungen für Fahrzeugautomatisierungen ist ein breites Wissen sowohl über fahrzeuginterne Vorgänge, als auch über die Form und Beschaffenheit von relevanten Umwelteindrücken notwendig. In diesem Zusammenhang greifen Automatisierungen mittlerweile auf eine Vielzahl unterschiedlicher Sensorinformationen zurück und geben an Anzeigen oder Aktoren Steuerbefehle aus. Um diese Wechselwirkungen unter Berücksichtigung der Einflüsse aus der Validierungsumgebung besser nachvollziehen zu können wurde das Schichtenmodell entwickelt, welches in Abbildung 2.58 dargestellt ist. Hierbei wird das System „Fahrzeug“ im linken oberen Bereich dargestellt und verfügt über verschiedene Fahrerassistenten, beispielsweise ein ACC- oder AEB-System beziehungsweise Systeme zum automatisierten Fahren wie einen Autobahnpiloten.

Diese greifen auf die darunterliegende Ebene mit den zur Verfügung stehenden Sensoren zu. Hierdurch werden Informationen über die Umgebung mit anderen Verkehrsteilnehmern oder der Verkehrsinfrastruktur zur Verfügung gestellt. Aufgrund der fahrzeuginternen Bus-Struktur stehen die erhobenen Umweltinformationen allen Systemen zur Verfügung. Beispielsweise wertet die Einparkhilfe neben den Abstandsmessungen der Ultraschallsensorik auch die Fahrzeuggeschwindigkeit aus, um eine Annäherung an ein Hindernis zu bestimmen. Die Sensoren und Aktoren im Fahrzeug beruhen auf physikalischen Grundprinzipien wie etwa Radar, Ultraschall oder infrarotem Licht. Über diese interagiert schlussendlich das Fahrzeug mit seiner Umwelt und erfasst andere Verkehrsteilnehmer oder ist in der Lage Verkehrszeichen wahrzunehmen.

Soll eine automatisierte Fahrfunktion ohne Sensordateninjektion validiert werden, müssen die Umgebungsbedingungen zum Betreib beziehungsweise zum Auslösen der Funktion herrschen. Diese lassen sich entweder durch physische Quellen, wie einem Test-Dummy, oder einem Stimulator in der unmittelbaren Nähe zum Fahrzeugsensor erzeugen. Damit zusammenhängende Szenarien aus mehreren solcher Eindrücke bestehen können, werden diese durch koordinierende Systeme, etwa eine Umweltsimulation, konsistent generiert und durch physische Quellen bzw. Stimulatoren ausgegeben. Je nachdem welche Umwelteindrücke einfacherer umsetzbar sind oder ob eine bessere Reproduzierbarkeit gewünscht wird, entscheiden die Entwickelnden, ob eine physische Quelle oder ein Stimulator eingesetzt werden soll.

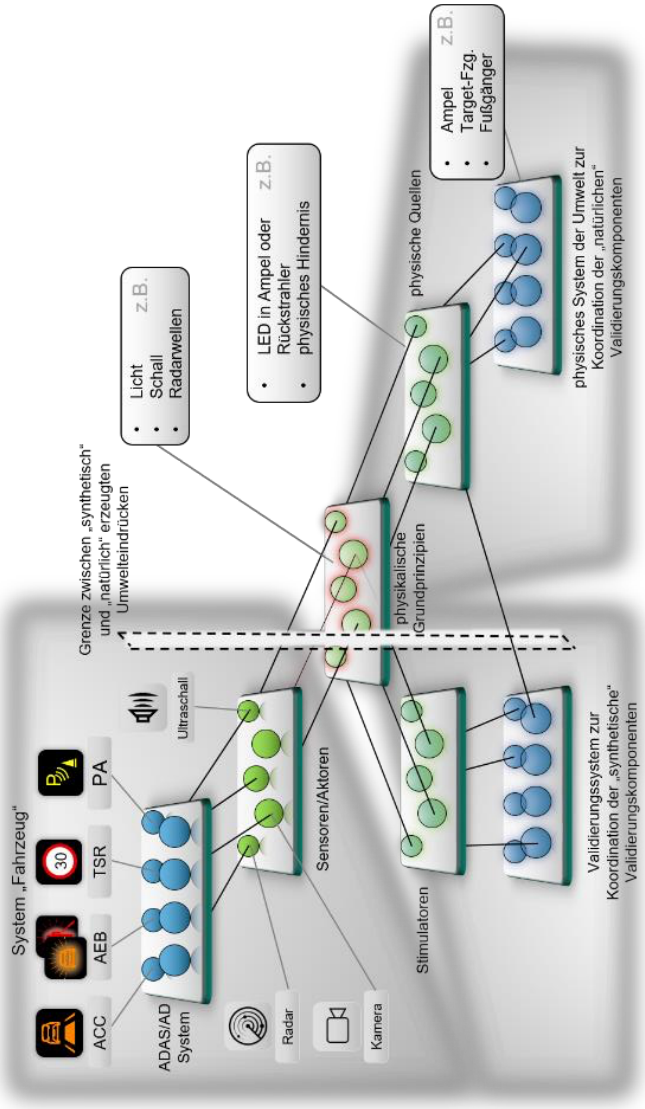


Abbildung 2.58: Schichtenmodell zur Veranschaulichung der Einflüsse und Abhängigkeiten beim Aufbau von Validierungsumgebungen für Fahrzeugautomatisierungen (Lutz, Albers, Hettel & Behrendt, 2017)

3 Bedarf und Zielsetzung

Nachdem in Kapitel 2 der aktuelle Stand von Forschung und Technik vorgestellt wurde, wird nun gezeigt wo Forschungsbedarf herrscht und wie diese Arbeit mit ihren Zielen den Verifikations- und Validierungsprozess bei Fahrerassistenzsystemen unterstützt. Insbesondere der Transfer von Entwicklungsaktivitäten zwischen Rollenprüfstand und dem Testgelände durch Verwendung geeigneter Sensorstimulatoren steht dabei im Fokus.

3.1. Forschungsbedarf

Die Automobilhersteller stehen heutzutage vor Herausforderungen wie der Elektrifizierung des Antriebs (Siebenpfeiffer, 2013) und eine immer stärkere Vernetzung des Fahrzeugs mit dessen Nutzern (Möller & Haas, 2019) und der Umwelt (Sikora et al., 2013). Überdies soll auch die Fahrzeugführung immer stärker digitalisiert und damit automatisiert werden (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2015). Durch diese Trends wird die Entwicklung allerdings vor neue Herausforderungen gestellt und muss sich mit neuen Technologien und deren Entwicklungsdomänen befassen. In diesem Zusammenhang werden immer mehr Lösungen als Softwarefunktionen integriert (Keßler, Sieben, Bhange & Börner, 2023). Diese bringen durch ihre Kombinationsmöglichkeiten steigende Komplexität mit sich (Witte, 2019), wobei gleichzeitig kürzere Entwicklungszyklen und eine höhere Anzahl an virtuellen Prototypen zu bewältigen sind (Wood et al., 2019). Auf diese Weise müssen also nicht nur neue Innovationen zur Marktreife gebracht, sondern gleichzeitig neue Wege zum Erreichen dieser Innovationskraft begangen werden. Als zentrale Aktivität des Produktentstehungsprozesses wandelt sich demnach die Validierung (Albers, Behrendt et al., 2016) von Fahrzeugfunktionen, um den größer werdenden Teil digitaler Systembestandteilen zu berücksichtigen.

Wie der Stand der Forschung zeigt, stehen Fahrerassistenzsysteme schon länger im Fokus der Fahrzeugentwicklung. Neben Systemen zum Komfortgewinn sind mittlerweile auch Assistenten zur Steigerung der Sicherheit aus aktuellen Fahrzeugen nicht mehr wegzudenken (IIHS - Insurance Institute for Highway Safety, 2023) und vom Gesetzgeber für Neuzulassungen vorgeschrieben (Euro NCAP, 2015). Diese Entwicklung bringt die Innovationen aus höherpreisigen Fahrzeugklassen in die Breite der Klein- und Kompaktklasse. Damit müssen die Entwickelnden von Fahrerassistenzsystemen auch für günstigere Fahrzeugmodelle

preiswerte Assistenz-Lösungen finden und bei deren Erarbeitung möglichst wenig Kosten verursachen.

Sollen früh in der Entwicklung effizient Funktionen überprüft oder Grenzbereiche identifiziert werden, müssen entsprechende Szenarien von der Validierungsumgebung möglichst reproduzierbar zur Verfügung gestellt werden. Hierzu sind besonders virtuelle Umgebungen geeignet (Sovani, 2017), da diese in der Lage sind immer gleiche Umgebungsbedingungen zur Verfügung zu stellen. Andererseits stellen Testfahrten auf der Straße exakt die Umgebung dar, in welcher die Systeme auch in Kundenhand verwendet werden (Autonomous Emergency Braking Test Group, 2012). Vor diesem Hintergrund kann die zukünftige Entwicklungsarbeit am Gesamtfahrzeug nicht wie bisher mit einer Vielzahl von Testkilometern auf Testgeländen oder dem öffentlichen Straßenverkehr erfolgen. Allein der Zeitaufwand für heutige Fahrfunktionen stellt mit bis zu 2 Millionen Testkilometern (Maurer et al., 2015) einen Umfang dar, der bei weiter komplizierteren Fahrfunktionen den finanziellen und zeitlichen Rahmen des Leistbaren übersteigt. Zusätzlich werden Umwelteinflüsse wie Regen, Nebel oder Eis zukünftige System vor größere Herausforderungen stellen, welche sich beim Testen schwieriger reproduzieren lassen. Damit erzwingt die Vielfältigkeit der Nutzungsszenarien und Anwendungsmöglichkeiten in Kundenhand eine bisher nicht dagewesene Vielfältigkeit der zu berücksichtigenden Validierungsszenarien.

Zusätzlich müssen die Systeme vor der Markteinführung von Institutionen wie dem TÜV freigegeben und für die Verwendung im öffentlichen Straßenverkehr zertifiziert werden (Koller & Düser, 2020). Auch hierbei muss das Gesamtsystem Fahrzeug möglichst reproduzierbar hinsichtlich eines korrekten Verhaltens im automatisierten Betrieb bewertet werden können.

All diese Entwicklungen machen neue, enger verzahnte Entwicklungsumgebungen notwendig, bei denen mit der Entwicklung in rein virtuellen Umgebungen begonnen wird. Die dabei erzeugten Szenarien können dann im weiteren Entwicklungsprozess weiterverwendet und verfeinert werden. Somit lässt sich die Durchgängigkeit über den Reifegrad gewährleisten und Brüche in der Entwicklung durch zu große Wechsel vermeiden. Hierzu bietet eine Sensorstimulation am Gesamtfahrzeug die Möglichkeit Entwicklungsrisiken überschaubar zu halten, wenn kontinuierlich einzelne (Teil-) Systeme ausgetauscht werden und so die hohe Reproduzierbarkeit mit der Repräsentanz physischer Umgebung kombiniert wird. Außerdem lässt sich mit Hilfe der Sensorstimulation das Gesamtsystemverhalten reproduzierbar testen. Auf diesem Weg können OEMs Funktionsüberprüfungen verstärkt mit virtuellen Umweltszenarien durchführen, ohne das Risiko von ungewollten Einflüssen aus physischen Validierungsumgebungen.

An dieser Stelle setzt diese Forschungsarbeit an und soll mit Hilfe der Sensorstimulation einen Beitrag zum Verifikations- und Validierungsprozess auf Gesamtfahrzeugebene leisten. Dabei steht insbesondere der nahtlose Wechsel zwischen Rollenprüfstand und Testgelände für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zur Längsregelung im Fokus. Hierzu müssen Vorgehen entwickelt werden, wie die Sensorstimulation aufgebaut werden kann. Auch die Integration in die virtuelle Umgebung und die Kombination mit anderen Prüfständen bis hin zur Nutzung auf Teststrecken stellt den Einsatz von Sensorstimulationen vor besondere Herausforderungen. Hierbei ist zu klären, inwiefern Szenarien mit Stimulation reale Fahreindrücke nachbilden können und somit aufwändige Tests in realen Umgebungen auf Prüfstande verlagert werden können. Auch stellt sich die Frage, inwiefern Ergebnisse von Messungen mit Sensorstimulation hinsichtlich ihrer Aussagestärke eingeordnet werden können und welche Erkenntnisse sich daraus ableiten lassen.

3.2. Grundannahmen und Forschungsziel

Im vorherigen Kapitel wurde der Forschungsbedarf für neue Entwicklungsmethoden zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen diskutiert. Darauf aufbauend wird im folgenden Kapitel der Weg aufgezeigt, wie die Forschungsarbeit die Forschungslücke verringert. Zu diesem Zweck werden die Grundannahmen und das daraus abgeleitete Forschungsziel dieser Arbeit vorgestellt.

Grundannahme 1

Fahrerassistenzsysteme lassen sich mit Hilfe des IPEK-XiL-Ansatzes sowohl auf Komponenten, als auch auf Gesamtfahrzeugebene validieren.

Die Vorteile aus der Anwendung des IPEK-X-in-the-Loop wurden bereits in Kapitel 2 vorgestellt. Grundsätzlich eignet sich dieser Ansatz für ein sehr breites Anwendungsfeld. Der Fokus auf Wechselwirkungen zwischen dem zu entwickelnden System mit seiner Umwelt und dem Anwender trägt maßgeblich zu einem umfassenderen Systemverständnis bei. Somit lassen sich besser komplexe Zusammenhänge über Grenzen der beteiligten Teilsysteme hinweg betrachten. Auf diesem Weg können am Beispiel Fahrerassistenzsysteme die Einflüsse aus der Wechselwirkung zwischen Antrieb und Umgebung bei der Auslegung eines Reglers für Abstandstempomaten gezielter berücksichtigt werden.

Grundannahme 2

Die Wiederverwendung von Komponenten der Validierungsumgebung hilft dabei das Entwicklungsrisiko besser einschätzen zu können.

Die zweite Grundannahme geht auf die Verringerung des Entwicklungsrisikos ein. Dabei zeigt die Forschung von Simon Klingler (Klingler, 2016), (Albers, Klingler & Wagner, 2014), dass die Vernetzung von Teilsystemen unmittelbaren Einfluss auf die Kritikalität hinsichtlich des Entwicklungsrisikos darstellt. Dabei bringt ein Wechsel der Validierungsumgebung immer neue, potentiell unbekannte, Einflüsse mit sich. Ein gezielteres Einstellen von einzelnen Komponenten der Validierungsumgebung ermöglicht das Entwicklungsrisiko besser einschätzen und so Investitionen durch überschaubare Schritte in der Entwicklung gezielter einsetzen zu können.

Nachdem der Forschungsbedarf vorgestellt und die beiden Grundannahmen eingeführt wurden, wird nun das Forschungsziel definiert.

Forschungsziel

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Beitrags für die Validierung von Fahrerassistenzsystemen am Gesamtfahrzeug mit Hilfe der Sensorstimulation auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes.

Im Gegensatz zu bestehenden Werkzeugen und Umgebungen wird dabei ein feingliedriger Wechsel zwischen einzelnen virtuellen sowie physischen Umwelteinflüssen angestrebt. Dabei ermöglicht ein hohes Maß an Modularität beim Aufbau der Validierungsumgebungen eine umfangreichere Wiederverwendbarkeit, was zur Verringerung des Entwicklungsrisikos beiträgt. Auch soll die erfolgreiche Integration mit anderen schon vorhandenen Validierungswerkzeugen, wie etwa einem Rollenprüfstand oder der Teststrecke, berücksichtigt werden.

Ein Ziel auf dem Weg ist es, die Vergleichbarkeit von Messergebnissen, erhoben durch virtuell und physisch dominierte Validierungsumgebungen, zu verbessern. Dies geschieht durch die schrittweise Erweiterung von virtuellen Umgebungen um einzelne physische Umwelteinflüsse. Zusätzlich wird die Reproduzierbarkeit physisch geprägter Fahrversuche durch Einbindung einzelner virtueller Umwelteinflüsse erhöht. Als beispielhafte Umsetzung wird dies auf ein ACC-

geregeltes Auffahrmanöver angewendet und anschließend Handlungsempfehlungen aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet.

Der Aufbau einer Validierungsumgebung erfordert von Entwickelnden einen Perspektivwechsel. Der Fokus verschiebt sich weg von der Entwicklung einer Fahrzeugfunktion, hin zur Entwicklung einer Umgebung, in welcher die Fahrzeugfunktion bei ihrer Funktionserfüllung objektiv beobachtet sowie bewertet werden kann. An dieser Stelle wird in der vorliegenden Arbeit ein systematisches Vorgehen entwickelt, um die Fehleranfälligkeit beim Wechsel der Entwicklungsumgebungen zu verringern. Es werden die Kriterien der Kontrollierbarkeit, Vorhersagbarkeit, Wiederholbarkeit und Skalierbarkeit feingliedriger sowie gezielt den Bedürfnissen folgend ausgewählt, womit die Validierung näher an den Bedürfnissen der Entwickelnden erfolgt. Dies geschieht durch den Austausch einzelner Elemente der Entwicklungsumgebung, zum Beispiel der Sensorstimulatoren. Es werden hierdurch in kleinen Schritten die Vorteile der virtuellen Umgebungen (hohe Reproduzierbarkeit und gezieltes Einstellen von Umweltparametern) mit den Vorteilen der primär physischen Entwicklungsumgebungen (zum Beispiel die Repräsentanz - Streuung von Systemverhalten aufgrund von realen Umweltbedingungen) kombiniert. Durch dieses Vorgehen werden die Sprünge beim Wechsel zwischen den Umgebungen kleiner und das Risiko für Fehler, zum Beispiel durch unvorhergesehene Einflüsse, bei der Validierung minimiert.

Weitere Vorteile für die Entwickelnden liegen darin, dass diese früher in die Lage versetzt werden Grundfunktionalitäten des Gesamtsystems überprüfen oder Zielwerte für zukünftige Entwicklungsschritte ableiten zu können. Für die Entwicklungsarbeit an einem ACC-System bedeutet dies, dass Szenarien aus frühen Entwicklungsphasen konsistent weitergeführt und Schritt für Schritt mit kontrollierbaren Veränderungen an der Validierungsumgebung im Reifegrad vorangebracht werden. Beispielsweise kann die virtuelle Umgebung aus MiL-Entwicklung in die SiL-Umgebung bis hin zur ViL-Umgebung mit skaliert werden. Dabei wirken die Umwelteindrücke (System-Input) über sich mitentwickelnde Wege (Direkte Interaktion mit Simulationsmodellen – MiL/SiL; Stimulation/Steuergerät-Injektion - HiL; Stimulation/Fahrzeug-Injektion – ViL) auf das System in Development.

3.3. Forschungsfragen

Aus dem vorgestellten Stand der Forschung, dem Forschungsbedarf und der darauf aufbauenden Zielsetzung werden im folgenden Kapitel die Forschungsfragen formuliert.

Forschungsfrage 1

Wie muss die Sensorstimulation für Sensoren von Fahrerassistenzsystemen aufgebaut sein, damit eine Validierung am Gesamtfahrzeug erfolgen kann?

Die erste Forschungsfrage widmet sich dem prinzipiellen Aufbau von Sensorstimulatoren für Fahrerassistenzsysteme. Dabei müssen unterschiedliche Wirkweisen berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf die Ultraschall- sowie Kamera-Sensorik gelegt. Grundsätzlich soll die Stimulation auf dem jeweiligen physikalischen Prinzip, z.B. Reflektion von Ultraschall oder sichtbarem Licht erfolgen. Außerdem muss bei der Stimulation eine aktiv aussendende oder nur passiv aufnehmende Funktionsweise von Sensoren berücksichtig werden.

Forschungsfrage 2

Welche Herausforderungen gibt es bei der Integration der Sensorstimulation in schon bestehende Validierungsumgebungen auf Gesamtfahrzeugebene?

Forschungsfrage 2 richtet den Fokus auf die Integration der Sensorstimulation in die restliche Validierungsumgebung auf Gesamtfahrzeugebene. Dabei stellt die Interaktion zwischen Stimulator und virtueller Umweltsimulation sowie anderer Aufbauten, beispielsweise einem Rollenprüfstand oder dem Testgelände, weitere Herausforderungen für den erfolgreichen Einsatz in der Entwicklung. Basierend auf dem IPEK-XiL-Frameworks soll ein Ablauf von Schritten zur Anwendung erarbeitet werden.

Forschungsfrage 3

Können stimulierte Szenarien reale Fahreindrücke abbilden und somit aufwändige Tests aus rein physischen Umgebungen in gemischt virtuelle /physische Umgebungen verlagern?

Neben dem Aufbau und der Integration von Sensorstimulatoren in bereits vorhandene Validierungsumgebungen auf Gesamtfahrzeugebene, soll diese Arbeit auch aufzeigen, wie damit gewonnene Ergebnisse zu Erkenntnissen führen. Dabei weist die Stimulation Grenzen beispielsweise hinsichtlich einer leistbaren Genauigkeit auf. Diese Einschränkungen müssen bei der Auswertung und anschließenden Interpretation berücksichtigt werden.

4 Forschungsumgebung und -vorgehen

Nachdem Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit vorgestellt wurden, zeigt dieses Kapitel zunächst die Forschungsumgebungen anhand der vorhandenen Ressourcen und denen sich daraus ergebenden Randbedingungen auf. Anschließend wird auf das sich daraus ergebende Forschungsvorgehen eingegangen.

4.1. Forschungsumgebungen und Randbedingungen

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Untersuchungen an zwei Versuchsfahrzeugen mit unterschiedlichem Antriebskonzept (batterieelektrisch und hybridelektrisch) sowie mit verschiedenen Umgebungs-Sensoren durchgeführt. Betrieben werden diese einerseits auf einem Rollenprüfstand und andererseits auf der zentralen Asphaltfläche am Campus Ost des KIT.

4.1.1. Forschungsfahrzeuge

Die Forschung im Rahmen dieser Arbeit erfolgt an den institutseigenen Fahrzeugen BMW i3 und Porsche Cayenne S Hybrid. Deren Ausstattung begünstigt Untersuchungen an Ultraschall- sowie Kamera basierten Fahrerassistenzfunktionen. Außerdem lassen sich Auswirkungen von Veränderungen der Längsregelung (beispielsweise dem ACC-System) auf den elektrischen Triebstrang sowie die hybride Regelstrategie verfolgen.

BMW i3

Der batterieelektrische BMW i3 des IPEK verfügt über das Ausstattungspaket „Driving Assistant Plus“. Die Assistenzfunktionen wie das ACC oder AEB-System dieses Fahrzeugs beruhen ausschließlich auf mono kamera-basierten Daten. Folglich sind keine Radar-Sensoren oder weitere Kameras zur Längsregelung verbaut. Dies ist vorteilhaft, da somit für die Forschung an Stimulator-basierter Validierung auf Gesamtfahrzeugebene nur die Kamera eingebunden werden muss. Abbildung 4.1 zeigt das Fahrzeug auf der Teststrecke des Campus Ost. Das batterieelektrische Fahrzeug erleichtert bei den Untersuchungen Rückschlüsse auf den Energieverbrauch, da dieser ohne weitere Messaufbauten ausgelesen werden kann. Dies ist von besonderem Interesse, wenn die ACC-Regelung auf physische oder virtuelle Vorausfahrer hinsichtlich der benötigten Energie verglichen wird.



Abbildung 4.1: Forschungsfahrzeug BMW i3 bei einer Testfahrt auf dem Campus Ost des KIT

Folgende Fahrerassistenzsysteme werden in dieser Arbeit detaillierter untersucht, weswegen auf deren Verhalten im Folgenden näher eingegangen wird:

a. Parkassistent

Der Parkassistent basiert auf einer Abstandsmessung im Nahbereich bis 3 Meter um das Fahrzeug. Hierdurch können bei niedriger Geschwindigkeit, zum Beispiel beim Parkieren, Hindernisse erfasst und angezeigt werden. Dabei informiert das System den Fahrer optisch sowie akustisch über Hindernisse oder stellt ihn vollständig von der Fahrzeugführung durch ein automatisiertes Einparken frei.

Das verwendete Versuchsfahrzeug des Instituts verfügt über solche Funktionalitäten und kann damit sowohl auf dem Mittendisplay Hindernisse grafisch darstellen, siehe Abbildung 4.2 rechts, als auch ein Parkieren parallel zur Fahrtrichtung selbstständig durchführen. Dazu verwendet das System insgesamt zehn Ultraschallsensoren, von denen vier an der Frontstoßstange, vier an der Heckstoßstange und zwei vor den Radhäusern der Vorderräder zur Seite verbaut sind. Von diesen Sensoren sind vier in Abbildung 4.2 links zu sehen. Über die Service-Schnittstelle des Fahrzeugs lassen sich außerdem die ermittelten Abstände auf einen Zentimeter genau auslesen.

Voruntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit an diesem System zeigen, dass die Objekterkennung für Hindernisse mit einem Abstand kleiner 25 Zentimeter die Soundausgabe eines Dauertons bewirkt, und auf dem Display die kürzest mögliche Entfernung zum Hindernis angezeigt wird. Über die Sensoren werden Abstände ab einer Entfernung von 3 Zentimetern bis zu 2,5 Meter erfasst. Somit sind die

Systemgrenzen hinsichtlich des möglichen Erfassungsbereichs bekannt und auch die Messauflösung mit einer Zentimetergenauigkeit erfasst.

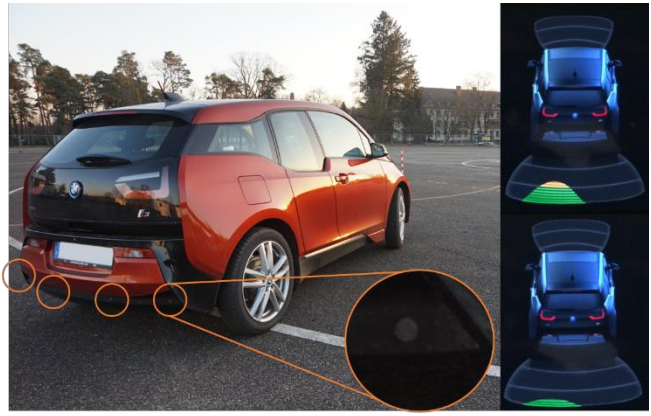


Abbildung 4.2: Foto von BMW i3 mit vier der zehn Sensoren der Ultraschall-Park-Sensorik (links) und optische Ausgabe der Abstandsinformation (rechts)

b. Kamerabasiertes ACC-System

ACC-Systeme gehören zu den ersten Systemen zur Fahrzeugautomatisierung, welche auf Begebenheiten aus der Fahrzeug-Umwelt reagieren und damit aktiv auf die Fahrzeugführung einwirken können. Dazu erfassen sie den Bereich vor dem Fahrzeug entweder durch eine Radar-Sensorik oder durch Kameras, welche im Fuß des Innenspiegels montiert sind.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich neben dem Parksystem auch auf das ACC-System, welches beim BMW i3 über eine Mono-Kamera verfügt, wie in Abbildung 4.3 dargestellt. Erkenntnisse über einen solchen Aufbau lassen sich auf komplexere Sensorsysteme übertragen. Um das Systemverhalten genauer charakterisieren zu können, werden Messfahrten sowohl auf dem Testgelände des KIT am Campus Ost, als auch im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt.



Abbildung 4.3: Foto von BMW i3 mit Mono-Kamera Sensorik

Auf dem Testgelände wurden mit dem ACC-System Fahrten auf stehende Fahrzeuge aus 100 Metern Entfernung im Rahmen einer Abschlussarbeit zusammen mit Christopher Kolling (2021)[4] bei unterschiedlichen Umweltbedingungen, beispielsweise Tageslicht, Dämmerung oder Regen, aufgezeichnet. Die Ergebnisse dieser Messungen sind zum gegenseitigen Vergleich in Kapitel 6.2 geführt. Gerade das Erkennen von stehenden Hindernissen stellt für Fahrzeugautomatisierungen eine besondere Herausforderung dar (Winner et al., 2015), weshalb Untersuchungen mit diesem Szenario für die Entwicklungsarbeit hilfreich sind.

Szenarien mit bewegten Fahrzeugen benötigen eine weitere Fahrstrecke. Aus diesem Grund wurden Folgefahrten mit den konstanten Geschwindigkeiten von ca. 30, 50 und 120 km/h, auf öffentlicher Straße durchgeführt. Ein detaillierter Einblick kann der Co-Betreuten Masterarbeit von Andreas von Borstel (2018)[5] entnommen werden. Bei den so durchgeführten Untersuchungen ist per Radar-Sensor kontinuierlich der Abstand zwischen Ego- und Target-Fahrzeug gemessen worden. Abbildung 4.4 zeigt die Ergebnisse als Diagramm bei dem der eingestellte Abstand zwischen Ego- und Target-Fahrzeug über der Folgegeschwindigkeit aufgetragen ist. Hierbei ist das ACC-System in Stufe 1 eingestellt. Es ist zu sehen, dass bei ca. 30 km/h ein Abstand von etwas mehr als 20 Metern und bei ungefähr 50 km/h ein Abstand von ca. 30 Metern zum vorausfahrenden Fahrzeug eingeregelt wird.

[4] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)
[5] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Gerade diese Werte helfen im weiteren Forschungsverlauf, die Übertragbarkeit der Kamera-Stimulation überprüfen zu können.

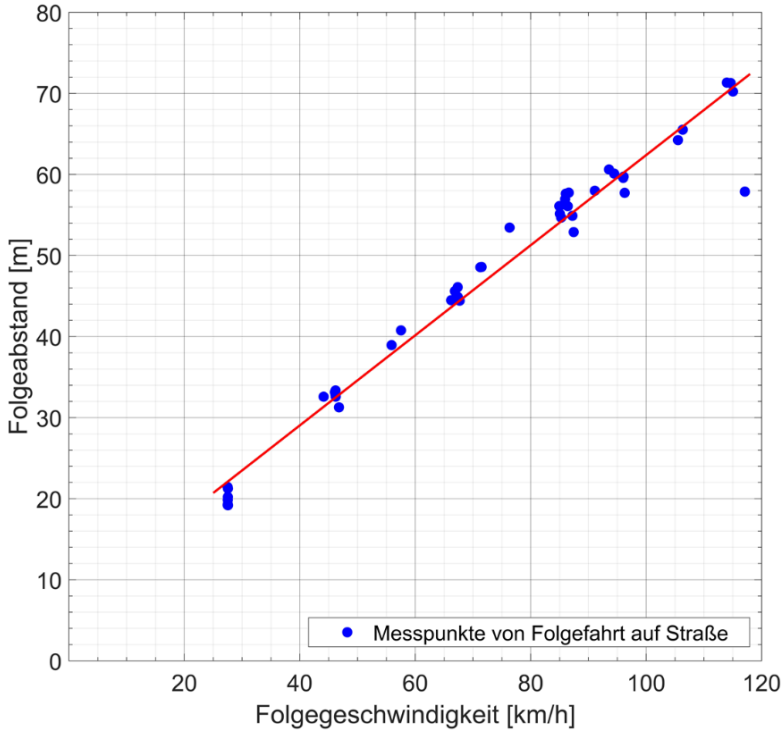


Abbildung 4.4: Zusammenhang aus Folgegeschwindigkeit und eingestelltem Folgeabstand bei Verwendung des kamerabasierten ACC-Systems in Stufe 1 des gewünschten Wunschabstands, linearisiert durch die rote Linie

Wie in Kapital 2.1.3 bereits vorgestellt, basieren die im BMW i3 verfügbaren Fahrerassistenzsysteme zur Längsregelung (ACC & AEB) auf einer Monokamera mit Bildauswertung von MobilEye (FCC, 2012). Ein solches System wird in dieser Forschungsarbeit als Standalone-Lösung (Mobileye 630) für Untersuchungen auf System-Level verwendet (MobilEye, 2011).

Porsche Cayenne S Hybrid (Typ 92A)

Für Untersuchungen an Fahrerassistenzsystemen in Wechselwirkung mit dem Antriebsstrang hybridelektrischer Fahrzeuge wird der Porsche Cayenne S Hybrid

des Instituts verwendet. Bei diesem lässt sich das Fahrpedal durch eine analoge Spannungs-Quelle ersetzten. Somit können Microcontroller an dieser Schnittstelle an das Fahrzeug angeschlossen werden und die Fahrgeschwindigkeit durch Regelalgorithmen anstelle eines menschlichen Fahrers eingestellt werden. In Kapitel 6.3 werden auf diesem Weg Validierungsaktivitäten für eine multikriterielle Fahrstrategie untersucht. Der hybride Antriebsstrang ermöglicht durch seinen komplexeren Aufbau, Energieflüsse an mehreren Stellen beobachten und gezielt steuern zu können. Hierdurch sind die Auswirkungen der Fahrstrategieplanung besser sichtbar, sodass die Regelstrategie des Antriebs leichter beobachtet werden kann. Dies ermöglicht eine Optimierung hinsichtlich des Energieverbrauchs. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden die serienseitig verbauten Fahrerassistenzfunktionen nicht verwendet.

4.1.2. Der Akustikrollenprüfstand des IPEK

Das IPEK verfügt am Campus Ost des KIT über einen Zweiachs-Akustikrollenprüfstand. Nähre Informationen zum Aufbau und den technischen Spezifikationen können folgender Quelle entnommen werden (IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2022). Abbildung 4.5 zeigt den Rollenprüfstand mit dem Versuchsfahrzeug BMW i3 auf den Scheitelrollen. Weiterführende Informationen zum Aufbau und Betrieb solcher Prüfstände werden detailreich in (Düser et al., 2011) beschrieben.



Abbildung 4.5: Versuchsfahrzeug BMW i3 auf dem Akustikrollenprüfstand des IPEK am Campus Ost

Im Rahmen dieser Arbeit werden Möglichkeiten erforscht, wie die Validierung von Fahrerassistenzfunktionen auf einem solchen Prüfstand erfolgen kann. Damit die untersuchten Fahrzeuge im Prüfbetrieb auf den Scheitelrollen bleiben, werden

auftretende Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte mittels einer Fixierungen abgestützt. Hierzu werden beispielsweise eine Abschleppösen-Fixierung, wie in Abbildung 4.5 montiert, oder eine Radnaben-Fixierung eingesetzt. Diese Fixierungen sowie weitere Prüfstands-Aufbauten z.B. die Belüftung und Absaugung, erschweren Untersuchungen an Fahrerassistenzsystemen erheblich. Dabei stören die Stangen und Schläuche das Umfeld der Sensoren oder blockieren deren Umwelterfassung, sodass die Assistenzsysteme ausgeschaltet werden und eine Nutzung beziehungsweise Entwicklung auf dem Prüfstand nicht möglich ist. Überdies wird oft im Fahrzeug ein Prüfstands-Modus aktiviert, wodurch auch alle Assistenzfunktionen abgeschaltet werden.

Neben der Fixierung und der Belüftung schränken auch die Rollen den Fahrbetrieb ein. Beispielsweise lassen sich auf Rollenprüfständen keine Lenkbewegungen an den Rädern realisieren. Diese Bewegungen würden das Testfahrzeug vom Prüfstand bewegen. Eine Lösung hierfür kann ein Lenkkraft-Emulator sein, wie ihn zum Beispiel AVL mit dem „Dynamic Steering Force Emulator“ (Butcher, 2021) vorgestellt hat. Dieser löst die starre Kopplung zwischen Lenkrad und Vorderräder während er bedarfsgerecht Gegenkräfte in die Lenkmechanik einleitet. Auf diesem Weg lassen sich auch Fahrzeugautomatisierungen mit Lenkeingriff auf einem Rollenprüfstand validieren. Da ein solches Modul zum Zeitpunkt dieser Forschungsarbeit nicht zur Verfügung stand, fokussiert sie sich auf Fahrerassistenzsysteme ohne Quereingriff.

4.1.3. Testgelände auf dem Campus Ost des KIT

Abbildung 4.6 zeigt den Campus Ost des KIT. Dabei liegt in zentraler Lage der ehemalige Exerzierplatz mit seiner 100 Meter langen Diagonalen, welche in dieser Arbeit unter anderem für die Untersuchungen in Kapitel 6.1 als Teststrecke für Auffahr-Fahrten verwendet wird. Nordöstlich davon befindet sich der Rollenprüfstand des IPEK. Die direkte räumliche Nähe ermöglicht den schnellen Wechsel zwischen den Untersuchungs-Umgebungen sowie die nahtlose Verwendung der Umweltsimulation zwischen Rollenprüfstand und Teststrecke.



Abbildung 4.6: Übersicht auf den Campus Ost des KIT mit der 100 Meter langen Teststrecke und dem Rollenprüfstand des IPEK (Apple Inc., 2022)

4.2. Forschungsvorgehen

Nachdem im vorherigen Kapitel die Forschungsumgebungen vorgestellt wurden, wird nun das Forschungsziel durch Beantwortung der Forschungsfragen erarbeitet. Die notwendigen Schritte dazu, unter Berücksichtigung der Randbedingungen, definieren das Forschungsvorgehen und damit den Aufbau dieser Arbeit. Eine Übersicht der durchlaufenen Schritte in Verbindung mit der vorrangig beantworteten Forschungsfrage ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

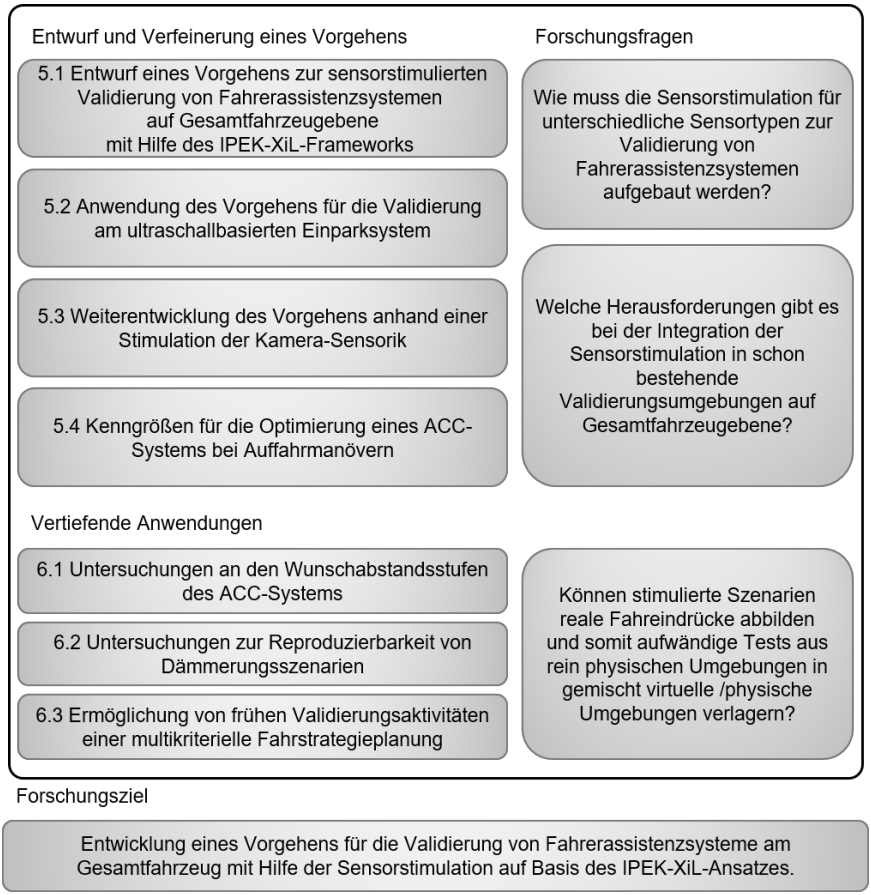


Abbildung 4.7: Forschungsvorgehen mit Bezug zu den Forschungsfragen

Grundsätzlich lässt sich das Forschungsvorgehen in zwei Abschnitte unterteilen. Zu Beginn steht der Entwurf einer Stimulation anhand der Anwendung am Ultraschall-Einparksystem im Fokus. Hiermit wird die erste Forschungsfrage adressiert. Die dabei gewonnen Erkenntnisse werden, zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, am Aufbau einer Stimulation für die Kamera-Sensorik in Verwendung bei dem ACC- und AEB-System (siehe Kapitel 2.1.4) weiterentwickelt. Abschließend folgt die Ableitung von Kenngrößen für die Quantifizierung der Funktionsqualität eines kamerabasierten ACC-Systems.

Basierend auf dem im ersten Abschnitt entwickelten Vorgehen folgen im zweiten Abschnitt drei Beispiele. Hierdurch wird ein besserer Einblick in dessen Anwendung gegeben und Forschungsfrage drei adressiert.

5 Entwicklung eines Vorgehens zum Aufbau einer Sensorstimulation

Im folgenden Kapitel wird ein Vorgehen zum Aufbau einer Sensorstimulation entwickelt. Dies geschieht zunächst am Beispiel der Ultraschall-Sensorik und wird anhand der kamerabasierten ACC-Funktion weiterentwickelt. Dieses Vorgehen kann als Bestandteil einer sensorstimulierten Validierung auf Gesamtfahrzeugebene verwendet werden.

Abbildung 5.1 zeigt das Vorgehen in der Entwicklung. Der IPEK-XiL-Ansatz mit seinen zentralen Elementen und dem systemischen Grundverständnis (siehe dazu Kapitel 2.2.2) stellt dabei den Ausgangspunkt für den initialen Entwurf des Vorgehens dar. Eine erste Anwendung erfolgt exemplarisch bei der Funktionsüberprüfung einer ultraschallbasierten Einparkhilfe (5.2). Mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen wird das Vorgehen am mono-kamerabasierten Abstandsregeltempomaten des BMW i3 weiterentwickelt (5.3) und abschießend Kenngrößen für dessen Optimierung abgeleitet (5.4).

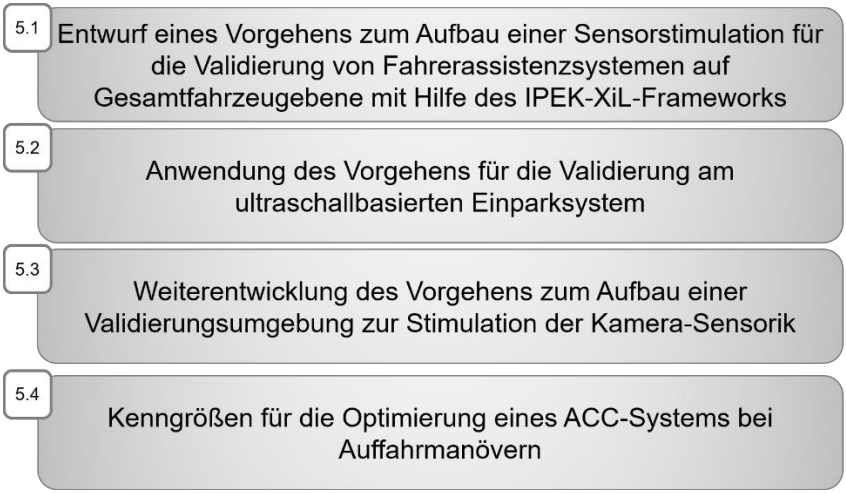


Abbildung 5.1: Die vollzogenen Schritte zur Entwicklung des Vorgehens zum Aufbau einer Sensorstimulation

5.1. Entwurf eines Vorgehens zum Aufbau einer Sensorstimulation

Ausgangspunkt für den Entwurf des Vorgehens ist der IPEK-XiL-Ansatz im Kontext der Fahrzeugentwicklung. Wie in Kapitel 2.2.2 vorgestellt, besteht dieser aus den zentralen System-Modellen „Fahrer“, „Restfahrzeug“, „SiD“ (System-in-Development), „Umwelt“ sowie den Manövern und Testfällen. Die jeweiligen Elemente werden im Folgenden durch die virtuelle Umweltsimulation, eine geeignete Sensor-Stimulation und den Rollenprüfstand in die neu gestaltete Validierungsumgebung überführt und detailliert vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird auf die Kopplung physisch-virtueller Systembestandteile gelegt. Hierzu kommen Stimulatoren zum Einsatz, welche virtuelle Umwelteindrücke bei physisch vorliegenden Fahrzeugsensoren nutzbar machen.

Grundsätzlich liegt der Fokus dieser Forschungsarbeit auf Entwicklungsumgebungen auf Gesamtfahrzeugebene. Um die Universalität der einzelnen Umweltbestandteile, beispielsweise der Umweltsimulation oder der Sensorstimulation auch für frühere Entwicklungsstadien auf zu zeigen, werden hier allerdings auch Umgebungen für Teilkomponenten abseits des Gesamtfahrzeugs mit in die Untersuchungen einbezogen.

Das System-Modell „Fahrer“ wird entweder durch einen menschlichen Bediener oder ein Steuergerät zur Fahrzeugautomatisierung repräsentiert. Das „Restfahrzeug“ ist eng mit dem SiD verbunden und kann je nach Anwendungsfall aus einer virtuellen Simulation oder einem realen Fahrzeug-Prototypen bestehen. Letzterer kann dem SiD im Verlauf der Entwicklung auch einzelne Fahrzeugfunktionen simulativ vermitteln. Dieses besteht bei Fahrzeugautomatisierungen häufig aus einem Software-Code, welcher auf einem Steuergerät ausgeführt wird, oder es ist ein neues Sensor-System, welches in Wechselwirkung mit dem Restfahrzeug eingesetzt werden soll. Maßgeblich für die Validierungsumgebung ist das System-Modell „Umwelt“.

Im Folgenden wird das Vorgehen zum Aufbau einer neuen Validierungsumgebung für automatisierte Fahrfunktionen in fünf Schritten vorgestellt, was in Abbildung 5.2 dargestellt ist. Beim Durchlaufen der Prozesschritte besteht immer die Möglichkeit zum vorherigen Schritt zurückzukehren, um eine zuvor getroffene Festlegung veränderten Randbedingungen anzupassen:

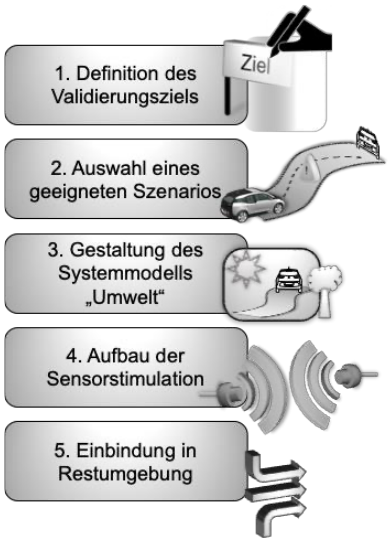


Abbildung 5.2: Zusammengefasste Schritte des Vorgehens zum Aufbau einer Validierungsumgebung für Fahrerassistenzsysteme mit dem zentralen Element der Sensorstimulation

In der darauffolgenden Anwendung des Vorgehens werden diese Schritte immer wieder durchlaufen. Einerseits wird so das Vorgehen iterativ weiterentwickelt und andererseits Aspekte aus der praktischen Anwendung veranschaulicht.

5.1.1. Definition der Validierungsziele

Alle weiteren Schritte zur Gestaltung der Validierungsumgebung orientieren sich maßgeblich am gewünschten Validierungsziel. Aus diesem Grund müssen als erster Schritt die angestrebten Ziele formuliert werden. Dies kann beispielsweise dem Anspruch folgen: „Es soll überprüft werden, ob das zu entwickelnde System auf Objekte (Fahrzeug, Fahrradfahrer, Fußgänger, Tiere, etc.) *rechtzeitig* sowie *angemessen* reagiert.“ Zur Quantifizierung der Funktionserfüllung müssen Zielwerte festgelegt werden. Diese drücken zum Beispiel durch Reaktionsabstände oder Reaktionsgeschwindigkeiten aus, was *rechtzeitig* oder *angemessen* bedeutet. So lässt sich im Laufe der Entwicklung der Reifegrad objektiv beobachten. Siehe dazu auch Abbildung 2.39 hinsichtlich des Validierungsziels mit entsprechender Hypothese und Kriterien.

Nach erfolgreichem Erreichen des Validierungsziels wird in aller Regel ein Neues aufgestellt und das Vorgehen ein weiteres Mal durchlaufen. Bei diesem iterativen

Vorgehen sollten möglichst viele Elemente der Validierungsumgebung wiederverwendet werden. Eine langfristige Entwicklungsplanung berücksichtigt deshalb diesen Umstand bestmöglich und stimmt die aufgestellten Validierungsziele mit den darauffolgenden Schritten aufeinander ab. Aus einem so definierten Validierungsziel ergeben sich Anforderungen an das durchzuführende Szenario, welches im nächsten Schritt beschrieben wird.

5.1.2. Auswahl eines geeigneten Szenarios

Im Rahmen dieser Arbeit werden umfangreiche Zusammenhänge und Wechselwirkungen am Gesamtsystem Fahrzeug untersucht. Diesem Zweck dienen realitätsnahe Szenarien, welche beispielsweise durch eine Abfolge mehrerer Phasen ein umfassenderes Bild des Systemverhaltes darstellen. Aus dem Validierungsziel wird das Szenario abgeleitet, welches am besten ein gewünschtes Systemverhalten auslöst und damit die Funktionserfüllung überprüfbar macht. Beispielsweise kann bei einer Folgefahrt hinter einem Target-Fahrzeug, welches definiert verzögert, unter anderem die Reaktionsgeschwindigkeit im abstandsgeregeltem Fahrbetrieb beobachtet werden. Die Reaktionsgeschwindigkeit setzt sich dabei aus dem Ermitteln des Abstands (Sense), der daraus abgeleiteten Reaktion als Verzögerung unter Einhaltung eines Sicherheitsabstands (Plan) und der Einleitung der Verzögerung zusammen. Andererseits kann beim Auffahren auf ein stehendes Target-Fahrzeug die Qualität der Abstandsschätzung überprüft werden. Dabei muss für die gezielte Bremsung kontinuierlich die Änderung des Abstands ermittelt und die Verzögerung darauf eingestellt werden.

Häufig stellt das Szenario mindestens eine der vier folgenden Anforderungen an das zu entwickelnde Fahrerassistenzsystem:

- *Erfassung* als Überführung des Umwelteindrucks in geeignete digitale Informationen
- *Erkennung* als Abgleich des erfassten Umwelteindrucks durch Mustererkennung und damit Situationseinordnung
- *Ableiten von Handlungen* als Reaktion auf die erkannte Situation
- Schnell und gezieltes *Umsetzen einer geeigneten Reaktion*

Alle Aspekte müssen bei der Auswahl des Szenarios berücksichtigt und entsprechend priorisiert werden.

Aus dem Szenario ergeben sich auch Anforderungen für die einzelnen Subsysteme der Validierungsumgebung. In Abbildung 5.3 sind exemplarisch solche Abhängigkeiten für die Validierungsumgebung eines kamerabasierten Assistenzsystems dargestellt. Dabei nehmen die Anforderungen an die Umgebung

nach oben hin zu. Den einfachsten Fall stellt dabei eine statische Folgefahrt hinter einem anderen Auto ohne stärkere Geschwindigkeitsänderungen dar. Dabei sind die Anforderungen an die Validierungsumgebung bei weiten Abständen und damit langen Reaktionszeiten verhältnismäßig einfach erfüllbar. Demgegenüber stellt ein Notbremsszenario mit Fußgängerbeteiligung erheblich höhere Anforderungen an die Validierungsumgebung. Die Objektdarstellung des Fußgängers muss für die frühzeitige Erkennung hochauflösend erfolgen. Andernfalls wird das Objekt durch zu wenig Pixel dargestellt, um bei größerer virtueller Entfernung noch erkennbar zu sein. Zusätzlich muss die Validierungsumgebung möglichst latenzfrei auf die Geschwindigkeitsänderungen bei der Verzögerung des Fahrzeugs reagieren können.

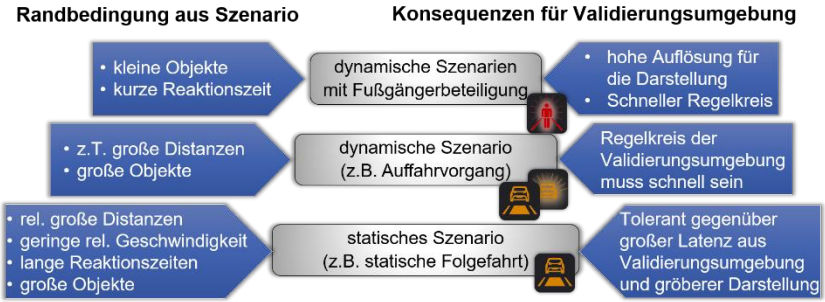


Abbildung 5.3: Anforderungspyramide für die Validierungsumgebung am Beispiel eines ACC/AEB-Szenarios

Nachdem der genaue Ablauf des gewünschten Szenarios bekannt ist, kann die Testumgebung aufgebaut werden.

5.1.3. Gestaltung des Systemmodells „Umwelt“

a. Anforderungen & Eigenschaften

Aus dem zuvor festgelegten Szenario lassen sich im folgenden dritten Schritt die Randbedingungen ableiten, welche durch die Umwelt allgemein zur Verfügung gestellt werden. Dabei wird zwischen physischen und virtuellen Systembestendteilen der Validierungsumgebung unterschieden. Erstere können beispielsweise eine öffentliche Straße oder der Aufbau eines Rollenprüfstands sein. Die virtuellen Bestandteile werden durch die entsprechende Umweltsimulation generiert. Durch diese wird das Verhältnis zwischen Egofahrzeug und der virtuellen Umgebung für alle relevanten Umwelteindrücke definiert. Relevant sind in diesem Zusammenhang die Informationen, welche für die Testdurchführung reproduzierbar

vor dem Fahrzeug wiedergegeben werden müssen und zuvor schon in der Ziel- oder Szenariodefinition festgelegt wurden. Beispielsweise werden der benötigte Straßenverlauf, Umweltbedingungen wie Witterung oder Tageszeit und auch andere Verkehrsteilnehmer mit deren Position und Geschwindigkeit als virtuelle Bestandteile definiert. Auch ein virtuelles Abbild des Egofahrzeugs wird in der Umweltsimulation generiert. Dieses als digitaler Zwilling bezeichnete Modell beherbergt unter anderem virtuelle Sensormodelle beispielsweise für die Kamera. Dabei nimmt das Modell die Position und den Blickwinkel ein, sodass die Eindrücke in der virtuellen Umwelt denen aus der physischen Anordnung entsprechen. Auf den genauen Aufbau einer solchen Stimulation wird in Kapital 5.1.4 eingegangen.

Die virtuelle Umweltsimulation modelliert reproduzierbar physikalische Zusammenhänge in der Umgebung des zu testenden Systems, wodurch eine einfache Wiederholbarkeit für Untersuchungen gewährleistet wird. Zu diesem Zweck bildet sie umgebende Objekte mit virtuellen Modellen ab und bietet unter anderem eine 3D Welt mit entsprechender Bildausgabe für eine optische Repräsentation. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Dabei wird das Ego-Fahrzeug durch einen digitalen Zwilling (1) repräsentiert. Ein Ultraschallsensor wird durch seinen Erfassungsbereich (2) angedeutet. Das Hindernis (3) ist in diesem Beispiel eine zylindrische Säule, welche im Erfassungsbereich des Abstandssensors steht.

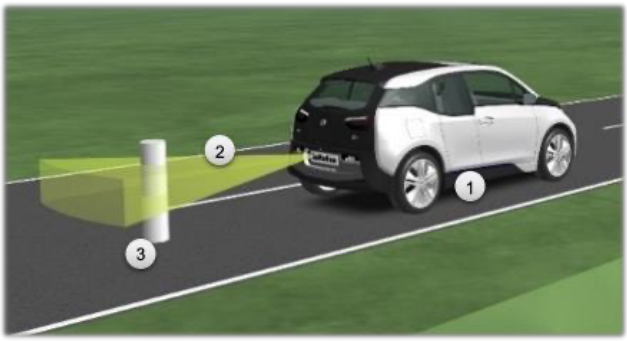


Abbildung 5.4: Beispiel für eine virtuelle Umweltsimulation und deren visuelle 3D Repräsentation erstellt mit IPG CarMaker

Diese Zusammenhänge sind für die Durchführung der Testszenarien relevant und können beispielsweise Abstände oder Relativgeschwindigkeiten zu umgebenden Objekten wie andere Verkehrsteilnehmer oder optische Eindrücke von Verkehrszeichen bei der Szenario-Durchführung sein. Zur Simulation dieser

Eindrücke muss die Validierungsumgebung geeignete Simulationsmodelle beinhalten. Je nach Verwendungszweck und Entwicklungsreife des SiD müssen die Eindrücke in unterschiedlichen Detaillierungsgraden berechnet und im Anschluss der Stimulation oder Dateninjektion am SiD zugeführt werden. Dabei gibt die Simulation alle benötigten Ergebnisse, zum Beispiel Abstände zu umgebenden Fahrzeugen oder Bildeindrücke von der Umgebung in passender Frequenz und Auflösung, für Closed-Loop-Untersuchungen (siehe dazu Kapitel 2.3.1) in Echtzeit über eine geeignete Schnittstelle, etwa CAN oder Ethernet, in passendem Format, zum Beispiel als Objektlisten, aus.

Die Umweltsimulation stellt also das koordinierende Element für den virtuellen Teil des Systemmodells „Umwelt“ dar. Alle Eindrücke, die durch virtuelle Modelle generiert werden, entspringen dieser Simulation. Dabei muss genau unterschieden werden, ob ein Eindruck bei der Validierung physischen oder virtuellen Ursprungs sein soll. So sind beispielsweise Beschleunigungen auf die ESP-Sensorik bei einer Fahrt auf dem Rollenprüfstand bis jetzt nur per Injektion als virtuelle Eindrücke und nicht durch Stimulation dem Fahrzeug zuführbar. Andererseits wirkt die Beschleunigung als physischer Eindruck zum Beispiel bei der Fahrt auf dem Testgelände. Mit diesem Wissen können auf dem Testgelände einerseits die Beschleunigungskräfte aus der realen Fahrt physisch erzeugt werden und andererseits der Eindruck eines vorausfahrenden Fahrzeugs als visuelles Bild vor der Fahrzeugkamera virtuell generiert und miteinander kombiniert werden. Es müssen demnach auch immer die jeweiligen Einflüsse berücksichtigt werden, die neben einer Stimulation auf das SiD einwirken. Beispielsweise kann bei einer Sensorstimulation aus der virtuellen Umweltsimulation ein Wettereinfluss, wie Sonneneinstrahlung oder Regen, gezielt abgebildet werden. Dieser wird dann jedoch noch um ungewollte Einflüsse durch die Ausrichtung und Helligkeit oder ungewollten Lichteinfall aus der Prüfumgebung bei einer Kamerastimulation ergänzt.

Abbildung 5.5 zeigt die Schritte der Informationsübertragung zwischen virtueller Umweltsimulation und dem zu stimulierenden Sensor, welche bei der Übertragung vollzogen werden. Dabei wird jedes Mal die Information transformiert und leicht abgewandelt. Hierdurch kann beispielsweise eine ungewollte Veränderung am Umwelteindruck auftreten, die sich dann negativ auf die Validierung auswirkt. Beispielsweise kann eine Übertragungsrate die Informationen soweit reduzieren, dass die Abtastrate am Sensor unplausible Zwischenzustände erfasst und damit die Stimulation Umwelteindrücke nicht mehr realistisch genug dem Fahrzeug zuführt.

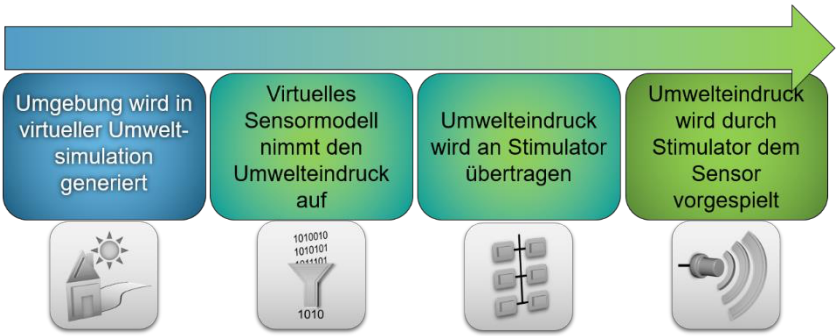


Abbildung 5.5: Informationsübertragung aus der virtuellen Umweltsimulation per Stimulation zum Sensor

Die Informationsaufbereitung in umgekehrter Reihenfolge, also vom Sensor zum Umweltmodell, wurde bereits im Stand der Forschung in Abbildung 2.9 eingeführt und stellt damit das entsprechende Gegenstück auf der Seite des Fahrzeugs dar.

Die Umweltsimulation koordiniert also die virtuellen Eindrücke im System-Modell „Umwelt“. Außerdem stellt sie auch die Oberfläche zur Eingabe der Testfälle und Manöver bereit. Darunter wird beispielsweise eine Programmoberfläche verstanden werden, in der ein initialer Abstand zwischen Egofahrzeug und einem davor fahrendem Target-Fahrzeug eingegeben wird. Auch der Streckenverlauf oder Umwelteinflüsse wie Tag/Nacht beziehungsweise Regen müssen der Umweltsimulation hierüber vermittelt werden können.

Für die Kommunikation mit den restlichen Bestandteilen der Validierungsumgebung verfügt die Umweltsimulation über eine Vielzahl digitaler Schnittstellen. Diese werden im Folgenden genauer beschrieben.

b. Schnittstellen

Neben den unterschiedlichen Modellen für Objekte und Eindrücke aus der Umgebung des SiD muss die Umweltsimulation auch über geeignete Schnittstellen zum Datenaustausch mit den anderen Elementen der Validierungsumgebung verfügen. Eine möglichst universelle Datenübertragung bietet die Verwendung von IP-basierten Netzwerken. Über diese können die Informationen schnell und über eine große Auswahl an Übertragungshardware weitergeleitet werden. Zu diesem Zweck sollte die virtuelle Umweltsimulation Informationen per Ethernet mittels UDP oder TCP/IP senden sowie empfangen können. Neben der Kommunikation per IP-basiertem Netzwerk ist häufig auch eine unmittelbare Kommunikation mit dem

Fahrzeug oder einem Prüfstand per CAN oder FlexRay sinnvoll. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit in die virtuelle Umweltsimulation eingebunden werden oder Signale aus der virtuellen Umweltsimulation direkt als Fahrzeugsignale injiziert werden sollen. Dafür ist eine direkte Integration zum Senden und Empfangen von Signalen der fahrzeuginternen Kommunikation hilfreich. Weiterhin ist die optische Ausgabe von Umwelteindrücken zur Stimulation von Fahrzeugkameras eine wichtige Schnittstelle, um eine möglichst große Bandbreite an Eindrücken konsistent aus einer Quelle an das Fahrzeug zu bringen. Eine detailliertere Betrachtung möglicher Übertragungstechnologien wird in Kapitel 5.1.7 vorgestellt.

5.1.4. Aufbau der Sensorstimulation

Damit die Umweltsimulation mit dem Fahrzeug und dessen Automatisierungssystem interagieren kann, bedarf es geeigneter Schnittstellen. Diese können beispielsweise die direkte Injektion von Steuergeräte-Signalen als CAN-Botschaften sein. Eine solche Einspeisung bringt jedoch unter anderem zwei gravierende Herausforderungen mit sich: Einmal setzt sie den Zugriff auf die Bordelektronik und damit Kenntnis über das verwendete CAN-Protokoll voraus. Zum anderen überspringt sie vollkommen den Fahrzeugsensor und damit dessen Einfluss bei der Umwelterfassung, Signalübertragung und -verarbeitung. Letztere kann durch detaillierte Modelle in der virtuellen Umweltsimulation verbessert werden. Diese Modelle besitzen jedoch Grenzen hinsichtlich einer adäquaten Abbildung sowie der echtzeitfähigen Berechnung.

Diese Arbeit verfolgt den Ansatz die Umwelteindrücke primär durch eine Sensorstimulation dem Fahrzeug zuzuführen. Dabei wird an dem physikalischen Grundprinzip des jeweiligen Sensors angesetzt und diesem Signale so vorgespielt, als wenn er durch physische Objekte in der Umgebung den Eindruck aufnehmen würde. Damit bleibt das Fahrzeug unverändert und etwaige Einflüsse des Sensors hinsichtlich der Umwelterfassung bleiben ebenfalls erhalten. Bei diesem Ansatz werden in der virtuellen Umweltsimulation auch Sensormodelle zum Ausleiten der Umwelteindrücke verwendet. Allerdings fallen diese erheblich einfacher aus, sodass diese nicht alle Details des Funktionsprinzips simulativ abbilden müssen, was die Berechenbarkeit beschleunigt. Auf diesem Weg wird die Echtzeitfähigkeit für Closed-Loop-Umgebungen erreicht und die Aussagekraft der Untersuchungsergebnisse gehoben.

Die Funktionsweise des Sensors beeinflusst unmittelbar den Aufbau des dazu passenden Stimulators. Aus diesem Grund wurden im Stand der Forschung in Kapitel 2.1.3 für diese Arbeit relevante Sensoren vorgestellt. Die nachfolgenden Absätze zeigen eine genauere Analyse, wie Fahrzeugsensoren allgemein zu

unterscheiden sind und welche Folgen sich daraus für die Stimulation ableiten lassen.

a. Aufbau und Klassifikation von Stimulatoren parallel zur Funktionsweise von Sensoren

Je nach Einsatz- und Verwendungszweck lassen sich Sensoren in unterschiedliche Klassen einteilen. Vor dem Hintergrund einer Sensorstimulation ist es hilfreich die Umwelterfassung in direkte und indirekte Umwelt-Sensorik einzuteilen. Diese Einteilung lässt sich im weiteren Verlauf der Arbeit auch für den Aufbau der dazu passenden Stimulatoren zugrunde legen.

Direkte Umwelt-Sensorik nimmt physikalische Größen wie Licht oder Temperatur aus der Umgebung auf und wandelt diese zur weiteren Verwendung in elektronische Signale um. Beispiele für solche Sensorik sind ein Thermometer oder der Umgebungslichtsensor. Auch eine digitale Kamera, wie sie in Fahrzeugen eingesetzt wird, nimmt direkt Licht auf und wandelt dessen Eindrücke durch den Photoeffekt auf einem Halbleiter-Pixel-Array in digitale Bildsignale um.

Indirekte Umwelt-Sensorik sendet Signale auf einem physikalischen Grundprinzip, etwa Ultraschall oder elektromagnetische Wellen wie Radar aus und nimmt die von der Umgebung reflektierten Signale wieder auf. Aus der Analyse des empfangenen Signals kann dann auf die Umgebung geschlossen werden. So kann aus der Laufzeit des Schall-Impulses auf die Entfernung zum reflektierenden Objekt oder aus einer Frequenzverschiebung des Radar-Impulses auf die Relativgeschwindigkeit eines umgebenden Objekts geschlossen werden. Beispiele für solche Sensorik sind der Ultraschall-, Regen-, Radar- oder Lidar-Sensor.

b. Vorgehen zur Stimulation

Zur Stimulation einer **direkten** Umwelt-Sensorik wird durch ein aktives Element, beispielsweise Heizwiderstand oder Leuchtdiode, die Messumgebung des Sensors so konditioniert, dass er die gewünschten Messwerte ermittelt. Es kann außerdem sinnvoll sein, einen weiteren direkten Sensor in den Stimulator zu integrieren. Dieser kann parallel und unabhängig vom Fahrzeugsensor die Stimulations-Eindrücke aufnehmen und so die Konditionierung überprüfen oder eine Regelung der Stimulationsgröße ermöglichen.

Die Stimulation von **indirekter** Umweltsensorik ist deutlich aufwändiger. Damit die Stimulation möglichst unmittelbar erfolgt, müssen die ausgesendeten Signale aufzugreifen, auszulöschen und modifizierte Signale dem Sensor zurückzusenden. Dies bedeutet, dass über die selbe physikalische Größe mit dem Fahrzeug-Sensor

interagiert wird, mit der dieser seine Umwelt wahrnimmt. Dieses Vorgehen setzt ein tieferes Verständnis für das Funktionsprinzip voraus, vermeidet allerdings auch bestmöglich eine Verfälschung bei der Informationsübertragung durch die Stimulation.

Die indirekte Simulation ist erheblich aufwändiger. Aus diesem Grund gehen die folgenden vier Absätze tiefergehend auf den Ablauf und die Randbedingung der Stimulation für diese Sensorik ein:

i. Detektion des vom Sensor ausgesendeten Impulses

Damit der genaue Zustand des Sensors bekannt ist, wird durch einen Receiver im Stimulator der vom Sensor ausgesendete Impuls detektiert. So kann die Stimulation auf den aktuellen Zustand des Sensors ausgerichtet werden. Bei der Erfassung des Sensorsignals wird darauf geachtet, dass dieses nicht durch fremde Einflüsse beeinträchtigt wird. Jede Abweichung in der Detektion vom originalen Signal wird im weiteren Stimulations-Prozess zu Komplikationen führen. Etwa elektromagnetische Störungen bei der Signalübertragung oder temperaturabhängige Materialeigenschaften der Empfangs-Sensorik können Fehlverhalten in der Stimulation hervorrufen, welches schwer zu identifizieren ist. Solche Randbedingungen sind etwa beim Aufbau der Ultraschallstimulation relevant geworden. Hierbei ist die Schallgeschwindigkeit in Luft temperaturabhängig. Um Außentemperatur-Einflüsse zu berücksichtigen ist aus diesem Grund ein Temperatur-Sensor im Stimulator verbaut, der entsprechend die Umgebungstemperatur bei der Laufzeitfestlegung einrechnet.

ii. Unterdrücken/Absorption der vom Sensor ausgesendeten Signale

Im Falle einer Stimulation, muss der übliche Vorgang einer Signal-Reflexion unterbunden werden. Andernfalls würde der Sensor nur die umgebenden Aufbauten zur Stimulation wahrnehmen und ließe sich nicht wie gewollt mit anderen Informationen aus der virtuellen Umweltsimulation versorgen. Eine Lösung zur Unterdrückung beziehungsweise Absorption der vom Sensor ausgesendeten Signale können passive Elemente wie Schäume oder Oberflächen mit absorbierenden Eigenschaften sein. Dabei tilgt entweder die offenporige Struktur eines Schaums oder direkt eine geeignete Oberfläche die Energie des vom Sensor ausgesendeten Impulses.

iii. Aussenden von synthetisch erzeugten Sensorsignalen

Zur Stimulation von indirekt umwelterfassenden Sensoren darf nicht der vom Sensor entsprungene Impuls den Weg zurück zu dessen Empfangs-Sensorik nehmen. Der

Stimulator muss deshalb die reflektierte Form der Signale selbst erzeugen können, hierbei ist zum Beispiel auf die passende Frequenz und Dauer des Signals zu achten. Für den Sensor scheint damit das Stimulations-Signal eine Reflexion der Umwelt auf das von ihm ausgesendeten Signal zu sein. Dabei können gewollte Signalveränderungen nicht von ungewollten unterschieden werden, was eine besondere Sorgfalt beim Senden des synthetisch erzeugten Signals erfordert. Ein genaues Wissen über die Charakteristik des synthetisch erzeugten Signals ist unabdingbar. Hierzu kann beispielsweise für Entwicklungszwecke der Sensor, welcher den Impuls vom Fahrzeug detektiert, auch das synthetische Signal des Stimulators empfangen und damit eine Beobachtung der Signalform ermöglichen.

iv. Ausrichtung und Kalibrierung der Stimulation

Nachdem die grundsätzliche Funktionalität der Stimulation aufgebaut wurde, muss noch sichergestellt werden, dass diese vom Fahrzeug auch wie reale Umwelteindrücke wahrgenommen wird. Dafür ist ein Abgleich notwendig, welcher sowohl die physische Ausrichtung als auch die virtuelle Kalibrierung auf den Fahrzeugsensor betrifft. Beide haben sehr häufig mehrere Freiheitsgrade, die beispielsweise eine räumliche Ausrichtung des Stimulators in der physischen Welt bedeuten können.

Wie in Abbildung 5.6 zu sehen, vergleicht der Entwickelnde oder ein automatisierter Interpreter beim Kalibrieren und Ausrichten die Werte des Sensors mit Referenzwerten, beispielsweise aus Messungen mit physischen Umwelteindrücken. Je nach Anzahl und Sensitivität der Freiheitsgrade zwischen Sensor und Stimulator fällt dieser Aufgabe eine zunehmend wichtigere und zugleich kompliziertere Rolle zu.

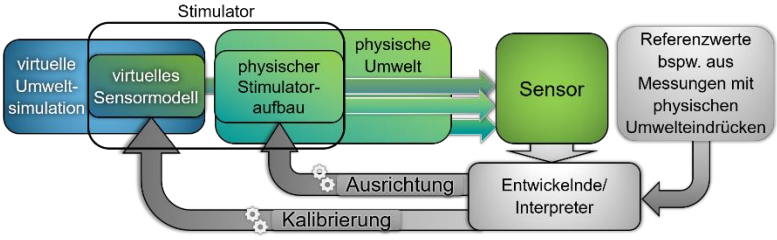


Abbildung 5.6: Informationsflüsse und iteratives Vorgehen bei der Ausrichtung sowie Kalibrierung des Stimulators

Die vorherigen Absätze beschreiben allgemein das Vorgehen zur Stimulation direkter sowie indirekter Umwelt-Sensorik. Die folgenden praktischen Beispiele sind repräsentativ für die unterschiedlichen Sensortypen und sollen die Anwendungen und den Aufbau einer Stimulation näher veranschaulichen. Diese wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelt sowie prototypisch in Zusammenarbeit mit studentischen Abschlussarbeiten aufgebaut.

5.1.5. Beispiele: Helligkeits-, Regen- und Beschleunigungssensor

a. Helligkeitssensor

Der Helligkeitssensor im Fahrzeug zählt zu der direkten Umwelt-Sensorik. Er nimmt Licht aus der Umgebung auf und wandelt dieses über eine Photodiode in ein elektronisches Spannungs/Strom-Signal um. Dieses wird per Kennfeld einem physikalischen Wert, etwa in Lux oder W/m², zugeordnet. In diesem Zusammenhang muss zwischen der Anwendung als Globalfeldsensor oder Vorfeldsensor unterschieden werden, wie in Kapitel 2.1.3 des Stand der Forschung beschrieben. Ersterer ist Richtung Himmel gerichtet und arbeitet im Lichtspektrum des sichtbaren Lichts. Gemeinsame Untersuchungen im Rahmen der Co-Betreuten Bachelorarbeit von Oussama Oualha (2018)[6] verwenden zur Stimulation eine entsprechend helle LED, welche direkt von oben auf die Sensorfläche gerichtet ist. Der Helligkeitssensor als Vorfeldsensor nimmt Licht aus der Fahrtrichtung des Fahrzeugs auf und wandelt nur Licht im Infrarotbereich bis 780 nm um. Diese Charakteristiken, sowohl die Wellenlänge, als auch die genaue Ausrichtung nach vorne, muss bei der Stimulation berücksichtigt werden. Ein schematischer Aufbau des Stimulators kann aus Abbildung 5.7 entnommen werden.

[6] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

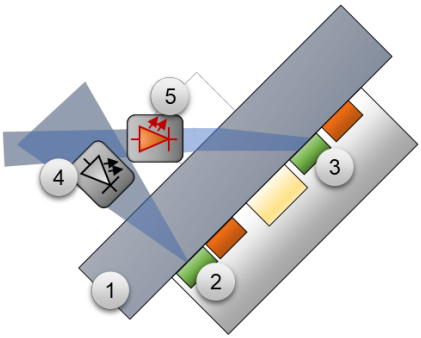


Abbildung 5.7: Prinzip des Umgebungs-Helligkeitsstimulators, 1 Frontscheibe, 2 Umgebungslichtsensor, 3 in die Entfernung gerichteter Lichtsensor, 4 Leuchtdioden im sichtbaren Licht, 5 IR-Leuchtdiode

b. Regensensor

Der Regensensor arbeitet im Gegensatz zum Helligkeitssensor auf dem Prinzip der indirekten Umwelt-Sensorik. Als ausgesendeter Impuls wird infrarotes Licht in die Frontscheibe des Fahrzeugs eingeleitet und an der außenliegenden Seite des Glases bei trockenen Außenbedingungen totalreflektiert. Das zurückgeworfene Licht wird von einer Photodiode für infrarotes Licht detektiert und aus der empfangen Intensität auf den Zustand der Totalreflexion geschlossen. Wird nun die Glasscheibe durch Regen nass, tritt keine Totalreflexion an der Außenseite auf und die empfangene Lichtintensität nimmt deutlich ab. Eine genauere Beschreibung wurde bereits in Kapitel 2.1.3 vorgenommen.

Im Rahmen der Co-Betreuten Bachelorarbeit von Oussama Oualha (2018)[7] ist ein Aufbau zur Stimulation des Umgebungslicht-Sensors entstanden, welcher in Abbildung 5.8 dargestellt wird. Zuerst muss dafür gesorgt werden, dass das ausgesendete infrarote Licht vom Sensor nicht durch die außenliegende Grenzfläche der Frontscheibe zurück reflektiert wird. Dazu kann beispielsweise Wasser auf die Scheibe gebracht werden. Je nach Dicke der Wasserschicht bietet sich allerdings keine reproduzierbare Untersuchungsbedingung, sodass ein Pad aus transparentem PU-Kunststoff-Gel die besseren Voraussetzungen besitzt. Dieser Werkstoff bietet außerdem einen ähnlichen Brechungsindex an der Scheibenoberfläche wie die Paarung aus Glas und Wasser. Somit detektiert der Fahrzeugsensor durchgehend „Wasser“ auf der Scheibe und es kann im nächsten

[7] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Schritt der Stimulation Infrarot-LEDs auf die Infrarot-Dioden des Sensors gerichtet werden. Zur Stimulation von Trockenheit (also einer Totalreflektion des IR-Lichts in der Frontscheibe zurück zum Sensor) kann durch die IR-LEDs Licht mit den Charakteristiken des Fahrzeugsensors auf dessen IR-Dioden geworfen werden. Die Untersuchungen am prototypischen Aufbau haben gezeigt, dass Fahrzeugsensoren nicht kontinuierlich Licht in die Frontscheibe emittieren, sondern als Bündel mit mehreren kurzen Lichtimpulsen alle 12 ms (Oualha, 2018)[8]. Dies bedeutet, dass die Stimulation genau diese Signale erfasst und ohne Verzögerung selbsterzeugt in die Scheibe wieder einleiten können muss. Bei dem Aufbau gilt es auch zu beachten, dass der Fahrzeugsensor unter dem Wischbereich der Scheibenwischer liegt. Es müssen also die Wischerblätter entfernt werden, sodass eine Kollision zwischen Scheibenwischanlage und dem auf der Scheibe montierten Stimulator verhindert wird.

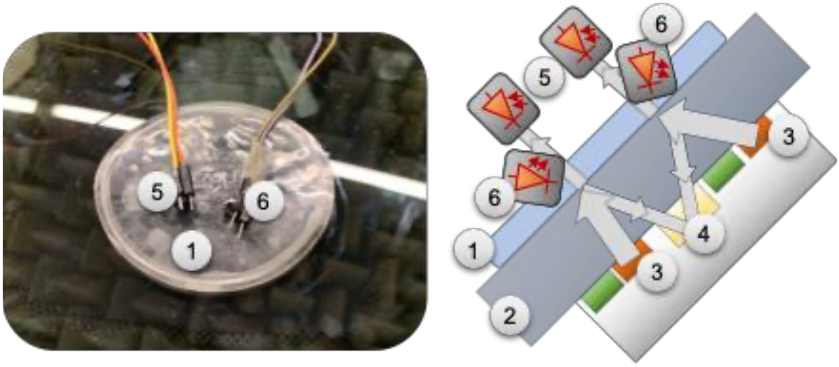


Abbildung 5.8: Aufbau des Regensensor-stimulators, 1 PU-Kunststoff-Gel Pad als Auskoppelkörper, 2 Frontscheibe, 3 IR-Leuchtdioden des Sensors, 4 IR-Photodiode des Sensors, 5 IR-Phot,odioden des Stimulators, 6 IR-Leuchtdioden des Stimulators

c. Beschleunigungssensor

Der Beschleunigungssensor im Fahrzeug arbeitet als MEMS (He, Yu, Liu & Wang, 2024) (Micro-Electro-Mechanical System) hochintegriert in einem Mikrochip. Trotzdem lässt sich das zugrundeliegende Funktionsprinzip als direkte Umwelt-Sensorik beschreiben. Dabei sorgt eine einwirkende Beschleunigung für die

[8] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Auslenkung der Sensor-Masse gegen eine verbundene Feder. Diese Verschiebung wird durch Ladungsverschiebungen in einem umgebenden E-Feld messbar. Aufgrund der tief im Fahrzeug verbauten Sensorik ist es schwierig, Beschleunigungen als solche im Gesamtfahrzeug zu stimulieren. Trotzdem zeigen Untersuchungen im Rahmen der Co-Betreuten Bachelorarbeit von Maximilian Knoll (2019)[9], dass dies technisch möglich ist. Zur Stimulation von außen muss auf die Messtechnik des Sensors Einfluss genommen werden, was in Abbildung 5.9 schematisch dargestellt ist. Wird das E-Feld im Sensor von außen durch ein stärkeres E-Feld überlagert, misst der Sensor eine Beschleunigung, obwohl keine vorliegt. Es liegen also nur die Ladungen im E-Feld des Sensors anders verteilt vor. Geladene Kondensator-Platten, welche von außen auf den Sensor einwirken, sind in diesem Zusammenhang in der Lage, eine solche Manipulation des Sensor-E-Felds zu ermöglichen. Ein verwandtes Vorgehen wird zur Bestimmung von E-Feldstärken durch das Einbringen eines MEMS-Sensor in das E-Feld beschrieben (Kainz et al., 2018).

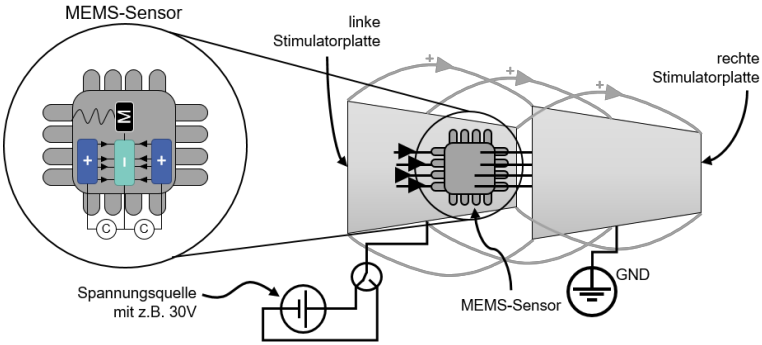


Abbildung 5.9: Aufbau zur Stimulation eines Beschleunigungssensors

c. Betrachtung des Rollenprüfstands

Aus Sicht der Stimulation von Sensoren stellt der Rollenprüfstand eine besondere Lösung dar. Er kommt schon seit vielen Jahrzehnten in der Fahrzeugentwicklung zum Einsatz, wobei man ihn in dieser Funktion weniger als Stimulator gesehen hat. Werden Fahrzeugautomatisierungen mit einem Rollenprüfstand getestet, sorgt dieser meist für eine Stimulation der Fahrzeugräder und damit der Rad-Drehzahlsensoren sowie für geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstände, die sich

[9] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

entsprechend auf den Antriebsstrang auswirken. Die Drehzahlsensoren sind an jedem Rad angebracht und ermitteln über die Drehung der Radachsen radindividuelle Drehzahlsignale. Diese Informationen werden z.B. für ESP-Funktionen genutzt. In Verbindung mit dem dynamischen Rollradius (Reif, 2012) wird die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Der Kontakt zwischen Reifen und Rolle ist dabei die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Umgebung. Es werden also Bedingungen für den Sensor geschaffen, bei denen er möglichst nicht zwischen Fahrt auf der Straße und Betrieb auf dem Rollenprüfstand unterscheiden kann. Differenzen in den gemessenen Raddrehzahlen können eine Kurvenfahrt simulieren (Düser & Hettel, 2016) oder signalisieren einen ungewöhnlichen Fahrzustand welcher ungewünschte ESP-Eingriffe zur Folge hat.

5.1.6. Einbindung in Restumgebung mit Integration des Rollenprüfstands

a. Anforderungen & Eigenschaften

Der Rollenprüfstand ist ein etabliertes Werkzeug bei der Antriebsstrangentwicklung. Aus Sicht einer Sensorstimulation greift dieser über die Fahrzeugräder am Antriebsstrang an und stimuliert diesen etwa durch das Stellen von geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderständen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass Probleme mit dem ESP vermieden werden. Diese können auftreten, wenn das Fahrzeug unrealistische Drehzahldifferenzen zwischen den einzelnen Rädern erfasst. Tritt ein solcher Zustand auf, etwa als Drehzahldifferenz zwischen Vorder- und Hinterachse, reagiert das Fahrzeug zunächst mit einem ESP-Eingriff und deaktiviert als nächstes alle Fahrzeugautomatisierungen. Der fahrzeugseitige „Rollen-Prüfstandsmodus“ würde zwar das ESP-System ausschalten, allerdings deaktiviert er auch alle Assistenzsysteme, sodass dies das Problem nicht löst.

Beim Wechsel von der Teststrecke mit Asphalt auf die Rollen des Prüfstands, kann das Fahrzeug ohne umfangreiche Veränderungen direkt von der Straße in der Prüfstandsumgebung betrieben werden. Der Reifen-Asphalt bzw. Reifen-Rollen-Kontakt ändert sich und muss je nach Untersuchung entsprechend berücksichtigt werden.

Der Prüfstand bringt auch eine Fixierung zur Abstützung der Längs- und Querkräfte mit sich. Dazu kann es sinnvoll sein, je nach zu erwartenden Kräften aus den Beschleunigungen und Verzögerungen stärkere Fahrzeugfixierungen zu verwenden. Die Tests im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die auftretenden Kräfte bei Untersuchungen an einem ACC-System üblicherweise mit einer Fixierung über die Abschleppösen ausreichend abgestützt werden können. Bei Szenarien mit Notbremsmanövern unter Einsatz des AEB-Systems können schnell Verzögerungen um 4 m/s² und größer auftreten. Für diese Bedingungen

werden die zwei Fixierungspunkte der Abschleppösen durch die Radnabenfixierung mit ihren vier Angriffspunkten am Fahrzeug ersetzt.

b. Schnittstellen

Die Einbindung des Rollenprüfstands in den Gesamtverbund der Validierungsumgebung kann als Stand-alone-Betrieb mittels Regelung als Straßensimulation oder durch den Datenaustausch mit der virtuellen Umweltsimulation erfolgen.

Im Stand-alone-Betrieb arbeitet der Rollenprüfstand im Modus „Straßensimulation". Dieser stellt basierend auf einer Ausrollkurve geschwindigkeitsabhängig Fahrwiderstände ein. Liegt im Szenario allerdings weitere aus der Umwelt resultierende Fahrwiderstände vor, etwa Steigungen, können diese vom Rollenprüfstand nicht berücksichtigt werden.

Erst durch den digitalen Austausch mit der Umweltsimulation können beispielsweise Steigungswiderstände oder Gegenwind abgebildet werden. Zu diesem Zweck wird das dynamische Geschehen der virtuellen Umwelt zum Prüfstand in Echtzeit als digitales Signal zum Beispiel über eine serielle Schnittstelle übertragen.

Für den Rollenprüfstand kann festgehalten werden, dass dieser viele Vorteile in die Validierungsumgebung mit einbringt. Dazu zählt neben der oben bereits erwähnten schnellen Einsatzbereitschaft auch eine gute Wiederholbarkeit von Fahrmanövern. Zusätzlich bietet er eine Umgebung, in der unter sicheren Umgebungsbedingungen Manöver im Grenzbereich, beispielsweise bei hohen (Relativ-)Geschwindigkeiten, untersuchbar sind. So können deutlich einfacher Corner-/Edge-Cases untersucht und beispielsweise Anforderungen für neue Produktgenerationen abgeleitet werden. Schließlich bietet er eine höhere Zeiteffizienz bei der Versuchswiederholung, die durch die schnelle Parametervariation, ohne aufwändige Konditionierung einer Teststrecke oder anderer Manöverteilnehmer (Düser et al., 2011) erreicht wird.

5.1.7. Signalübertragung und -wandlung zwischen den Elementen der Umgebung

Die neue Validierungsumgebung besteht neben den drei zentralen Elementen, Umweltsimulation, Stimulatoren und Rollenprüfstand auch aus einer verbindenden Infrastruktur. Hierfür verwendet man entweder das CAN-Bus-System oder Netzwerktechnologie als Ethernet per Kabel beziehungsweise drahtlos über WLAN (Wireless Local Area Network). Das folgende Kapitel soll die Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologien beim Aufbau der neu gestalteten Validierungsumgebung vorstellen.

a. CAN

Als Übertragungstechnik, die größtenteils im Fahrzeug zum Einsatz kommt, bietet CAN viele Möglichkeiten zur Dateninjektion direkt in das Fahrzeug. Dabei werden Signale statt von einem Steuergerät des Fahrzeugs direkt aus der virtuellen Umweltsimulation generiert. Nach einer Transformation des Signals werden die Signale im Format der fahrzeugeigenen Kommunikation in den Daten-Bus des Fahrzeugs eingespeist. Somit ist eine Differenzierung zwischen Signalen von Steuergeräten oder aus der Umweltsimulation für das Fahrzeug nicht möglich. Dieses Vorgehen setzt natürlich Kenntnis über die CAN-DBC mit dem Wissen über das genaue Format der jeweiligen CAN-Botschaften voraus.

Neben der Dateninjektion am Fahrzeug kann CAN auch bei der Übermittlung von Geschwindigkeits- oder Drehzahlsignalen auf Prüfständen verwendet werden. Gerade größere Systeme wie der Rollenprüfstand bieten eine CAN-Schnittstelle, welche über wichtige Informationen wie Drehzahlen und Momente an den Rollen verfügen. Hierdurch kann recht einfach auch ein benötigtes Messsystem mit an den Prüfstand angeschlossenen werden, sodass ohne großen Konfigurationsaufwand (etwa von Netzwerk-Adressen) direkt auf die Informationen zugegriffen werden kann.

b. Ethernet (TCP/IP oder UDP)

Als Technologie zur Vernetzung vieler und über weite Distanzen entfernte Geräte ist Ethernet heutzutage stark verbreitet. Der flexible Aufbau und eine hohe Übertragungsrate mit geringen Signalverzögerung stellen zentrale Vorteile der Verbindung per Ethernet dar. Darauf aufbauend werden Informationen durch unterschiedliche Protokolle übertragen. Soll dies besonders schnell geschehen, kann UDP ohne Paketprüfungen und Empfangsbestätigungen gerade bei echtzeitkritischen Übertragungen verwendet werden. TCP/IP hingegen bietet die Funktion einer Übertragungskontrolle, wodurch sich dieses Protokoll besser für Anwendungen eignet, bei denen es darauf ankommt, dass alle Informationen stabil übertragen werden.

Neben der lokalen Vernetzung, beispielsweise in einer räumlich begrenzten Prüfstandsumgebung, lassen sich auch weit entfernte Komponenten durch die unkomplizierte Einbindung per Internet und VPN erreichen. Siehe dazu den Forschungsbericht 130 des IPEK - Institut für Produktentwicklung von Steven Yan (Yan, 2020) sowie dessen Beitrag auf der FISITA 2016 (Albers, Yan & Behrendt, 2016) zum Aufbau vernetzter Validierungsumgebungen. Aufgrund der großen

Verbreitung von Ethernet besteht eine breite Auswahl an unterschiedlichen Geräten, die direkt mit einer Ethernet-Schnittstelle ausgestattet sind und damit schnell z.B. in eine Prüfstandsumgebung integriert werden können.

Als weit verbreitete Netzwerktechnologie gibt es Ethernet auch als drahtloses Netzwerk, dadurch kann man leicht zwischen einer kabelgebundenen Übertragung sowie einer solchen über WLAN wechseln.

c. WLAN

Beim Betrieb der Validierungsumgebung kann es von Vorteil sein, neben einer kabelgebundenen Vernetzung, auch drahtlos Komponenten einbinden zu können. Beispielsweise lassen sich Stimulatoren am Fahrzeug oder Geschwindigkeitswerte aus der Fahrzeugelektronik ohne Aufbau einer Kabelverbindung drahtlos einbinden. Diese Verbindung bringt allerdings längere Übertragungslaufzeiten sowie stärkere Schwankungen in der Übertragungsfrequenz (so genannte Jitter-Effekte) gegenüber einer kabelgebundenen Verbindung mit sich.

d. Wandlung zwischen CAN und Ethernet

CAN als Übertragungs-Technologie wurde nur zur Übertragung auf Strecken kürzer 10 Meter entworfen. Aus diesem Grund ist es notwendig, CAN-Botschaften mit einer passenden Technologie aus einem bewegten Fahrzeug und über weitere Distanzen zu übertragen. Sollen Signale über größere Strecken übermittelt werden, ist eine Wandlung in Ethernet zur Weiterleitung per IP-Netzwerk hilfreich. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen der Masterarbeit von Leonie Doldt (2018)[10] Untersuchungen an Mikrocontrollern durchgeführt. Entsprechend konfiguriert verfügen diese sowohl über CAN, als auch über Ethernet und können über eine USB-Schnittstelle in ihrer Funktion überwacht werden. Abbildung 5.10 zeigt einen solchen Aufbau ohne Gehäuse, wobei die Tochterplatinen zur Netzwerkkommunikation (1) und CAN-Kommunikation (2) zu erkennen sind.

[10] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

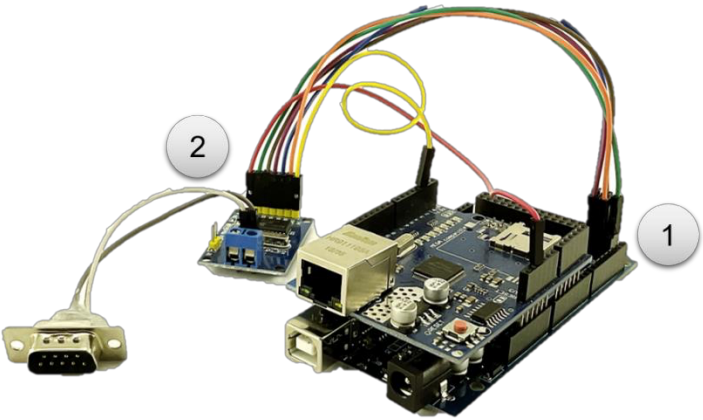


Abbildung 5.10: Mikrocontroller zur Übersetzung zwischen CAN und Ethernet

Mit zwei solcher Übersetzer-Controller, einmal CAN zu Ethernet und wieder zurück Ethernet zu CAN, lassen sich CAN-Botschaften über weite Distanzen ohne größere Laufzeitverlängerungen übertragen. Detaillierte Untersuchungen zum Laufzeitverhalten wurden in der Co-Betreuten Bachelorarbeit von Sören Raible (2020)[11] durchgeführt. Abbildung 5.11 zeigt eine solche Lösung im Gehäuse, was die Robustheit im Alltag erhöht. Auch eine Übersetzung direkt von CAN zu WLAN wurde entwickelt. Hierdurch kann das Geschwindigkeitssignal eines Testfahrzeugs drahtlos vom Testgelände an die virtuelle Umweltsimulation übertragen werden. Die dabei zu überbrückende Distanz lässt sich etwa durch eine Internetverbindung beliebig verlängern, sodass schlussendlich die virtuelle Umweltsimulation als Cloud-Lösung vollkommen Standortungebunden integriert werden kann.

Die hier vorgestellte Lösung zur Verarbeitung und Übertragung von CAN-Signalen via Ethernet und WLAN wird in Kapitel 6 wieder eingesetzt.

[11] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)



Abbildung 5.11:Entwickelte Vorrichtung zur Übersetzung zwischen CAN und Ethernet, 1 CAN-Anschluss, 2 USB-Anschluss, 3 Stromversorgung, 4 Ethernet-Anschluss

5.2. Anwendung des Vorgehens für die Validierung der ultraschallbasierten Parkhilfe

Nachdem in Kapitel 5.1 das Vorgehen zum Aufbau einer Sensorstimulation für die Validierung von Fahrerassistenzsystemen auf Gesamtfahrzeugebene mit Hilfe des IPEK-XiL-Frameworks entworfen wurde, erfolgt eine erste Anwendung in Verbindung mit der ultraschallbasierten Einparkhilfe eines PKW. Dabei werden grundsätzlich zwei Ziele verfolgt. Einerseits wird die Verwendung des Vorgehens veranschaulicht und Erfahrungen aus der Anwendung zur Weiterentwicklung gesammelt. Andererseits wird das Validierungsziel des Vorgehens überprüft, sodass die Abstandsanzeige im Cockpit bei einem Parkmanöver benachbarte Hindernisse korrekt anzeigt. Im Folgenden wird nach den fünf Schritten aus Kapitel 5.1 verfahren.

5.2.1. Definition des Validierungsziels mit der Auswahl eines geeigneten Szenarios und der Gestaltung des Systemmodells „Umwelt“

Definition des Validierungsziels

Als erste Anwendung des entwickelten Vorgehens wird anhand eines einfachen Beispiels deren prinzipielle Anwendbarkeit sowie das Potential für die Validierung automatisierter Fahrfunktionen untersucht werden. Zu diesem Zweck wird als Validierungsziel die Überprüfung der korrekten Anzeige von umgebenden Objekten auf dem Mittendisplay des Cockpits angestrebt. Als zentraler Anspruch lässt sich

dieses Ziel auch wie folgt formulieren: „Zeigt das Mittendisplay des Egofahrzeugs bei langsamen Geschwindigkeiten umgebende Gegenstände korrekt an?“

Das definierte primäre Validierungsziel wird in mehrere Sekundärziele gegliedert, welche Erkenntnisse über die technische Umsetzbarkeit und potenzielle Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugsystem und Validierungsumgebung aufzeigen:

- Lässt sich die Ultraschall-Sensorik am Gesamtfahrzeug konstant sowie reproduzierbar stimulieren?
- Werden die Umweltinformationen aus der virtuellen Simulation über mehrere Sensoren hinweg konsistent vom Fahrzeug wahrgenommen?
- Wirkt die Stimulation der Ultraschall-Sensorik in Kombination mit dem Rollenprüfstand so auf das Fahrzeug, dass dieses die umgebenden Fahrzeuge, wie von der physischen Umgebung bekannt, im Mittendisplay anzeigt?

Auswahl eines geeigneten Szenarios

Nachdem das Validierungsziel festgelegt wurde, wird ein geeignetes Szenario definiert. Das Ziel dabei ist die Überprüfung der Objekterkennung im Nahbereich. Dazu eignet sich ein Parkmanöver quer zur Fahrtrichtung, welches aus drei Phasen besteht:

1. Anfahrt zur Parklücke
2. Einfahrt in den Parkplatz (Erkennung und Anzeige benachbarter Fahrzeuge)
3. Fahrt bis zum Erreichen der finalen Parkposition (Erkennung und Anzeige der Parkplatzbegrenzung)

In Phase eins wird das Egofahrzeug manuell mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 3 km/h bis zur freien Parklücke gefahren. Hierdurch wird die grundsätzliche Interaktion hinsichtlich der Bewegung und Ortsänderung zwischen Fahrzeug und virtueller Umweltsimulation sichergestellt. Somit werden im ersten Teil des Manövers immer gleiche Bedingungen zum Eintritt der zweiten Manöver-Phase geschaffen. In diesem Teil des Manövers wird durch die Ultraschallsensorik erst das Fahrzeug auf dem linken benachbarten Parkplatz und im Anschluss eine Begrenzungsmauer an der Stirnseite erfasst. Zuletzt erfolgt die Vorausfahrt zum Erreichen der finalen Parkposition, bei der alle Sensoren an der Front gleichermaßen den Abstand zur Begrenzungsmauer erfassen. Abbildung 5.12 zeigt Bilder der drei Phasen des Manövers. Dabei ist aus dem Versuchsfahrzeug auf eine Leinwand vor dem Fahrzeug fotografiert, sodass das Mittendisplay im Armaturenbrett und eine Übersicht zur aktuellen Situation im Szenario aus der

virtuellen Umweltsimulation auf der Projektionsfläche davor zu sehen ist. In der Simulation werden die Erfassungsbereiche der Abstandssensoren hellblau angezeigt. Der physische Gesamtaufbau wird in Kapitel 5.2.3 beschrieben und ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

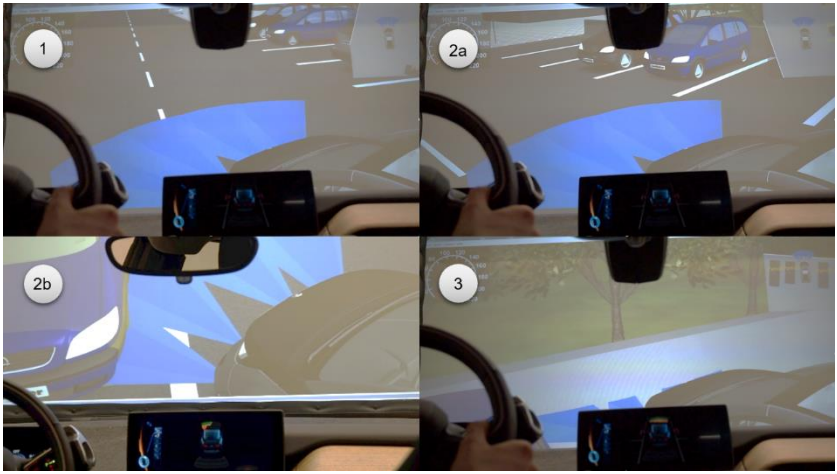


Abbildung 5.12: Eindrücke vom gefahrenen Manöver. Anfahrt zur freien Parklücke (1); Einfahrt in den Parkplatz (2a & 2b) und Erreichen der finalen Parkposition vor einer den Parkplatz begrenzenden Mauer (3)

Gestaltung des Systemmodells „Umwelt“

Die Umwelt wird physisch durch den vorhandenen Rollenprüfstand und die im nächsten Kapitel näher erörterten Stimulatoren der Ultraschallsensoren geprägt. Aus diesem Grund wird im Folgenden genauer auf die virtuelle Umweltsimulation und deren Gestaltung eingegangen. Diese muss neben dem gewünschten Manöver, zum Erreichen des Validierungsziels, die Umweltbedingungen mit Straßenverlauf und Parkplatzanordnung sowie den anderen geparkten Fahrzeugen zur Verfügung stellen. Darüber hinaus muss die Kommunikation mit dem Rollenprüfstand und der Ultraschallstimulation in Echtzeit erfolgen. Dazu verfügt die Simulationslösung über einen echtzeitfähigen Linux-basierten Host-Computer, welcher per CAN die Rollengeschwindigkeit vom Prüfstand einbindet und per UDP die Abstände der Abstandssensoren an die Stimulatoren sendet. Die Rollengeschwindigkeit wird dabei als Geschwindigkeit der Reifen des Egofahrzeug-Modells verwendet. Die virtuellen Abstandssensoren in der Frontstoßstange

verfügen über den typischen Erfassungswinkel von Ultraschallsensoren und haben 3 Meter Reichweite.

5.2.2. Konzeption der Ultraschall-Stimulation

a. Vorgehen und Anforderungen an Ultraschall-Stimulation abgeleitet aus Kapitel 5.1

Eine prototypische Untersuchung zur Stimulation der Ultraschallsensoren des BMW i3 wurde 2016 als Masterarbeit des Autors dieser Arbeit verfasst (Lutz, 2016)[12]. Aufbauend auf dieser Forschung werden weiterführende Schritte hin zur Integration in eine Validierungsumgebung in Verbindung mit dem Rollenprüfstand unternommen (Lutz, Hettel, Albers, Behrendt & Schyr, 2018) (Albers, Lutz, Behrendt, Düser & Hettel, 2017). Details über das Stimulationsprinzip sind dieser Arbeit entnommen.

Ultraschallsensoren messen als indirekte Umwelterfassung basierend auf dem Time-of-Flight-Prinzip Abstände. Beispielsweise wird ein Ultraschall-Impuls mit 40 kHz Frequenz für die Dauer von 0,4 ms (Lutz, 2016)[13] von einem Emitter ausgesendet. Objekte in der näheren Umgebung bis 3 Meter reflektieren dieses Signal zurück zum Receiver. Aufgrund der bekannten Schallgeschwindigkeit von ungefähr 340 m/s kann aus der Zeitspanne zwischen Aussenden und Empfang der Reflexion auf den Abstand zum nächstgelegenen Objekt geschlossen werden.

Soll nun ein Stimulator virtuelle Hindernisse dem Sensor vermitteln, muss dieser nach Kapitel 5.1 in vier Schritten entwickelt werden:

i. Detektion:

Es müssen die vom Sensor ausgesendeten Ultraschall-Impulse detektieren werden können. Diese Aufgabe wird vom Ultraschall-Receiver des Stimulators übernommen.

ii. Absorption:

Neben dem Detektieren der vom Fahrzeug ausgesendeten Impulse, müssen diese auch daran gehindert werden, wieder zum Fahrzeug reflektiert zu werden. Bei

[12] Abschlussarbeit des Autors (unveröffentlicht)
[13] Abschlussarbeit des Autors (unveröffentlicht)

Schall kann dies durch Absorption an einer offenporigen Oberfläche erreicht werden.

iii. Aussenden:

Als dritter Schritt der Stimulation werden vom Stimulator Ultraschall-Impulse neu erzeugt. Diese müssen dieselbe Charakteristik, beispielsweise Wellenlänge und Dauer, wie die Sensor-Impulse aufweisen. Nun kann durch die Pausenzeit zwischen Empfangen des Sensor-Impulses und Aussenden des Stimulator-Impulses die simulierte Entfernung zum virtuellen Hindernis vermittelt werden.

iv. Ausrichtung und Kalibrierung:

Im letzten Schritt wird die Ausrichtung der Stimulation auf das Fahrzeug eingestellt und mit den vom Fahrzeug wahrgenommenen Abständen kalibriert. Dabei wird der Stimulator so nah wie möglich an den Fahrzeugsensoren positioniert, um die Zeitverzögerung durch den Weg des Schalls gering zu halten. Auch die Signal-Verarbeitungszeit im Stimulator zwischen Detektion eines Fahrzeugimpulses und dem Ausstoßen des Stimulations-Impulses verlängert den kürzest möglichen Abstand der Stimulation und sollte deshalb möglichst klein gehalten werden. Bei der Kalibrierung wird überprüft, ob der stimulierte Abstand auch dem vom Fahrzeug wahrgenommenen Abstand entspricht.

b. Ultraschall-Receiver/Emitter

Der Ultraschall-Receiver muss möglichst störungsfrei Ultraschall im gängigen Frequenzbereich von 40 kHz in elektronische Impulse übersetzen. Abbildung Abbildung 5.13 zeigt eine solche Empfangs-, Auswerte- und Sendeeinheit. Dabei ist einmal darauf zu achten, dass die Empfangscharakteristik des Transceivers sowie die daran angeschlossene Verstärkerschaltung mit Bandpass genau den benötigten Frequenzbereich abdecken. Die so empfangenen (1) und analog aufbereiteten (3) Impulse werden dann von einer integrierten Auswerte-Logik (4) in digitale Signale gewandelt sowie interpretiert. Der detektierte Impuls löst die Wartezeit aus, welche die Laufzeit des Schalls zum entfernten Objekt repräsentiert.

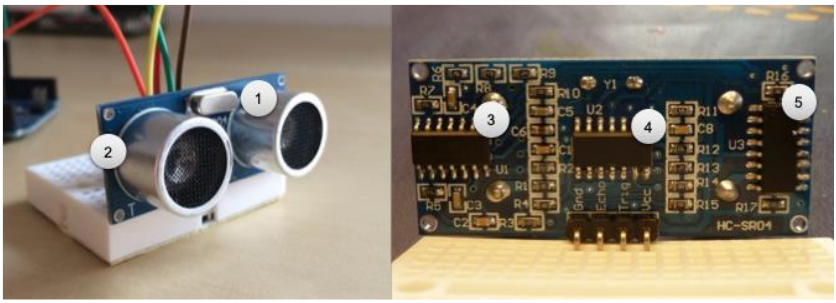


Abbildung 5.13: Ultraschall-Receiver-Emitter-Platine (HC-SR04) von vorne (links) und hinten (rechts) (Lutz, 2016)[14]

Nachdem die Wartezeit verstrichen ist, wird der Sendeimpuls analog verstärkt (5) und über den Emitter (2) ein Ultraschallsignal in der gleichen Form, wie die des Fahrzeug-Impulses, ausgesendet. Das Fahrzeug nimmt den stimulierten Impuls auf und berechnet aus der verstrichenen Zeit zwischen Aussenden und Empfangen den Abstand zum entfernten Objekt aus.

c. Ultraschall-Absorption

Die Absorption von Ultraschall kann beispielsweise durch Melaminharz-Schaum, beispielsweise Basotect der Firma BASF (BASF SE, 2016) erfolgen. Hierbei sorgen eine offenporige Oberflächen-Form und Material-Steifigkeit dafür, dass Schallwellen absorbieren werden. Abbildung 5.14 zeigt die in den Ultraschall-Stimulator eingebrachten Schaumflächen. Dabei ist auf den Bildern 1 und 2 der offene Stimulator dargestellt.

Ein so beschaffener Absorber kann neben der Anwendung im Stimulator auch dazu verwendet werden, auf einem Rollenprüfstand die Ultraschall-Sensorik eines Fahrzeugs von Prüfstandsaufbauten abzuschirmen. Diese Verwendung ist in Bild 4 zu sehen. Damit lassen sich Reflexionen vermeiden, welche zum Beispiel die Fahrzeugfixierung erzeugt und damit das Fahrzeug eine Dauerwarnung anzeigt.

[14] Abschlussarbeit des Autors (unveröffentlicht)

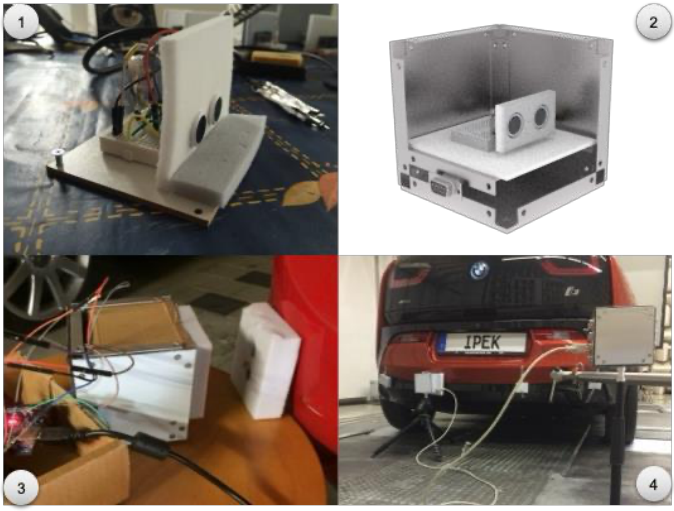


Abbildung 5.14: Ultraschallstimulator mit Schallabsorbern im Aufbau (1 & 2) und am Fahrzeug (3 & 4) (Lutz, 2016)[15]

d. Austauschschnittstellen des Ultraschall-Stimulatoren-Verbunds

Der Einparkassistent basiert auf mehreren Ultraschall-Sensoren, welche in den Stoßfängern und den vorderen Radhäusern eingebaut sind. Eine Validierungsumgebung dafür umfasst deshalb mehrere Stimulatoren. Jeder Fahrzeug-Sensor bekommt über einen eigenen Stimulator Abstände aus der virtuellen Umweltsimulation vermittelt. Der so aufgebaute Verbund aus Ultraschall-Stimulatoren muss möglichst verzögerungsfrei mit den zu stimulierenden Abständen aus der Umweltsimulation versorgt werden. Dazu können die Stimulatoren beispielsweise direkt per USB mit der virtuellen Umweltsimulation verbunden werden. Um gleich mehrere Stimulatoren über eine Verbindung aus der Umweltsimulation einzubinden, wird ein einfaches Mikrocontroller-Austausch-Protokoll namens I^2C (NXP Semiconductors, 2021) verwendet. Dieses ermöglicht die unkomplizierte Vernetzung der einzelnen Mikrocontroller in den Stimulatoren. Der aufgebaute Verbund wird dann über einen zentralen Mikrocontroller als Gateway eingebunden. Dieser empfängt aus der Umweltsimulation per Ethernet/UDP alle zu stimulierenden Abstände und gibt diese per I^2C an den

[15] Abschlussarbeit des Autors (unveröffentlicht)

Stimulatoren-Verbund weiter. Auf diesem Weg kann das Ethernet-Netzwerk aus der Umweltsimulation beispielsweise bis zur Stoßstange des Fahrzeugs geführt werden, von wo es dann per I^2C auf die einzelnen Stimulatoren verteilt wird. Ein solcher Aufbau ist im Anhang als Schaltplan für vier Stimulatoren dargestellt.

e. Ausrichtung des Stimulators und Kalibrierung der stimulierten Abstände

Nach dem Vorgehen aus Kapitel 5.1 zum Aufbau einer Sensorstimulation muss im letzten Schritt der Stimulator auf den Fahrzeugsensor ausgerichtet und kalibriert werden. Abbildung 5.15 zeigt die Informationsflüsse und Wechselwirkungen bei diesem Vorgehen für die Ultraschallstimulation.

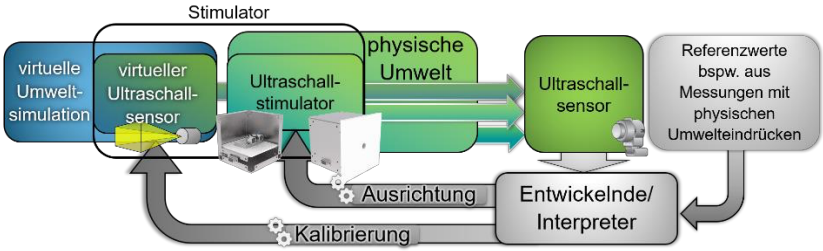


Abbildung 5.15: Wechselwirkungen bei der Ausrichtung und Kalibrierung der Ultraschallstimulation

Die genaue Ausrichtung der Stimulatoren auf die Fahrzeugsensoren ist besonders wichtig. Als letztes Glied der Informationsübertragung aus der virtuellen Umweltsimulation werden deshalb alle Eindrücke durch den Stimulator an den Fahrzeugsensor weitergeleitet. Hierdurch wirkt dieser als Übersetzer sowie als Filter, wodurch deren Übertragungseigenschaften und Positionierung von großer Bedeutung sind. Um negative Einflüsse möglichst gering zu halten, ist eine nahe Positionierung der Stimulatoren an die Ultraschall-Sensoren des Fahrzeugs notwendig. Somit werden störende Schallreflexionen im Bereich zwischen Sensor und Stimulator vermieden. Durch die direkte Positionierung vor dem Fahrzeugsensor wird auch der minimal mögliche Abstand der Stimulation verringert.

Zusätzlich zum physischen Aufbau müssen auch die digitalen Komponenten der Stimulation optimal auf das Fahrzeug ausgelegt sein. Dazu sollten die unvermeidbaren Signallaufzeiten zur Signalwandlung und Analyse minimal gehalten werden. Die Pausenzeiten im Stimulator werden auf die vom Fahrzeug wahrgenommenen Abstände kalibriert. Dabei wird einer eingestellten Pausenzeit ein vom Fahrzeug wahrgenommer Abstand zugeordnet. Da die restlichen

Komponenten der Gesamtlaufzeit konstant unabhängig von der variablen Pausenzeit sind, reicht es, zwei Pausenzeiten den beiden wahrgenommenen Abständen des Fahrzeugs zuzuordnen.

Zusammenfassend setzt sich die Laufzeit des stimulierenden Schalls wie folgt zusammen:

- Laufzeit aus Abstand zwischen Fahrzeugsensor und Stimulator
- Verarbeitungszeit im Stimulator
- Wartezeit im Stimulator zur Stimulation eines weiter entfernten Objektes
- Laufzeit des Stimulations-Ultraschall-Impulses vom Stimulator zum Fahrzeugsensor.

Abbildung 5.16 zeigt schematisch den Ablauf der Stimulation in zeitlicher Abfolge und stellt den daraus resultierenden Zusammenhang zwischen eingestellter Pausenzeit sowie vom Sensor wahrgenommenem Abstand dar.

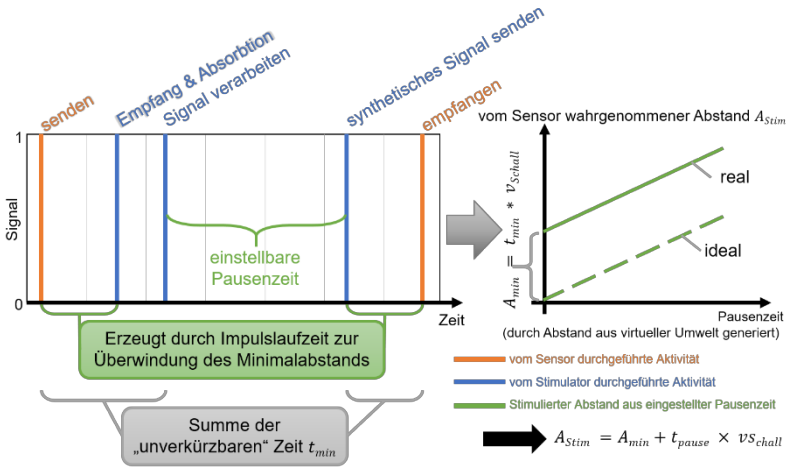


Abbildung 5.16: Zeitlicher Ablauf der Aktivitäten zwischen Sensor und Stimulator aus (Lutz, 2016)[16]

[16] Abschlussarbeit des Autors (unveröffentlicht)

5.2.3. Kombination von Rollenprüfstand mit Ultraschall-Stimulatoren und virtueller Umweltsimulation

Um das Gesamtfahrzeug mit Ultraschall-Einparksystem am Prüfstand validieren zu können, muss die Validierungsumgebung neben der Stimulation um eine virtuelle Umweltsimulation und mindestens einen Prüfstand zur Längsbewegung des Fahrzeugs ergänzt werden. In den Untersuchungen am Institut kam dazu ein Rollenprüfstand zum Einsatz, welcher in Kapitel 4.1.2 genauer beschrieben wurde. Die Radbewegung wird benötigt, da die Parkvisualisierung neben den Ultraschall-Abständen auch die Raddrehzahl zur Abstandsmessung auswertet. So hat sich gezeigt, dass Hindernisse auch dann noch angezeigt werden, wenn die Stimulation der Ultraschallsensoren plötzlich aufhört. Bewegte sich in solchen Situationen das Fahrzeug weiter, veränderten sich die Abstände der Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend.

In einer so aufgebauten Validierungsumgebung können die Potentiale einer solchen Lösung für den Übertrag auf andere Fahrzeugautomatisierungen ermitteln und die Anwendung von Sensor-Stimulatoren in Kombination mit dem Rollenprüfstand untersucht werden.

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 ausgeführt, lassen sich auf einem Rollenprüfstand keine Lenkbewegungen realisieren. Folglich werden diese in den hier durchgeführten Untersuchungen rein virtuell umgesetzt.

Da die Szenarien alle in der Ebene gefahren werden, reicht es, wenn die Fahrwiderstände aus der Straßensimulation des Rollenprüfstands generiert werden und sich die Kommunikation zwischen Prüfstand und Umweltsimulation auf den Austausch der momentanen Rollengeschwindigkeit begrenzt. Durch den Rollenprüfstand ermittelt das Fahrzeug eine Bewegungsgeschwindigkeit, welche auch bei der Ermittlung von Abständen zu umgebenden Hindernissen berücksichtigt wird. Bewegt sich das Fahrzeug etwa mit einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s auf ein Hindernis zu, würde diese Bewegung auch in der Anzeige das Hindernis näherkommen lassen. Die Ultraschall-Stimulation wird per Ethernet/UDP aus der Umweltsimulation mit den Abständen zu umgebenden Objekten versorgt. Dabei repräsentieren einfache Abstandssensoren mit einem Erfassungsbereich von 30° horizontal und 20° vertikal die Erfassungscharakteristik im virtuellen Sensormodell. Der so konfigurierte Aufbau wird dann mit Szenarien aus typischen Einparksituationen getestet, wobei die vom Fahrzeug ermittelten Abstände zu umgebenden Objekten beobachtet werden. So lässt sich die Fahrzeugerfassung mit den aus der virtuellen Simulation erhobenen Abständen vergleichen und die Qualität der Validierungsumgebung bewerten. Ein so gestalteter Aufbau ist in Abbildung 5.17 dargestellt.



Abbildung 5.17: Kombination der Ultraschallstimulation am Frontstoßfänger mit dem Rollenprüfstand am Versuchsfahrzeug BMW i3

5.2.4. Weiterentwicklung des Vorgehens aus der Anwendung auf das Ultraschall-Einparksystem

Die Weiterentwicklung des Vorgehens durch den exemplarischen Aufbau einer Validierungsumgebung für das Ultraschall-Einparksystem hat gezeigt, dass die Verwendung des Rollenprüfstands in Kombination mit einer Sensorstimulation erfolgreich das Verhalten des Gesamtfahrzeugs aus der physischen Umgebung reproduzieren kann.

Als Erfahrungen aus der ersten Anwendung kann festgehalten werden, dass der prinzipielle Ablauf zum Ziel führt. Durch die praktische Realisierung am Ultraschall-Einparksystem lassen sich zusätzliche Erkenntnisse für weitere Anwendungen ziehen:

- Die Schnittstellen zwischen der Umweltsimulation und den restlichen Komponenten der Validierungsumgebung sollten möglichst universell

gewählt werden. Beispielsweise kann statt einer direkten Verbindung per USB die Verwendung einer Netzwerkschnittstelle (Ethernet oder CAN) auch einen schnellen Datenaustausch gewährleisten, aber sich zusätzlich einzelne Bestandteile, wie einzelne Stimulatoren, schnell hinzufügen oder auswechseln lassen. Darüber hinaus kann man diese Übertragungstechnik gleichzeitig für mehrere Komponenten benutzen, was den Aufbau rund um das Fahrzeug vereinfacht, und auch drahtlose Lösungen per WLAN integriert werden können.

- Die Stimulation ist in der Lage, Fahrzeugreaktionen reproduzierbar und ohne Eingriff in die Elektronik auszulösen. Dabei muss allerdings die Ausrichtung und Kalibrierung als fester Bestandteil der Stimulationsentwicklung angesehen werden und somit einen entsprechenden Stellenwert in dem Vorgehen einnehmen.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann das Vorgehen exemplarisch bei der Validierung eines kamerabasierten Assistenzsystems eingesetzt werden. Damit steigen die Anforderungen an die Stimulation hinsichtlich eines aufwändigeren Fahrzeugsystems, bei dem der stimulierte Eindruck mehrdimensional und damit aufwändiger bei der Ausrichtung und Kalibrierung ist. Überdies wird auch die Umweltsimulation schneller auf Änderungen des Fahrzeugzustands reagieren, da die Bildwiederholrate der Kamera mit 60 Hz Umweltveränderungen im Gegensatz zum Ultraschallsystem höherfrequent abfragt. Dabei muss der geschlossene Regelkreis aus Fahrzeug-Längsregelung und Umweltsimulation bei höheren Geschwindigkeiten entsprechend stabil sein. Andernfalls beendet die Fahrzeugsteuerung die Automatisierung.

5.3. Weiterentwicklung des Vorgehens zur Stimulation der Kamera-Sensorik

Definition des Validierungsziels

Bei Fahrten mit dem Testfahrzeug in Herbst oder Frühjahr, kann beobachtet werden, dass das ACC-System sporadisch ausfällt. Dies wird z.B. durch die früher einsetzende Dämmerung hervorgerufen, bei der die tiefstehende Sonne die Kameraerfassung blendet. Andererseits stößt die Umwelterfassung bei Dunkelheit an Grenzen, wenn Objekte nur noch spät oder gar nicht durch bekannte Objektmerkmale, wie Schatten unter dem Fahrzeug oder die Heckansicht, erkannt werden. In solchen Situationen muss der Fahrende wieder vollständig die Längsregelung übernehmen. Eine Validierungsumgebung mit entsprechender

Kamerastimulation soll Untersuchungen am Verhalten der Fahrzeugautomatisierung und die Nachstellung von Szenarien mit Abenddämmerung erlauben. Das zugehörige Validierungsziel wird wie folgt benannt: „Kann das monokamera-basierten ACC-System auf dem Rollenprüfstand mit einer geeigneten Stimulation verwendet und Verhalten von der Straße, gerade hinsichtlich einer Objekterkennung bei Dämmerung, in dieser Umgebung reproduziert werden?“

Dabei werden neben dem primären Validierungsziel bei der Entwicklung einer passenden Umgebung folgende sekundäre Ziele verfolgt:

- Wie muss eine geeignete Validierungsumgebung beschaffen sein?
- Verhält sich das Versuchsfahrzeug in der neu geschaffenen Umgebung bei Folge- oder Auffahrten, wie von der Fahrt auf der Straße bekannt?
- Lässt sich das Verhalten unter einschränkenden Umweltbedingungen (zum Beispiel Dämmerung) mit Hilfe einer Sensorstimulation reproduzieren?

Auswahl eines geeigneten Szenarios

Die kamerabasierte Längsregelung wird heutzutage für Assistenzfunktionen wie den geschwindigkeitsabhängigen Regeltempomaten (ACC-System) oder eine Notbremsfunktion (AEB-System) häufig verwendet. Dabei bringen die Randbedingungen aus dem Szenario auch Konsequenzen für die Validierungsumgebung und damit steigende Anforderungen mit sich. Beispiele dazu werden in Kapitel 5.1.2 vorgestellt.

Ein Manöver, welches die neu entwickelten Funktionen überprüfbar machen soll, muss demnach über Phasen für jede der Funktionszustände der Systeme verfügen. Für das ACC-System sind das beispielsweise die folgenden:

- Geschwindigkeitsgeregelter Betrieb
  (Geschwindigkeit bei freier Fahrt halten)
- Abstandsgeregelter Betrieb
  - Auffahren
    (Annähern mit höherer Geschw. an Target-Fahrzeug)
  - Abstand konstant halten
    (Abstand in Abhängigkeit zur Target-Geschwindigkeit hinsichtlich eines vom Fahrer vorgewählten Sicherheitsabstands regeln)
  - Bei Verzögerung des Target-Fahrzeugs Geschwindigkeit und damit Abstand anpassen
  - Bei Beschleunigung des Target-Fahrzeugs Geschwindigkeit und damit Abstand anpassen

Das AEB-System löst bei plötzliche Verzögerung des Target-Fahrzeugs aus. Nach ISO 22179 lässt das ACC-System Verzögerungen von maximal 2,5 m/s² zu. Das AEB-System ist deshalb erst für Verzögerungen größer 2,5 m/s² verantwortlich. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde das in Abbildung 5.18 dargestellte Geschwindigkeitsprofil für das Target-Fahrzeug definiert.

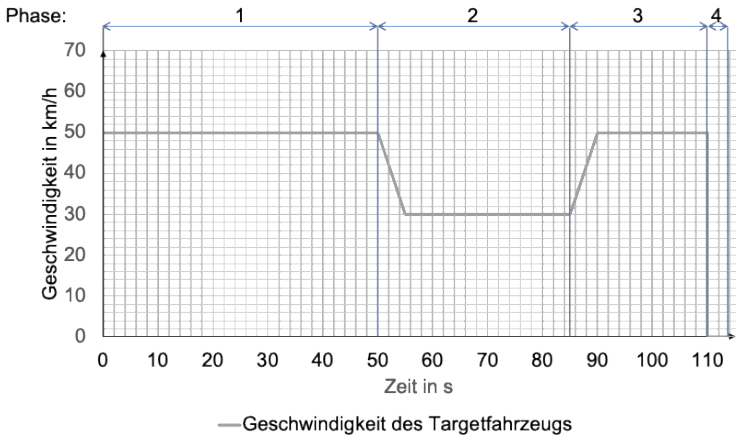


Abbildung 5.18: Geschwindigkeitsprofil des Target-Fahrzeugs für das Manöver einer ersten Kamerastimulation des ACC-Systems

Phase 1: Das Target-Fahrzeug fährt für 50 Sekunden konstant 50 km/h. Diese Phase dient zur Konditionierung der Manöver-Ausgangssituation. Hier wird das Egofahrzeug manuell auf die Setzgeschwindigkeit, etwa 60 km/h, beschleunigt und fährt im Anschluss kurz geschwindigkeitsgeregelt. Damit wird der ordnungsgemäße Betrieb auf dem Rollenprüfstand sichergestellt, bevor mit der Reaktion auf das Target-Fahrzeug die Kamerastimulation einsetzt. Nachdem der Abstand zum Target-Fahrzeug verringert ist, schaltet das ACC-System in den Abstandsgeregelten Betrieb und nähert sich dem Target-Fahrzeug bis ein konstant bleibender Abstand eingestellt ist. Hierbei kann beobachtet werden, welcher Abstand für diese Geschwindigkeit vom ACC-System eingestellt wird, und ob damit das beobachtete Verhalten von der Straße wiedergegeben werden kann.

Phase 2: Das Target-Fahrzeug verzögert innerhalb von 5 Sekunden auf die Zwischengeschwindikgeit von 30 km/h und hält diese für 30 Sekunden. Das Egofahrzeug verzögert nach einer kurzen Reaktionszeit ebenfalls auf 30 km/h und stellt dabei einen neuen, kürzeren, Folgeabstand ein. Auch hier gilt besonderes Augenmerk auf den Abstand, den das ACC-System bei der nun geringeren Geschwindigkeit, zum Target-Fahrzeug einstellt. Somit stehen zwei eingeregelte Betriebspunkte des ACC-Systems für den anschließenden Vergleich zur Verfügung.

Phase 3: Das Target-Fahrzeug beschleunigt in 5 Sekunden wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h und hält diese Geschwindigkeit für 20 Sekunden. Nach einer kurzen Reaktionszeit beschleunigt das Egofahrzeug auf die Geschwindigkeit des Target-Fahrzeugs und regelt wieder den Folgeabstand auf den abstandsgeregelten Wert aus Phase 1. Die wiederholte Fahrt mit 50 km/h zeigt, wie reproduzierbar das ACC-System den Folgeabstand bei gleicher Folgegeschwindigkeit wie in Phase 1 einstellt.

Phase 4: Das Target-Fahrzeug bleibt abrupt stehen. Das Egofahrzeug leitet eine Verzögerung ein und kommt nach einer virtuelle Kollision mit dem Target-Fahrzeug zum Stillstand. Der plötzliche Stillstand des Target-Fahrzeugs fordert eine möglichst schnelle Reaktion des Egofahrzeugs. Somit kann beobachtet werden, wie schnell das Assistenzsystem die Geschwindigkeitsänderung erfasst und mit welcher Verzögerung im Anschluss maximal auf die Situation reagiert wird.

Gestaltung des Systemmodells „Umwelt“

Für die angestrebten Validierungsaktivitäten wird das Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand fixiert und der Kamerastimulator vor dem Fahrzeug montiert. In der virtuellen Umweltsimulation wird zusätzlich zum geraden Straßenverlauf das Geschwindigkeitsprofil des Target-Fahrzeugs hinterlegt. Dabei stehen die beiden Fahrzeuge zu Beginn knapp 30 Meter weit voneinander entfernt. Hierdurch ist

gewährleistet, dass in Phase 1 der Manöverdurchführung genügend Abstand zum Target-Fahrzeug für das Beschleunigen aus dem Stillstand sowie den geschwindigkeitsgeregelten Betrieb des Egofahrzeugs zur Verfügung steht. Neben der Umwelt wird auch die virtuelle Repräsentanz des Egofahrzeugs mit den benötigten virtuellen Sensoren konfiguriert. Dabei dient einerseits ein in der Frontschürze positionierter virtueller Radarsensor zur kontinuierlich Aufzeichnung des Abstands. Andererseits wird auch die virtuelle Kamera vor dem Fuß des virtuellen Innenspiegels in der Simulation festgelegt, sodass der erzeugte Bildeindruck dessen aus dem physischen Versuchsfahrzeugs entspricht.

5.3.1. Konzeption der Kamerastimulation

Zur Stimulation der Kamera muss ein Bildeindruck dargestellt werden, welcher einer Projektion der realen Umgebung auf dem Kamera-Sensor gleicht. Das dazu notwendige Bildmaterial kann aus einer virtuellen Umweltsimulation stammen. Zur Gewinnung der virtuellen Eindrücke wird ein Sensormodell eingesetzt, welches in diesem Fall eine virtuelle Kamera ist. Bei der Kalibrierung muss beispielsweise der virtuelle Blickwinkel hinsichtlich dem notwendigen Bildausschnitt eingestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit haben Untersuchungen zur Stimulation der Kamera zwei mögliche technische Umsetzungen näher betrachtet. Dabei wird als erste Lösung eine Projektionsleinwand mit Beamer vor einem Fahrzeug mit Mono-Kamera-basiertem Fahrerassistenzsystem aufgebaut, was in Abbildung 5.19 dargestellt ist. Basierend auf den so gesammelten Erfahrungen ist als zweiter Ansatz ein kompakter Kamerastimulator entwickelt worden. Dessen Aufbau in Abbildung 5.20 dargestellt ist. Beide Konzepte werden im Folgenden detaillierter vorgestellt.

a. Umweltsimulation durch Projektion auf eine Leinwand

Nach dem Stand der Forschung werden zur Funktionsüberprüfung von kamerabasierten Assistenzsystemen immer wieder Projektions-Lösungen als HiL-Umgebungen aufgebaut. Zum Einsatz am Gesamtfahrzeug als ViL deckt die Leinwand den typischen Erfassungsbereich der Kamera vor dem Fahrzeug oberhalb der Motorhaube ab. Somit besitzt sie bei einem Abstand von 0,4 m zwischen Leinwand und Frontstoßstange mindestens eine Breite von zwei Metern. Um die Projektion nicht durch das Fahrzeug zu beeinflussen, wurde eine rückwärtige Projektion verwendet. Da sich die Positionierung der Leinwand etwa in der Höhe von Fahrzeug zu Fahrzeug unterscheiden wird, muss sich diese individuell auf das Fahrzeug einstellen lassen. In diesem Zusammenhang spielt die Höhe des virtuellen Horizonts eine wichtige Rolle. Dieser sollte auf der Höhe der Fahrzeugkamera liegen, damit der dann projizierte Straßenverlauf von der Kamera wie die reale Straße wahrgenommen wird. Ein solcher Aufbau ist in Abbildung 5.19 zu sehen.

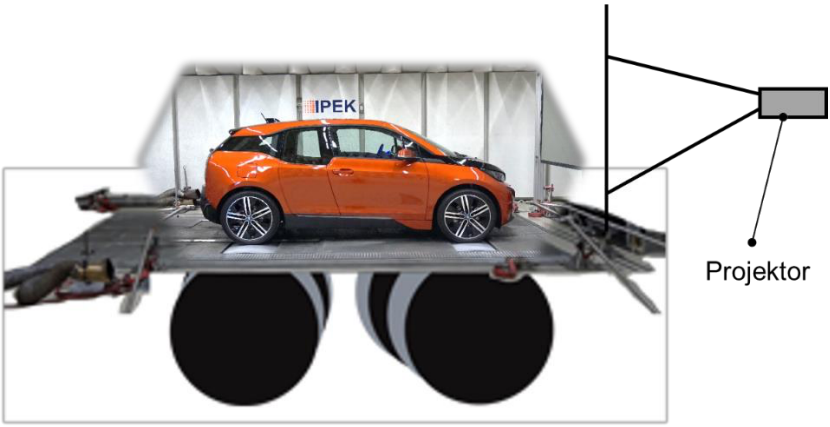


Abbildung 5.19: Prinzipieller Aufbau einer leinwandbasierten Kamerastimulation auf einem Rollenprüfstand

Mit der Einbindung einer virtuellen Umweltsimulation lässt sich die Darstellung über verschiedene Parameter in der virtuellen Welt einstellen. Von besonderer Bedeutung ist der virtuelle horizontale Blickwinkel, welcher als „Field of View“ (FoV) bezeichnet wird. Siehe dazu Kapitel 2.1.4 im Stand der Forschung. Die Position des physischen Stimulators muss ausgerichtet und das virtuelle Modell in der Umweltsimulation kalibriert werden.

Da der Aufbau jedoch vor dem Fahrzeug viel Raum einnimmt, konkurriert die Leinwand auf einem Rollenprüfstand mit der Fahrzeugkühlung. Selbst wenn der Luftstrom unter der Projektionsfläche durchgeführt werden kann, regt er schnell die Leinwand mit Schwingungen an, welche die Bilddarstellung stark beeinträchtigen. Neben den beengten Platzverhältnissen vor dem Fahrzeug stellt auch die Ausrichtung auf die Fahrzeugkamera eine große Herausforderung dar. So kann der Leinwandträger zwar verschoben und die Leinwand selbst in der Höhe verstellt werden, jedoch ist diese Positionierung immer aufwändig, da große Teile verstellt werden müssen. Zusätzlich zur allgemeinen Ausrichtung führen auch Bewegungen des Fahrzeugs auf dem Prüfstand, etwa durch Beschleunigungen oder Verzögerungen, zu einer veränderten Perspektive auf die Leinwand.

b. Kompakter Kamerastimulator

Eine Stimulation der Fahrzeugkamera wird bereits heute häufig eingesetzt. Gängige Ansätze dazu sind im Stand der Forschung und Technik in Kapitel 2.3.3 vorgestellt. Dort wird allerdings entweder eine Leinwand oder ein Bildschirm verwendet, welche beide mit Abstand zur Kamera angeordnet sind. Der kompakte Kamerastimulator verschiebt die bildgebende Ebene um wenige Zentimeter vor die Kamera. Ein solches Konzept ist in Abbildung 5.20 zu sehen. Dazu kann beispielsweise ein gängiges Display mit 5,7 Zoll Diagonale im 4:3 Seitenverhältnis als Grundlage dienen. Das Seitenverhältnis sowie die Auflösung des Panels orientiert sich dabei an den Anforderungen, welche sich aus der zu stimulierenden Kamera ergeben. Dabei führt ein üblicher Kamera-Blickwinkel in der Horizontalen von 30° ungefähr zu einem Abstand zwischen Kamera und Display von 30 Zentimetern. Bei dieser Entfernung kann es notwendig werden, ein Linsensystem vor das Panel ein zu bringen, sodass der Fokus der Kamera in den Nahbereich rückt und die Bildschirminhalte scharf abgefilmt werden können. Zum einfachen Anschluss an den bildgebenden Computer wird ein HDMI-Anschluss für höhere Auflösung bis 4k eingesetzt.

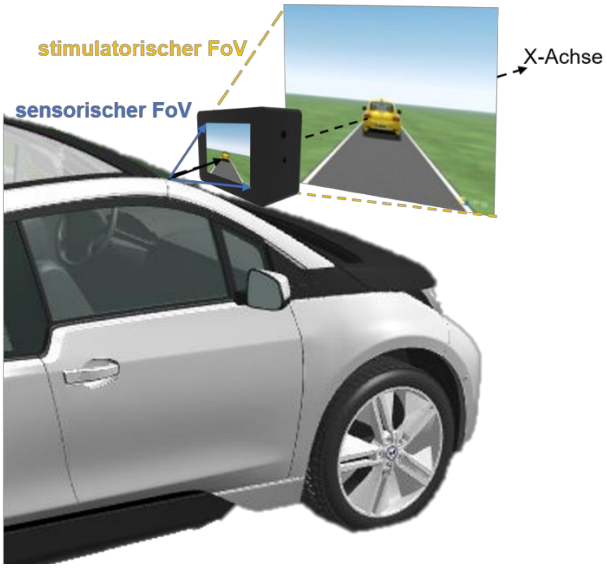


Abbildung 5.20: Prinzip des kompakten Kamerastimulators

5.3.2. Anwendung der Leinwand zur Stimulation des kamerabasierten ACC - Systems

Auf dem Akustikrollenprüfstand des IPEK wird im Rahmen dieser Arbeit eine Leinwand vor dem Versuchsfahrzeug so aufgebaut, dass die prinzipielle Machbarkeit einer Stimulation am Gesamtfahrzeug getestet werden kann. Erste Untersuchungen bieten Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit und geben Einblicke in die Wirkweise im Zusammenspiel mit dem Rollenprüfstand.

Als Szenario wird das zu Beginn in Kapitel 5.3 vorgestellte Geschwindigkeitsprofil verwendet. Abbildung 5.21 zeigt den so erfolgten Aufbau am Rollenprüfstand des IPEK.

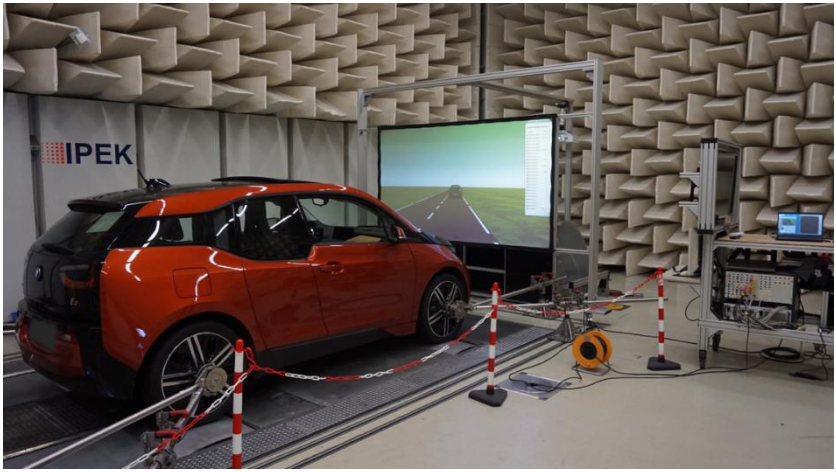


Abbildung 5.21: Rollenprüfstand mit Leinwand vor dem Versuchsfahrzeug zur Stimulation der Mono-Kamera

Mit dem so konfigurierte Aufbau lassen sich Messungen wie in Abbildung 5.22 aufzeichnen. Dabei zeigt sich, dass das ACC-System grundsätzlich auf das vorausfahrende Fahrzeug anspricht und von der Automatik ein Abstand zum anderen Verkehrsteilnehmer eingestellt wird. Bei einem Annähern mit 60 km/h auf das vorausfahrende Fahrzeug, welches 50 km/h schnell ist, verringert das ACC-System die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs auf die 50 km/h des Targets und stellt einen Abstand von ungefähr 40 Metern ein.

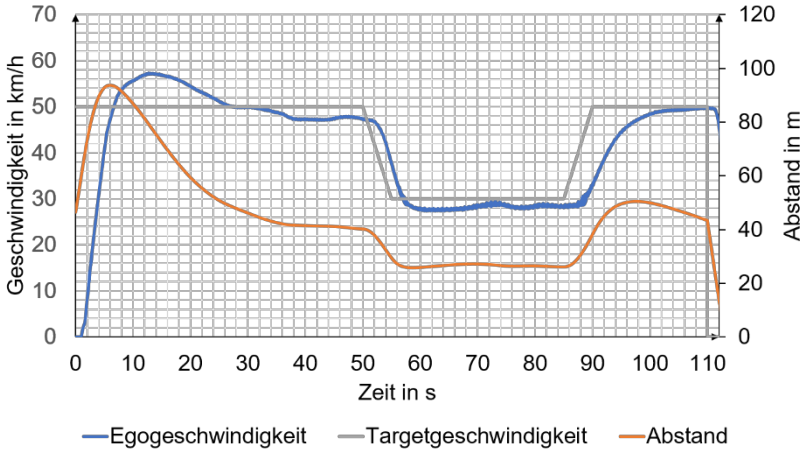


Abbildung 5.22: Geschwindigkeitsprofil von Ego- und Target-Fahrzeug bei der Stimulation per Leinwand

Weitere Untersuchungen mit diesem Aufbau widmen sich Einflüssen aus dem virtuellen Aufbau der Umgebung, wozu zum Beispiel die Farbe des Target-Fahrzeugs zählt. Hierbei konnte im Rahmen der Co-Betreuten Abschlussarbeiten von Moritz Wäschle (2017)[17] sowie Nina Freitag (2017)[18] die Auswirkungen des Wechsels der Fahrzeugfarben von gelb auf blau näher betrachtet werden. Es zeigt sich, dass das ACC-System dabei später die Verzögerung einleitet.

Ein Vergleich der Messwerte vom Prüfstand mit denen von der Straße (siehe dazu Kapitel 4.1.1) zeigt jedoch, dass sich das Verhalten auf dem Prüfstand von dem auf der Straße signifikant unterscheidet. Der eingestellte Abstand auf dem Prüfstand liegt mit 30 km/h bei 30 Metern. Damit ist er größer als die 20 Meter, welche bei gleicher Geschwindigkeit auf der Straße beobachtet werden. Dieser Unterschied lässt sich damit begründen, dass die Abbildung auf der Leinwand einen anderen Eindruck auf die Kamera bzw. die Umweltwahrnehmung des Assistenzsystems erzeugt, als er sich auf der Straße ergibt. Das Target-Fahrzeug wird auf der Leinwand größer dargestellt, weshalb ein größerer Abstand eingestellt wird um denselben Abstandseindruck bei der Geschwindigkeit zu erreichen.

[17] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)
[18] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Bei der Anwendung der Leinwand zur Stimulation des AEB-Systems zeigt dieses bei Durchläufen mit der gleichen Parametrisierung wie bei den Untersuchungen am ACC-System oben keine Reaktion auf ein stehendes Auto als Target auf der Leinwand. Das Egofahrzeug fuhr ohne Reaktion durch die virtuelle Heckpartie. Erst nach einer Veränderung des Blickwinkels in der virtuellen Welt setzten bei einzelnen Versuchs-Wiederholungen Bremsreaktionen beim Auffahren ein. Erklären lässt sich dieses Verhalten durch die Diskrepanz in der Darstellung auf der Leinwand im Vergleich zum Eindruck aus der physischen Welt. Erst wenn der virtuelle Blickwinkel mit dem der Fahrzeugkamera gleich ist, reagiert das Fahrzeug zuverlässig auf stimulierte Verkehrsteilnehmer und verzögert vergleichbar zum Abbremsen im Szenario auf dem Testgelände. Diese Bedingung lässt sich erheblich einfacher durch eine starke Verkleinerung des Abstands zwischen bildgebender Projektionsfläche und Kamera erreichen. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit der kompakte Kamerastimulator entwickelt und aufgebaut, welcher in Abbildung 5.23 dargestellt ist. Details zu dessen Anforderungen und Anwendung werden im folgenden Kapitel erläutert.

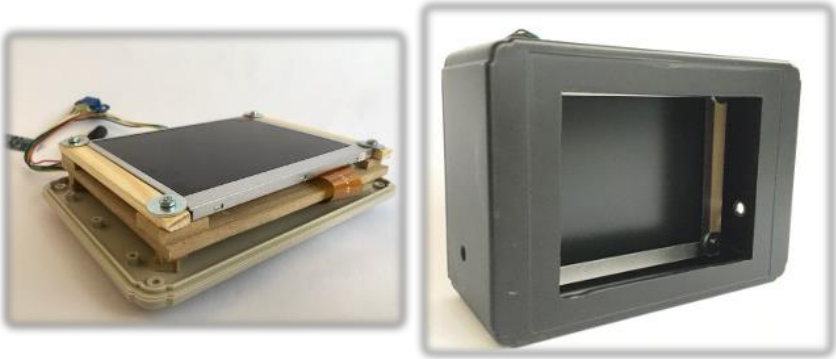


Abbildung 5.23: Teilzusammenbau und fertiger, kompakter Kamerastimulator

5.3.3. Anwendung des kompakten Kamerastimulators zur Validierung kamerabasierter ACC-Systeme

Durch die Sensorstimulation ist man in der Lage Szenarien von HiL-Tests am Gesamtfahrzeug weiter zu verwenden. Beim Wechsel von HiL zu ViL kann der Fokus auf die Einflüsse aus dem Wechsel des Restfahrzeug-Modells gelegt werden. Eine Fahrt auf dem Testgelände mit physischen Verkehrsteilnehmern würde da neue Einflüsse mit sich bringen, was wiederum die Nachvollziehbarkeit bei unvorhergesehenem Systemverhalten erschwert.

Vor diesem Hintergrund wurde der kompakte Kamerastimulator entwickelt, um den Abstand zwischen bildgebender Fläche und Fahrzeugkamera deutlich zu verkleinern, sodass einerseits die Abbildungsverhältnisse realistischer sind und andererseits die Ausrichtung und Kalibrierung einfacher erfolgen können. Der Aufbau am Fahrzeug in Kombination mit dem Rollenprüfstand ist in Abbildung 5.24 dargestellt.



Abbildung 5.24: Stimulation der Fahrzeugkamera mittels kompakten Kamerastimulator auf dem Rollenprüfstand

Der kompakte Kamerastimulator bietet auch die Möglichkeit, bei einer Fahrt auf dem Testgelände montiert zu sein. So können Untersuchungen mit eingesetzter Kamerastimulation nahtlos zwischen Prüfstand und Testgelände wechseln. Dabei bietet der Rollenprüfstand ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit, während die Fahrt auf dem Testgelände einen realistischeren Reifen-Straßenkontakt sowie die Einwirkung von Beschleunigungskräften mit sich bringt. Ersteres hat beispielsweise für Untersuchungen an einem Notbrems-Assistenzsystem Vorteile. Da hier Verzögerungen mit bis zu 7 m/s² je nach Umweltbedingungen an die Haftgrenzen des Reifen-/ Rollenkontakts gehen, kann es in extremen Situationen zum Blockieren der Räder kommen. Dies wird vom ABS-System detektiert und eine Validierung auf dem Prüfstand aufgrund der unplausiblen Raddrehzahldifferenzen verhindert.

Der für diese Untersuchungen aufgebaute Stimulator basiert auf einem LCD-Panel mit 5,6 Zoll Bildschirmdiagonale und einer Auflösung von 640x480 Bildpunkten. Damit besitzt es die gleiche Auflösung und Seitenverhältnis wie die Kamera des Versuchsfahrzeugs. Um Einflüsse durch die Prüfstands-Beleuchtung oder Umgebungslicht auf der Teststrecke zu vermeiden, wird über den Stimulator eine Abdeckplane zur Abschirmung gebracht. So wird außerdem der Aufbau vor Regen und Nässe bei der Anwendung auf der Teststrecke geschützt.

Für die Verwendung der Kamerastimulation sind eine Vielzahl von Parametern einzustellen. Im ersten Schritt lassen sich diese in zwei Gruppen einteilen. Einerseits als Größen für den physischen Aufbau, also hinsichtlich der Ausrichtung. Andererseits als Parameter zur Beschreibung der virtuellen Komponenten als Kalibrierung. Zur besseren Übersicht zeigt Abbildung 5.25 diese Parameter für die Ausrichtung und Kalibrierung des Kamerastimulators. Diese wurden immer wieder im Rahmen dieser Forschungsarbeit angewendet und systematisch im Kapitel 6.3.4 untersucht.

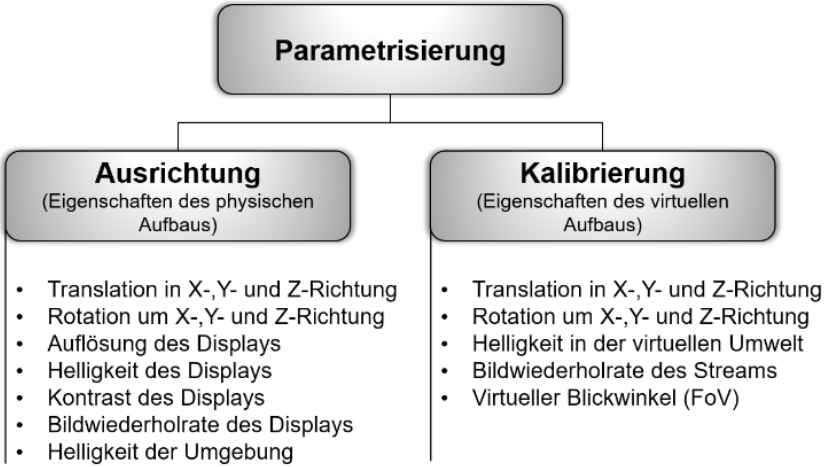


Abbildung 5.25: Parameter der Kamerastimulation als Ausrichtung und Kalibrierung

Neben dem physischen Aufbau des Stimulators muss auch die virtuelle Komponente berücksichtigt werden. Dazu wird in der virtuellen Umweltsimulation ein Kamera-Modell eingesetzt, welches den Bildausschnitt zur Visualisierung aus der Simulation bestimmt. Dieses wird im Fahrzeug-Modell wenige Zentimeter vor

der Frontscheibe sowie 1,4 m über dem Boden angebracht. Damit befindet es sich an der Stelle, an der in der physischen Umgebung auch der Stimulator platziert ist. Um die Abbildungsverhältnisse auf dem Stimulator so nah wie möglich an die realen Projektionen auf die Kamera zu bringen, blickt das Kamera-Modell mit einem horizontalen Blickwinkel von etwa 25° nach vorn.

Bei der Kalibrierung des Stimulators werden die Parameter des virtuellen Kameramodells eingestellt. Nach dem in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Vorgehen muss allerdings auch noch die genaue Ausrichtung auf die Fahrzeugkamera durchgeführt werden. Der Zugriff auf das von der Kamera aufgenommene Bild erleichtert dieses Vorgehen erheblich und ermöglicht einen direkten Abgleich zwischen dem Stimulator und dem vom Fahrzeug wahrgenommenen Bild. Abbildung 5.26 zeigt die Wechselwirkungen beim Aufbau des kompakten Kamerastimulators vor einer Fahrzeugkamera.

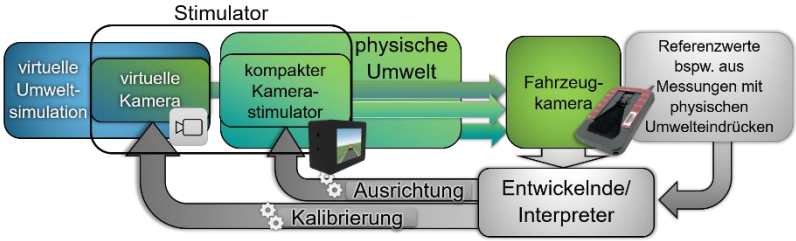


Abbildung 5.26: Wechselwirkungen bei der Ausrichtung und Kalibrierung der Kamerastimulation

Bei der Kalibrierung des Kamerastimulators muss beispielsweise das virtuelle Field of View (vFoV) oder die Position der Kamera in der virtuellen Umweltsimulation so eingestellt werden, dass auf dem Stimulator die richtigen Abbildungsverhältnisse dargestellt werden. Ein solches Kennfeld zur Kalibrierung des vFoV ist im Rahmen der Co-Betreuten Bachelorarbeit von Matthias Baum (2018)[19] entstanden und in Abbildung 5.27 dargestellt. Dabei ist der vom Fahrzeug eingestellte Abstand zum Target-Fahrzeug über den variierten vFoV aufgetragen. Zur Orientierung ist als horizontale Linie der Folgeabstand eingetragen, welcher bei der Versuchsgeschwindigkeit von 30 km/h auf der physischen Straße vom ACC-System als Referenz eingestellt wird. Die Kalibrierung des vFoV ist dann erfolgreich abgeschlossen, wenn für ihn der Wert gefunden ist, bei dem der Abstand wie auf

[19] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

der Straße beobachtet eingestellt wird. In diesem Beispiel wäre ein optimales Verhalten im Bereich zwischen 24° und 25° vFoV zu erwarten.

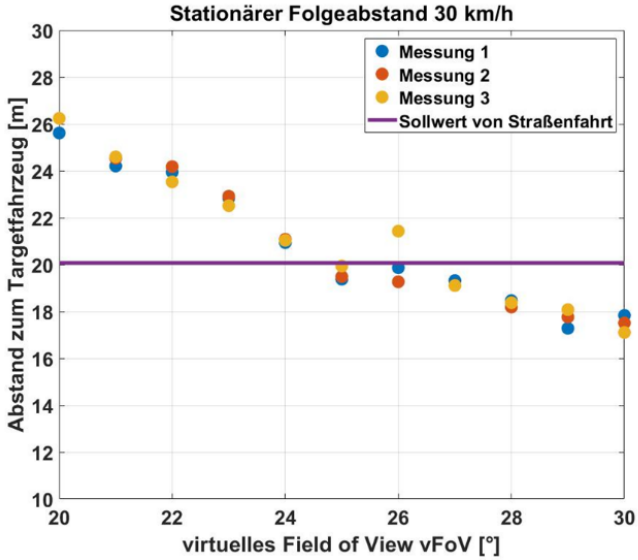


Abbildung 5.27: Beispiel für die Kalibrierung des virtuellen Kameramodells für das virtuelle Field of View (vFoV) in der Simulation mit Abstandsmessungen bei einer stationären Folgefahrt mit 30 km/h

Messungen mit dem final ausgerichteten und kalibriertem Stimulator sind in Abbildung 5.28 dargestellt. Dabei sind die eingestellten Abstände über der Folgegeschwindigkeit aufgetragen. Erkennbar ist, dass über mehrere Messwiederholungen hinweg der gleiche Folgeabstand eingestellt wird, welcher auch auf der Straße beobachtet werden konnte.

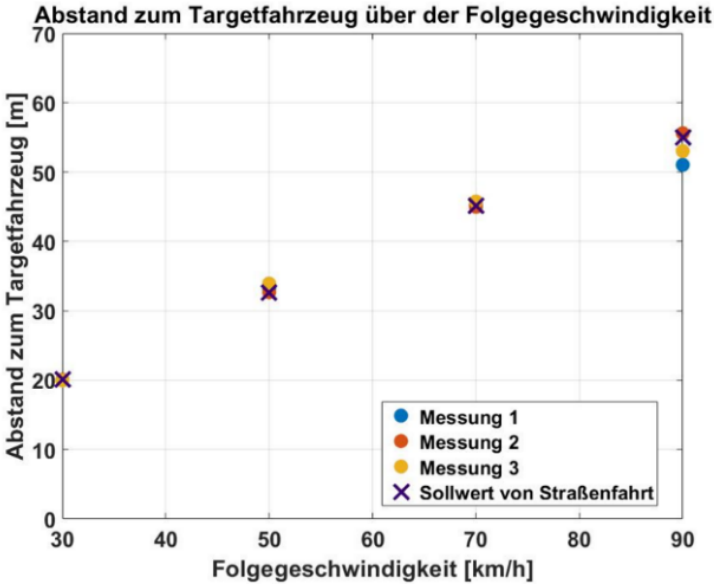


Abbildung 5.28: Folgeabstand über verschiedene Folgegeschwindigkeiten nach erfolgreicher Kalibrierung des virtuellen FoV (bei 25° vFoV)

5.3.4. Kombination des kompakten Kamera-Stimulators mit dem Rollenprüfstand zur Validierung des kamerabasierten ACC-Systems

Auf dem Rollenprüfstand ist der Platz vor dem Fahrzeug durch die Fahrzeugkühlung beschränkt und es erschwert der große Aufbau einer Leinwand die Ausrichtung auf unterschiedlich große Fahrzeuge. So muss für hohe Fahrzeuge, beispielsweise Kleintransporter, die Leinwand aufwändig hoch aufgehängt werden. Dem gegenüber ermöglicht die Verkleinerung des Stimulations-Aufbaus die einfache Montage per Saugnapf an der Windschutzscheibe. Damit ergeben sich große Vorteile nicht nur bei der Stimulation, sondern auch in der Montage des Stimulators am Fahrzeug.

Der Rollenprüfstand hat bei der Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten gezeigt, dass er ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit ermöglichen kann. Damit ist man in der Lage, einzelne Parameter bei der Applikationsarbeit gezielt hinsichtlich ihres Einflusses auf die Fahrbarkeit zu analysieren sowie einzustellen. Die Kombination mit der kompakten Kamerastimulation weitet dieses Anwendungsgebiet nun auf die Entwicklungsarbeit an Fahrerassistenzsystemen am Gesamtfahrzeug und dem automatisierten Fahren hinsichtlich längsdynamischer Manöver aus.

5.3.5. Zwischenfazit zur Weiterentwicklung des Vorgehens durch die Anwendung auf das kamerabasierten ACC-System

Die Anwendung des Vorgehens mit Verwendung der Kamerastimulation in Verbindung mit dem Rollenprüfstand hat gezeigt, dass ein monokamera-basiertes ACC-System in einer solchen Umgebung die Geschwindigkeit sowie Abstand zu virtuellen Verkehrsteilnehmern regelt. Dabei führt die Leinwand zu Reaktionen auf Umweltbedingungen, welche sich jedoch in ihrer Ausprägung (etwa Reaktionsabstände oder Folgeabstände) von dem Verhalten auf der Straße unterscheiden. Soll jedoch das Fahrzeugverhalten von der Straße auf den Prüfstand übertragen werden, muss die Stimulation deutlich näher an der Kamera erfolgen, sodass die Eindrücke realistischer an denen von der Straße sind. Dies ist beispielsweise am Blickwinkel der Kamera und dem Blickwinkel (Field of View – FOV) der virtuellen Kamera nachvollziehbar. Durch die Verringerung des Abstands zwischen Kamera und Stimulator werden auch die Einflussmöglichkeiten für fremde Umwelteindrücke reduziert.

Als Lösung für diese Anforderungen wurde der kompakte Kamerastimulator entwickelt und dessen Stimulationsergebnisse mit denen von der Straße verglichen. Nach einer initialen Kalibrierung, etwa des virtuellen FoV, zeigt sich das von der Straße bekannte Verhalten hinsichtlich des geschwindigkeitsabhängigen Folgeabstands hinter einem Target-Fahrzeug.

Basierend auf der so gestalteten Umgebung folgen nun Untersuchungen, welche das Verhalten unter ungünstigeren Umweltbedingungen nachstellen. In Kapitel 6.2 wird gezeigt, wie Dämmerung in einer virtuell dominierten Validierungsumgebung nachgestellt werden kann.

5.4. Kenngrößen für die Optimierung eines ACC-Systems bei Auffahrmanövern

Im Rahmen einer Validierung muss nicht nur die grundsätzliche Erfüllung einer Funktion vom Entwickelnden überprüft werden. Gerade die Arbeit an der Qualität einer Funktion stellt den Großteil der Entwicklungsarbeit dar. Dazu müssen bei der Überführung des Validierungsziels in ein geeignetes Manöver Kennwerte ermittelt und dafür Zielwerte aufgestellt werden. Diese gilt es dann im Laufe der Entwicklung zu erreichen. Um diese Arbeit bei der stimulationsbasierten Validierung eines kamerabasierten ACC-System zu unterstützen, werden im Folgenden Kennwerte, so genannte KPIs (Key Performance Indicator), definiert. Diese werden im späteren Verlauf der Arbeit für Auffahrmanöver auf ein stehendes Target-Fahrzeug aufgegriffen und damit die Funktionserfüllung der Validierungsumgebung bewertet.

In einem ersten Schritt werden die Größen vorgestellt, welche bei allen folgenden Validierungsumgebungen aufgezeichnet werden. Anschließend werden dann aus den Messwerten die Kennwerte abgeleitet:

- Versuchszeit
  Mit dieser Größe wird die Zeit festgehalten, welche seit Versuchsbeginn verstrichen ist. Sie dient zur Synchronisierung der anderen Messgrößen innerhalb eines Versuchs. Wichtig dabei ist, dass alle Messsysteme den gleichen Messbeginn besitzen. Andernfalls müssen die einzelnen Aufzeichnungen aufwändig synchronisiert werden, z.B. über markante Ereignisse.
- Geschwindigkeit des Egofahrzeugs
  Die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs zeigt, ob die Geschwindigkeit vom ACC-System konstant gehalten wird oder eine Verzögerung durchgeführt wird.
- Erkennungs-Zustand des ACC-Systems
  Der Zustand des ACC-System kann über die Aufzeichnung der Anzeige im Kombi-Instrument erfolgen oder bei Zugriff auf den Fahrzeugbus daraus entnommen werden. Die Erfassung dieses Wertes ist wichtig, um verfolgen zu können, ob und wann das ACC-System den vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer erkannt hat.
- Verbleibender Restabstand zum Target-Fahrzeug
  Der verbleibende Restabstand zum Target-Fahrzeug gibt an, wie viel Strecke noch bis zum stehenden Target für die Verzögerung zur Verfügung steht. Diese Größe kann beispielsweise unmittelbar über einen Abstandssensor wie einen Radarsensor kontinuierlich gemessen oder durch Integration der Fahrgeschwindigkeit mit gegebenen Anfangsabstand berechnet werden. So können basierend auf diesem Wert Schaubilder erzeugt werden, mit denen das

Verhalten bei mehreren Versuchsdurchführungen unmittelbar verglichen werden kann.

Basierend auf den Messgrößen werden folgende Kennwerte abgeleitet:

a. Erkennungsabstand (Abstand, ab dem vom Egofahrzeug ein vorausfahrendes Verkehrsobjekt erkannt/dem Fahrer kommuniziert wird)
b. Streuung des Erkennungsabstands
c. Verzögerungsbeginn (Abstand, ab dem das Egofahrzeug eine definierte Verzögerungsstärke überschreitet)
d. Zeitspanne zwischen Target-Erkennung und Verzögerungsbeginn
e. Streuung des Verzögerungsbeginns
f. Verbleibender Endabstand
g. „Ablauf“ der Verzögerung / Verzögerungscharakteristik

Die hier genannten Kennwerte dienen als Grundlage für die Auswertungen von Messungen, welche in Kapitel 6 aufgezeichnet und diskutiert werden.

5.5. Zusammenfassung und Zwischenfazit

Kapitel 5 stellt ein Vorgehen für die sensorstimulierte Validierung einer Fahrzeugautomatisierung vor. Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 wird basierend auf dem IPEK-XiL-Ansatz ein Vorgehen abgeleitet, welches die Grundlage für die Funktionsüberprüfung eines ultraschallbasierten Assistenzsystems dient. Mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen wird das Vorgehen zur Validierung am Beispiel eines mono-kamerabasierten Abstandsregeltempomaten weiterentwickelt. Eine so gestaltete Umgebung kann durch den gezielten Austausch einzelner Umwelteindrücke flexibel an die Bedürfnisse einer durchgängigen Validierung angepasst werden. Hierdurch wird auch die kontinuierliche Validierung über die Entwicklungszeit vereinfacht.

Als erste Anwendung der Kamera-Stimulation wurde eine Leinwand mit Beamer-Projektion aufgebaut. Sie hat beim ACC-System des Versuchsfahrzeugs eine Verzögerung als Reaktion auf ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug hervorgerufen. Somit konnte die prinzipielle Machbarkeit einer solchen Lösung aufgezeigt werden. Zusätzlich sind Erkenntnisse über Einflüsse aus dem virtuell-physischen Aufbau der Umgebung gewonnen worden. Auch wurde die virtuelle Abbildung von Umweltbedingungen wie eine unterschiedliche Farbe des Target-Fahrzeugs untersucht. So kann durch den Wechsel der Targetfarbe von gelb auf blau der Abstand, ab dem das Egofahrzeug verzögert, verkürzt werden. Siehe dazu

die Ergebnisse der Co-Betreuten Abschlussarbeiten von Moritz Wäschle (2017)[20] sowie Nina Freitag (2017)[21].

Mit dem entworfenen Vorgehen ist es auch möglich Untersuchungen durchzuführen, die den Energieverbrauch von ACC-Systemen ermitteln können. So lassen sich schon früh in der Entwicklung Aussagen über Wechselwirkungen zukünftiger Generationen solcher Systeme treffen. Untersuchungen diesbezüglich sind im Rahmen der Co-Betreuten Masterarbeit von Lars Pudlo (2018)[22] entstanden.

Die Voruntersuchungen in der physischen Umgebung haben gezeigt, wie sich das Fahrzeug mit aktivierter Automatisierung in der natürlichen Umgebung verhält. Bei der Kamerastimulation per Leinwand hat das Fahrzeug allerdings ein davon abweichendes Verhalten gezeigt. Ein genaueres Verständnis über diese Unterschiede und deren Minimierung bereitet den Weg zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 „Welche Herausforderungen gibt es bei der Integration der Sensorstimulation in schon bestehende Validierungsumgebungen auf Gesamtfahrzeugebene“. So konnte im Gesamtverbund aus Stimulation und Rollenprüfstand das ACC-System zwar benutzt werden, jedoch war eine Auslösung des Notbremssystems zunächst nicht möglich. Aus diesen Erfahrungen heraus wurde der Stimulator-Aufbau durch den kompakten Kamerastimulator weiterentwickelt. Damit kann das Fahrzeugverhalten beispielsweise beim Auffahren auf ein stehendes Fahrzeug sehr nah an das in der physischen Validierungsumgebung gebracht werden. Diese Erkenntnisse flossen in die Weiterentwicklung des Vorgehens.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit steigenden Anforderungen an die Fahrzeugautomatisierung auch die Anforderungen an die Validierungsumgebung steigen. So bringt beispielsweise ein Notbremssystem schnellere Reaktionszeiten hinsichtlich der Situationserkennung und der daraufhin eingeleiteten Verzögerung mit sich. Dies bedeutet für die Umgebung, dass die Umweltsimulation auch entsprechend schnell auf Geschwindigkeitsänderungen reagieren können muss und sich dies entsprechend schnell in den Eindrücken der Sensorstimulation auswirkt. Dieser Zusammenhang wird in der Anforderungs-Pyramide für die Validierungsumgebung von Fahrzeugautomatisierungen in Kapitel 5.1.2 genauer beschrieben.

[20] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)
[21] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)
[22] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

6 Anwendung des Vorgehens zur Validierung der kamerabasierten Assistenzfunktionen

In Kapitel 5 wurde ein Vorgehen zum Aufbau einer sensorstimulierenden Validierungsumgebung für Fahrerassistenzsysteme entwickelt und anhand zweier Sensoren umgesetzt. Hierzu wurde eine Stimulationsumgebung der Ultraschall-Sensorik sowie der Fahrzeug-Kamera aufgebaut. Kapitel 6 greift die zuletzt behandelte Umgebung auf. Dazu werden Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand sowie dem nahegelegenen Testgelände durchgeführt und verglichen. So werden aus den dabei ermittelten Ergebnissen neue Erkenntnisse über die Potentiale dieses Vorgehens für eine zukünftige Verwendung gewonnen. Zu diesem Zweck werden sie mit Ergebnissen aus den Messfahrten in rein physischen Validierungsumgebungen, wie dem Testgelände, und der öffentlichen Straße verglichen. Abbildung 6.1 gibt eine Übersicht, welche Untersuchungen durchgeführt wurden.



Abbildung 6.1: Anwendungen des entwickelten Vorgehens auf die kamerabasierte ACC-Funktion

Um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Umgebungen mit Kamerastimulation besser einschätzen zu können, werden als erstes in Kapitel 6.1 Untersuchungen an den vier Stufen des ACC-Systems zur Wahl des Wunschabstands (siehe Kapitel 2.1.4) durchgeführt. Dabei kommt die Kamerastimulation nicht nur auf dem Rollenprüfstand, sondern auch bei Fahrten auf dem Testgelände zum Einsatz. Hierdurch können die Auswirkungen eines sich ändernden Parameters der Fahrzeugautomatisierung oder der Umwelt über den Wechsel der Validierungsumgebung hinweg beobachtet und hinsichtlich der Reproduzierbarkeit

bewertet werden. So lässt sich zum Beispiel als Fahrzeugparameter die Stufe des gewählten Wunschabstands über die wechselnde Einbindung der Fahrstrecke beobachten. Bei der Kamerastimulation kam bis zu diesem Zeitpunkt eine umfangreiche virtuelle Umweltsimulation zum Einsatz. Diese ist mit einem echtzeitfähigen Computer und dessen Einbindung im Betrieb jedoch aufwändig. Um eine potentielle Alternative zu ermitteln, werden Messungen auf dem Testgelände und dem Rollenprüfstand mit Stimulation unter Verwendung eines zuvor generierten Bilderkatalogs durchgeführt.

Wie bereits im Stand der Forschung und Technik in Kapitel 2 aufgezeigt wurde, schränken wechselnde Umweltbedingungen, wie Witterung oder der Sonnenstand, die Reproduzierbarkeit von Messfahrten im öffentlichen Straßenverkehr ein und erschweren dadurch die Validierung von kamerabasierten Fahrzeugautomatisierungen. Aus diesem Grund wird in Kapitel 6.2 untersucht, inwiefern solche Einflüsse durch den Einsatz der virtuellen Umweltsimulation in Kombination mit der Kamerastimulation vergleichbar nachstellen werden können. Dabei wird das Verhalten bei Fahrt in Dämmerung auf dem Testgelände mit einer virtuell generierten Dämmerung auf dem Prüfstand verglichen.

Die dritte Anwendung des Vorgehens findet in Zusammenarbeit mit der durch Professor Albers Betreuten Dissertation von Dominic Waldenmayer (Waldenmayer et al., 2021) statt. Im Rahmen dieser Kooperation werden in Kapitel 6.3 für einen frühen Entwicklungsstand einer multikriterielle Fahrstrategieplanung Untersuchungen am Gesamtfahrzeug ermöglicht. Hierdurch werden Erkenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Antriebsstrang und Umgebung am Gesamtfahrzeug gewonnen. Um dies zu ermöglichen wird anhand des Vorgehens eine Kamerastimulation in Verbindung mit dem Rollenprüfstand kombiniert. Als Versuchsfahrzeug dient der hybridelektrische Porsche Cayenne des Instituts, an dem die genauen Energieverbräuche analysiert werden. Dabei ist die Fahrzeugkamera als Umweltsensor außerhalb des Fahrzeugs aufgebaut, sodass hierbei Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Kamera und Stimulator, beispielsweise bei der Kalibrierung und Ausrichtung, ohne Einbindung des Gesamtfahrzeugs möglich sind.

6.1. Untersuchungen an den Wunschabstandsstufen des ACC-Systems



Um das Vorgehen aus Kapitel 5.1 weiter zu entwickeln, wurde in Kapitel 5.3 eine Umgebung aufgebaut, in der für ein kamerabasiertes ACC-System mit Hilfe einer virtuellen Umweltsimulation sowie einer entsprechenden Stimulation reproduzierbar Manöver und Verkehrsszenarien durchgeführt wurden. Die dabei umgesetzte Stimulation per Leinwand ist, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, zum kompakten Kamerastimulator weiterentwickelt worden, nachdem das Fahrzeugverhalten von der Straße mit dem der Stimulation verglichen wurde. Ergänzend dazu werden in diesem Kapitel Untersuchungen zu den verschiedenen Abstandseinstellungen des ACC-Systems durchgeführt.

Die Untersuchungen an den 4 Wunschabstandsstufen verfolgen zwei Ziele:

Aus Perspektive der Entwickelnden einer automatisierten Fahrfunktion die Frage beantworten: „Hat die Wahl des Wunschabstands Einfluss auf den Abstand, ab welchem dem Fahrer ein vorausfahrendes Fahrzeug als erkannt angezeigt wird? Und wie ändert sich daraus das Verhalten der Automatisierung bei der weiteren Auffahrt auf das Target-Fahrzeug?“

Aus Perspektive der Umgebungsentwickelnden die Frage beantworten: „Lässt sich das Fahrzeugverhalten aus der rein physischen Validierungsumgebung auf dem Rollenprüfstand und der Teststrecke mit Verwendung der Kamerastimulation reproduzieren?“

Als Szenario wird nicht nur eine einfache Folgefahrt mit konstanter Geschwindigkeit betrachtet. Dynamische Szenarien, in denen auf sich ändernde Umweltbedingungen reagiert werden muss, sind sowohl für das Fahrzeugsystem, als auch für die verwendetet Validierungsumgebung anspruchsvoller. Hierdurch kann also die Leistungsfähigkeit der Validierungsumgebung umfassender untersucht werden. Zu diesem Zweck werden Fahrten mit einer Annäherung aus 100 Metern auf ein stehendes Fahrzeug durchgeführt. Somit muss das ACC-System kontinuierlich den Restabstand ermitteln und entsprechend die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs bis zum Stillstand anpassen. Um dabei die Reproduzierbarkeit der Umgebung besser beurteilen zu können, wird als einziger Parameter der gewählte Wunschabstand im Fahrzeug variiert. Die Validierungsumgebung bleibt über alle Wiederholungen einer Abstands-Stufe unverändert. Es ist deshalb zu erwarten, dass die verschiedenen Wunschabstände bei einer guten Reproduzierbarkeit für die

jeweilige Stufe zu jeweils gleichen Resultaten führen. Ein Abgleich des Fahrzeugverhaltens mit demselben Szenario in der rein physischen Umgebung zeigt, wie vergleichbar dies auf das Fahrzeug wirkt.

Die Fahrt auf ein stehendes Hindernis in der Spur des Egofahrzeugs wird in allen gängigen Fahrzeug-Tests wie beispielsweise von EuroNCAP (Euro NCAP, 2015) oder dem ADAC (ADAC, 2011) durchgeführt. Dabei sind eine zuverlässige Hinderniserkennung und die genaue Schätzung des Restabstands besonders wichtig. Dieser muss kontinuierlich ermittelt werden, sodass der für die Bremsung noch zur Verfügung stehende Restweg stets bekannt ist und die Verzögerung sowohl sicher, als auch komfortabel für die Insassen eingestellt werden kann. Die kontinuierliche Abstandsänderung stellt somit größere Anforderungen an das Assistenzsystem, als beispielsweise bei einer konstanten Folgefahrt hinter einem Target-Fahrzeug.

Abbildung 6.2 zeigt den idealisierten Geschwindigkeitsverlauf des Egofahrzeugs über dem verbleibenden Restabstand, wobei dieses Szenario in drei Phasen eingeteilt ist.

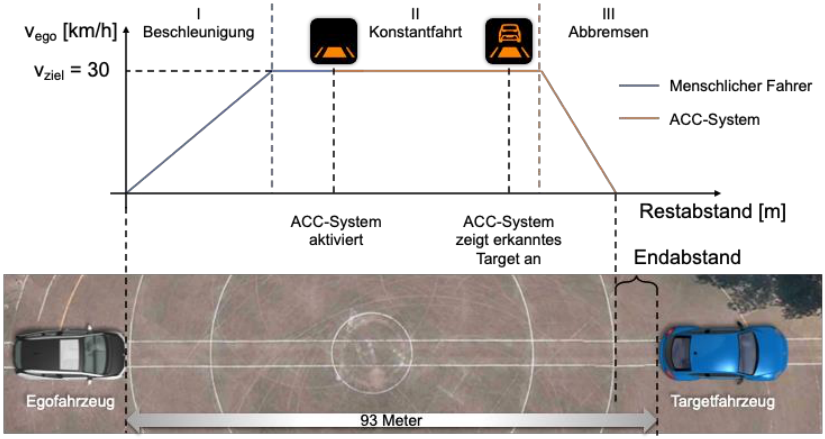


Abbildung 6.2: Idealisierter Geschwindigkeitsverlauf des Egofahrzeugs sowie Manöverübersicht mit Einteilung in die drei Manöver-Phasen: „Beschleunigung“, „Konstantfahrt“ und „Abbremsung“

I Beschleunigung

Das ACC-System kann die Fahraufgabe nicht aus dem Stand heraus übernehmen. Aus diesem Grund wird bei der ersten Phase „Beschleunigung“ das Egofahrzeug aus dem Stand vom menschlichen Fahrer möglichst schnell auf die Zielgeschwindigkeit von 30 km/h beschleunigt. Außerdem versetzt dieser während dieses Abschnitts das ACC-System in den Standby-Betrieb, sodass es als nächstes bereit zur Aktivierung und zur Übernahme der Fahraufgabe ist. Zum Zeitpunkt der Steuerungsübergabe an die Fahrzeugautomatisierung wird bereits konstant mit der Zielgeschwindigkeit gefahren. Da diese nach 20 Metern erreicht ist, erfolgt die Übergabe bei einem Restabstand, welcher noch größer als der Erfassungsbereich der Fahrzeugkamera ist.

II Konstantfahrt

Bei der „Konstantfahrt“ wird das ACC-System aktiviert, welches erst einmal im geschwindigkeitsgeregelten Betrieb arbeitet und dem Fahrer ein erkanntes Fahrzeug in der Fahrspur über eine Anzeige im Kombiinstrument anzeigt. Da der Abstand ausreichend groß ist, wird eine konstante Fahrgeschwindigkeit bis zum Ende der Phase gehalten.

III Abbremsen

Durch die zuvor vom Fahrzeug eingeregelte Geschwindigkeit herrschen zu Beginn des letzten Manöver-Teils, in dem das ACC-System im abstandsgeregelten Modus arbeitet, über alle Szenario-Wiederholungen hinweg vergleichbare Bedingungen. Unterschreitet das Egofahrzeug einen geschwindigkeitsabhängigen Auslöse-Abstand, beginnt das ACC-System mit der Verzögerung bis zum Stillstand, welcher bei etwa vier Meter vor dem stehenden Target-Fahrzeug liegt.

Nach dem erfolgten Testlauf fährt der menschliche Fahrer das Egofahrzeug wieder auf die Ausgangsposition. Dort wird anschließend die Zündung aus und wieder eingeschaltet. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die kamerabasierte Assistenz Zwischenspeicher mit vormals erlebten Eindrücken führt. Um eine Beeinflussung durch vorherige Testfahrten zu vermeiden muss dieser Speicher durch einen Zündungswechsel zurückgesetzt werden.

Abbildung 6.3 stellt einen gemessenen Geschwindigkeitsverlauf des Egofahrzeugs über den verbleibenden Restabstand bei einer Fahrt auf dem Testgelände dar. Es sind die drei Phasen Beschleunigung, Konstantfahrt und Abbremsen markiert. Zusätzlich befinden sich an den Zeitpunkten, wo Interaktion mit dem ACC-System stattfindet, das entsprechende Anzeigenelement des Fahrzeugs. Diese sind einmal

die Aktivierung des ACC-Systems sowie die Anzeige eines erkannten Target-Fahrzeugs. So kann nachvollzogen werden, bis zu welchem Abstand die Längsregelung des Fahrzeugs vom menschlichen Fahrer erfolgt und ab wann das Assistenzsystem die Geschwindigkeit regelt. Außerdem ist erkennbar ab welchem Abstand das ACC-System das Target-Fahrzeug in der Fahrspur erkennt und im abstands-geregelten Betrieb bis zum Stillstand verzögert.

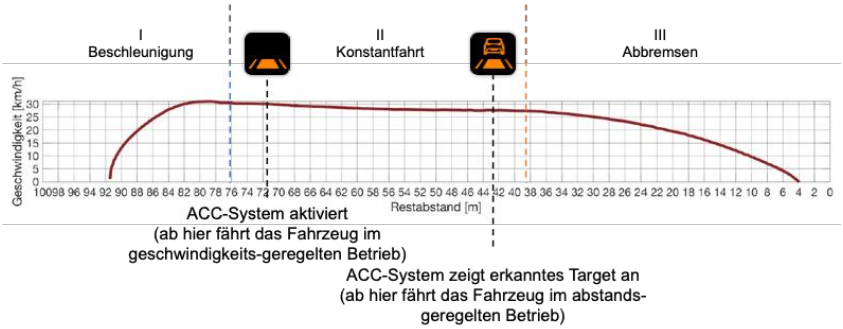


Abbildung 6.3: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf des Egofahrzeugs über den Restabstand mit Einteilung in die drei Manöver-Phasen: „Beschleunigung“, „Konstantfahrt“ und „Abbremsung“

6.1.1. Vorstellung der eingesetzten Validierungsumgebungen

Neben den Fahrten in der rein physischen Umgebung und auf dem Rollenprüfstand werden auch Fahrten mit Kamerastimulation auf dem Testgelände durchgeführt. Somit kann die Auswirkung eines sich ändernden Parameters der Fahrzeugautomatisierung, hier die Stufe des gewünschten Wunschabstands, über den Wechsel der Validierungsumgebung hinweg beobachtet und hinsichtlich der Reproduzierbarkeit bei größerem Anteil virtueller Umwelteinflüsse untersucht werden.

Wie in Kapitel 5.3 erläutert, wird bei der Kamerastimulation das wiedergegebene Bildmaterial durch eine virtuelle Umweltsimulation generiert. Der Aufbau und Betrieb einer solchen Umgebung kann speziell bei der Verwendung auf dem Testgelände sehr aufwändig werden. Entweder muss der Computer zur Echtzeit-Modellierung als weiterer Rechner in das Versuchsfahrzeug installiert oder eine drahtlose Übertragung für den Informationsaustausch zu diesem aufgebaut werden. Die Verwendung eines Bilderkatalogs kann hier die Stimulation deutlich vereinfachen. Dazu wird ein Katalog mit Bildern, welche das Target-Fahrzeug in unterschiedlichen Entfernungen darstellt, vor der Manöverdurchführung generiert. Bei der Manöverdurchführung wird nur dasjenige Bild ausgewählt und auf dem Stimulator

angezeigt, welches am nächsten zum verbleibenden Restabstand passt. Messungen mit einem solchen Katalog aus 170 Bildern werden in Kapitel 6.1.6 vorgestellt und abschließend in Kapitel 6.1.7 die Vor- und Nachteile dieser Testvariante diskutiert.

Die Gestaltung des System-Modells „Umwelt“ mit seiner virtuellen Umweltsimulation und den restlichen physischen Komponenten wird im Folgenden genauer vorgestellt. Eine Übersicht gibt Abbildung 6.4, in welcher zu sehen ist, dass zwischen drei Aufbauten unterschieden wird, welche mit unterschiedlich großem Anteil virtuell generierte Umwelteindrücke nutzen. Dabei wird mit der Fahrt auf dem Testgelände bei rein physischen Umweltmodellen begonnen (grün). Diese Fahrten dienen als Referenz und werden später mit den anderen Ergebnissen verglichen. Als nächstes folgt die Fahrt auf dem Testgelände mit eingesetzter Kamerastimulation (orange). Hierbei wird der optische Eindruck mit dem stehenden Target-Fahrzeug virtuell generiert und drahtlos an das Fahrzeug auf dem Testgelände übertragen. Sowohl die Einwirkung der Beschleunigung des Fahrzeugs, als auch der Reifen-/Straßenkontakt sind physischen Ursprungs. Als letztes werden die Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand gezeigt (blau). Dabei werden alle relevanten Eindrücke für die ACC-Sensorik virtuell generiert und durch eine entsprechende Stimulation beziehungsweise mit Hilfe des Rollenprüfstands dem Fahrzeug mitgeteilt.

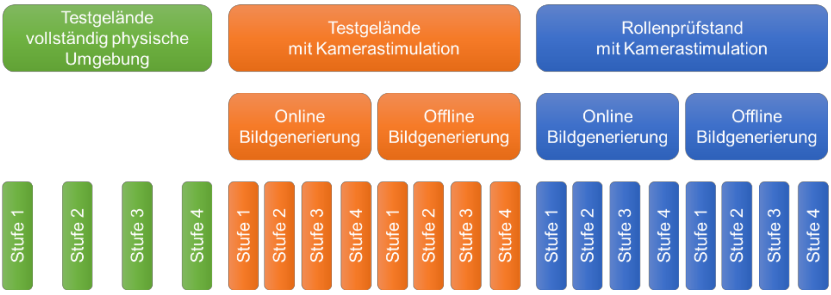


Abbildung 6.4: Versuchsübersicht zur Wahl des ACC-Wunschabstands

Neben den drei bisher unterschiedenen Validierungsumgebungen werden die Szenarien mit Kamerastimulation noch mit zwei unterschiedlichen Verfahren zur Bildgenerierung durchgeführt. Dies ist einmal die Echtzeitgenerierung als „online“ Erzeugung und der Bilderkatalog als „offline“ Bildmaterial. Die Verwendung von offline generiertem Bildmaterial bietet das Potential deutlich weniger aufwändig die Kamerastimulation betreiben zu können. So entfällt der Aufbau einer Online-

Umweltsimulation sowie die mitunter aufwändige Signal-Übertragung zum Testfahrzeug.

Das Testgelände mit physischem Fahrzeug als Target

Die Validierungsumgebung auf dem Testgelände zeichnet sich durch einen rein physischen Aufbau des System-Modells „Umwelt“ aus. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird der ehemalige Exerzierplatz auf dem Campus Ost des KIT verwendet, welcher er bereits in Kapitel 4.1.3 vorgestellt wurde. Mit seiner asphaltierten Fläche und einer drei Meter breit eingezeichneten Fahrspur über die knapp hundert Meter langen Diagonale eignet sich dieser für die Auffahrmanöver. An einem Ende dieser Strecke wird ein physisches Fahrzeug als Target-Fahrzeug abgestellt.

Um die Startposition des Versuchsfahrzeugs immer gleich zu halten, werden entsprechende Markierungen in 93 Meter Entfernung zum Target-Fahrzeug auf dem Boden angebracht. Auch dessen Position wird mit Kennzeichen an den Radaufstandsflächen festgehalten. Durch die Integration der Momentangeschwindigkeit über der Zeit kann späterhin der Restabstands-Verlauf ermittelt werden. Mittels Markierungen im Sichtfeld der Rückfahrkamera kann der Fahrer die Startposition auf wenige Zentimeter genau reproduzierbar und ohne Verlassen des Fahrzeugs für die Versuchswiederholung erreichen.

In Abbildung 6.5 ist links eine Luftaufnahme des Campus Ost zu sehen. Dabei liegt in zentraler Lage der ehemalige Exerzierplatz und in dessen direkter Nähe nordöstlich davon der Rollenprüfstand des IPEK. Eingezeichnet sind die Positionen der an den Untersuchungen beteiligten Fahrzeuge. Zur besseren Veranschaulichung ist rechts oben eine Aufnahme aus Sicht der Kamera des Versuchsfahrzeugs am Ausgangspunkt und rechts unten bei Erreichen des Endabstands eingefügt.

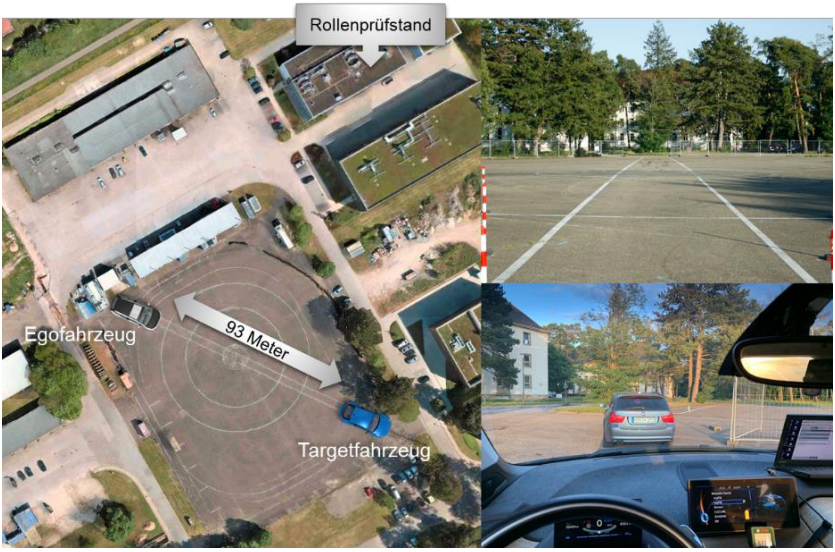


Abbildung 6.5: Übersicht auf die Teststrecke des Campus Ost mit Markierung der Fahrzeugpositionen und Entfernung zwischen den Fahrzeugen sowie Sicht auf die Teststrecke aus der Ausgangsposition (rechts oben) und Blick auf die Endposition (rechts unten)

Abbildung 6.6 zeigt die Konfiguration der Validierungsumgebung im XiL-Framework. Dabei setzt sich das System-Modell „Umwelt“ aus der asphaltierten Freifläche des Testgeländes und dem physischen Target-Fahrzeug zusammen. Der Untergrund bietet damit Haftbedingungen zwischen Reifen und Asphalt wie auf einer gewöhnlichen Straße. Das Target-Fahrzeug weist mit einer Breite von 1,85 Metern die typische Dimension einer PKW-Heckansicht auf, sodass auch das Manöver für die Kamera wie eine alltägliche Situation beispielsweise an einer Ampel oder einem Stauende erscheint.

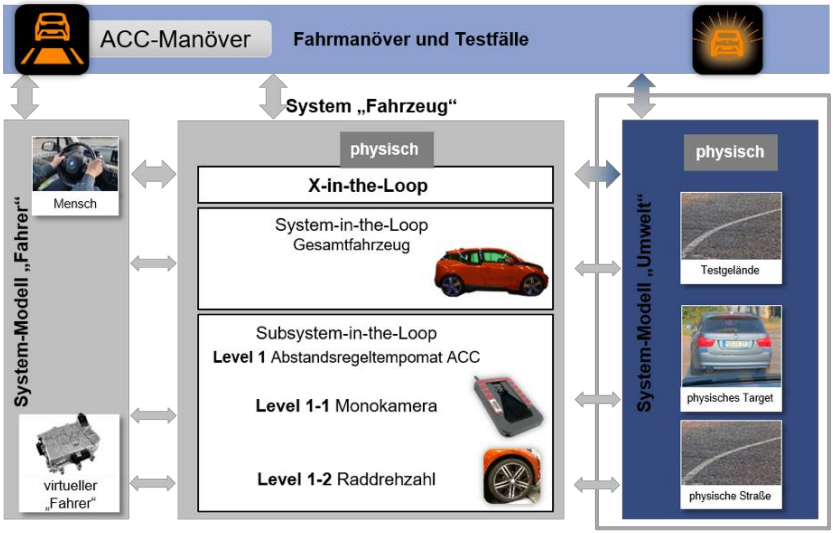


Abbildung 6.6: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für das Testgelände mit physischem Fahrzeug als Target

Das Testgelände mit Stimulation der Fahrzeugkamera

Als gemischt virtuell-physisches System-Modell „Umwelt“ kombiniert diese Umgebung die physischen Elemente des Testgeländes mit virtuell generierten Eindrücken. Der kompakte Kamerastimulator stellt aus einer Simulation erzeugte Bilder vor der Fahrzeugkamera dar. Abbildung 6.7 zeigt hierzu die Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks. Das System-Modell „Umwelt“ bringt demnach die neuen Elemente zur Stimulation der Fahrzeugkamera mit sich. Dazu kommt im System „Fahrzeug“ noch die virtuelle Modellierung der Fahrzeugkomponenten Monokamera und Raddrehzahl durch welche die Bewegung des Fahrzeugs in die Simulation und der Bildeindruck aus ihr heraus übertragen werden. Für das virtuelle Szenario wird eine 200 Meter lange gerade Fahrbahn mit einer Breite von 3 Metern angelegt. Die deutlich längere Strecke in der virtuellen Simulation stellt sicher, dass das Manöver durch die physische Teststrecke auf dem Testgelände begrenzt und nicht durch die virtuelle Strecke vorzeitig beendet wird.

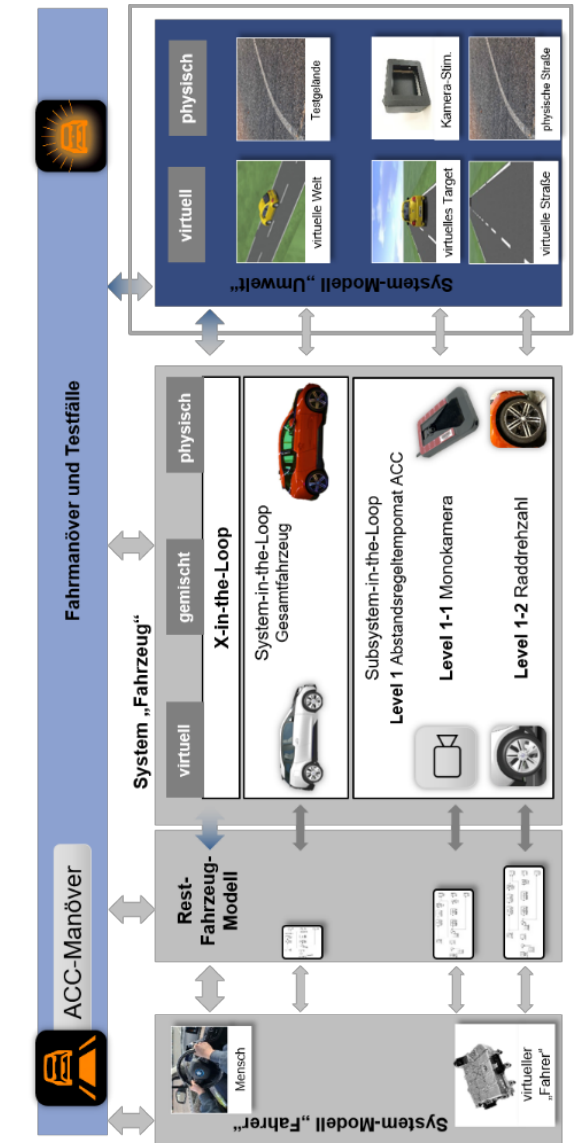


Abbildung 6.7: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für das Testgelände mit virtuell generiertem Fahrzeug als Target

Als physische Teststrecke kommt bei diesem Aufbau wieder die asphaltierte Freifläche auf dem Campus Ost des KIT zum Einsatz. Hierbei wird nun jedoch kein physisches Fahrzeug am Ende der Diagonale aufgestellt, sondern stattdessen der kompakte Kamerastimulator auf der Windschutzscheibe des Versuchsfahrzeugs angebracht. Abbildung 6.8 zeigt diesen Aufbau, welcher vor Regen und blendendem Sonnenlicht durch eine leichte, lichtundurchlässige, Abdeckung geschützt ist.



Abbildung 6.8: Stimulator an Versuchsfahrzeug auf Testgelände ohne und mit den Abdeckungen des Stimulators

Umgebung basierend auf dem Rollenprüfstand

Bei dem gemischt virtuell-physischen System-Modell „Umwelt“ auf dem Rollenprüfstand des IPEK dominieren die virtuell generierten Umwelteindrücke. Außerdem unterscheiden sich auch die Wechselwirkungen an den Reifen des Testfahrzeugs, wenn diese statt auf Asphalt auf den metallischen Rollen des Prüfstands stehen. Zusätzlich treten auch keine translatorischen Beschleunigungen des Fahrzeugs auf. Einzig der Antriebsstrang wird wie auf der Straße angetrieben. Dabei führt die Fahrzeugfixierung die erzeugten Längskräfte ab. Wie schon zuvor auf dem Testgelände wird die Fahrzeugkamera mit virtuell generierten Bildern mittels kompaktem Kamerastimulator in die Szenarien eingebunden. Abbildung 6.9 zeigt die so eingerichtete Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks.

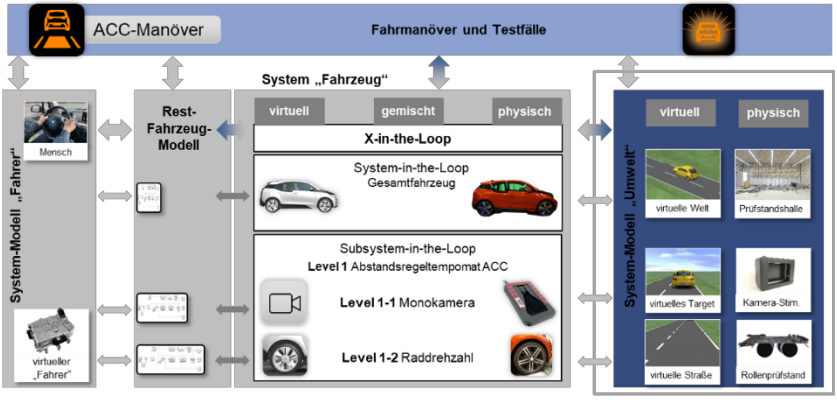


Abbildung 6.9: Konfiguration des IPEK-XiL-Frameworks für den Rollenprüfstand mit virtueller Umweltsimulation und virtuell generiertem Fahrzeug als Target

Für die Untersuchungen am ACC-System fixieren jeweils zwei Stangen an jeder der beiden Abschleppösen das Fahrzeug. Da bei diesen Manövern keine größeren Verzögerungen auftreten, kann auf die deutlich aufwändigere Radnabenfixierung verzichtet werden. In Abbildung 6.10 ist der Aufbau am Rollenprüfstand mit Kamerastimulation und Fahrzeugfixierung zu sehen.

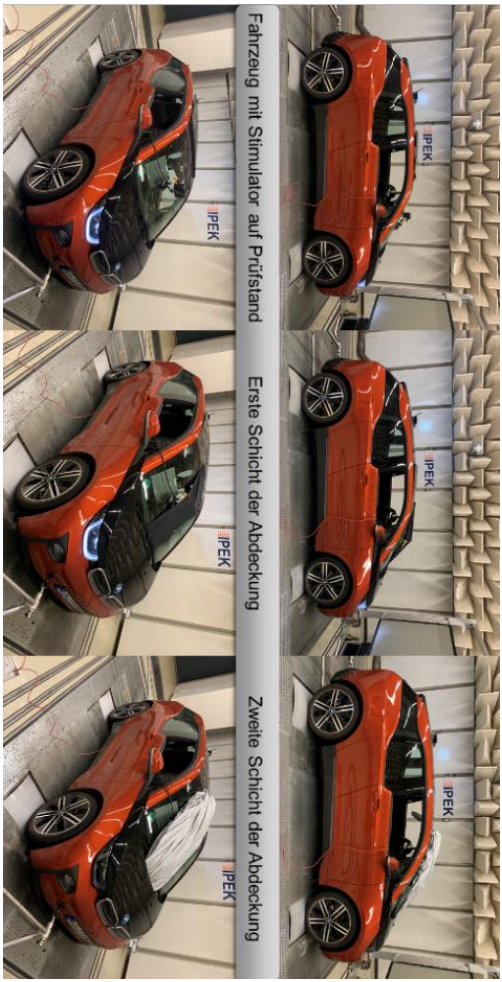


Abbildung 6.10: Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand mit montierter Kamerastimulation (ohne und mit Abdeckung)

6.1.2. Aufbau der Sensorstimulation

Die Stimulation der Kamera erfolgt nach dem in Kapitel 5.3.3 vorgestellten Prinzip, wobei der kompakte Kamerastimulator verwendet wird.. Abbildung 6.11 zeigt dessen Anbringung auf der Windschutzscheibe vor der Fahrzeugkamera (links) und dessen Funktion als Reaktion der Fahrzeugautomatisierung auf das virtuelle Target (rechts).

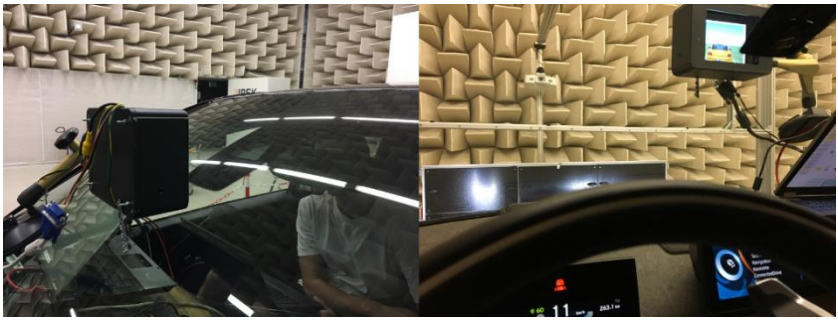


Abbildung 6.11: Kamerastimulation bei Ausrichtung auf dem Rollenprüfstand ohne Abdeckung

Bevor Untersuchungen mit dem kompakten Kamerastimulator durchgeführt werden können, muss dieser, wie in Kapitel 5.2.4 eingeführt, ausgerichtet und kalibriert werden. Dieses Vorgehen muss vor jeder Anwendung des Kamerastimulators durchgeführt werden. Dies schließt auch Untersuchungen mit Stimulator auf dem Testgelände ein. Dabei sind Messfahrten mit aktiviertem ACC-System auf dem Rollenprüfstand zentraler Bestandteil. Beim Testfahrzeug wird eine Setzgeschwindigkeit von beispielsweise 100 km/h eingestellt, sodass dieses ohne erkanntes Target-Fahrzeug deutlich über derjenigen Geschwindigkeit fährt, die es einregelt, wenn es einem Fahrzeug mit 30 oder 50 km/h folgt. Wird nun ein Target erkannt, stellt das ACC-System einen Sicherheitsabstand ein und regelt die Geschwindigkeit soweit herab, dass dieser Abstand zum Verzögern im Falle einer Abbremsung reicht. Der Zusammenhang zwischen vom ACC-System eingeregelter Geschwindigkeit und eingestelltem Abstand bei stationärer Folgefahrt (etwa bei 30 km/h 20 Meter und 50 km/h 30 Meter) sind von Messungen bei Folgefahrt auf der Straße bekannt, wie in Kapitel 5.1. vorgestellt. Werden diese Zusammenhänge in umgekehrter Zuordnung (bei einem Bild mit Abstand 20 Meter, wird eine Geschwindigkeit von 30 km/h und bei 30 Metern von 50 km/h vom ACC-System eingeregelt) bei dargestellten Bildeindrücken auf dem Stimulator vom Fahrzeug wiedergegeben, gilt der Stimulator als ausgerichtet. Weicht die eingestellte Geschwindigkeit vom Soll-Wert ab, wird die Ausrichtung beispielsweise hinsichtlich

der drei Raumrichtungen überprüft sowie entsprechend verschoben und das Szenario wiederholt. Untersuchungen an weiteren Abstands-/ Geschwindigkeits-Paarungen zeigen, dass nach Ausrichtung des Stimulators hinsichtlich der sensitivsten Einstellgrößen das Verhalten des Fahrzeugs, bekannt von der Straßen-Referenzfahrt, nun auch bei Stimulation in der Prüfstandsumgebung weitgehend wiedergeben wird. Siehe dazu das Fahrzeugverhalten in Abbildung 5.28.

Die Sensitivität von Parametern bei der Kameraausrichtung wurde näher in den Co-Betreuten Abschlussarbeiten von Ke Xu (2019)[23], Wei Xiao (2019)[24] sowie Oussama Oualha (2022)[25] untersucht. Abbildung 6.12 zeigt ein Diagramm, in welchem der Zusammenhang zwischen der Position des Stimulators in X-Richtung (Fahrzeug-Längsachse) und der vom ACC-System eingestellten Geschwindigkeit gemessen wurde (jeweils bei gleichem Bild auf dem Stimulator). Die Verschiebung erfolgte dabei nicht physisch, sondern durch entsprechende Vergrößerung/Verkleinerung des angezeigten Bildes und wird deshalb „virtuelle Verschiebung“ bezeichnet. Dabei ist zu sehen, dass bei näherer Position des Stimulators das ACC-System eine niedrigere Fahrgeschwindigkeit einregelt, wohingegen bei weiter entferntem Stimulator eine höhere Geschwindigkeit gefahren wird. Dieser Zusammenhang lässt sich damit erklären, dass ein verkleinerter Abstand zum Stimulator ein größeres Target-Fahrzeug vermittelt, was vom ACC-System als näheres Fahrzeug empfunden wird. Entsprechend wird bei näherem Target eine niedrigere Geschwindigkeit eingeregelt, um mit dem verbleibenden Abstand eine rechtzeitige Abbremsung gewährleisten zu können. Aus den sechs Versuchswiederholungen ist außerdem erkennbar, dass ein größerer Parameterraum (hier also von -28 bis +28 mm) ein stabileres Verhalten aufweist. Außerdem sind die Messreihen mit kleineren Parametersprüngen (etwa die rote oder schwarze Messreihe) größeren Schwankungen unterworfen. Daraus lässt sich für die Ermittlung solcher Kennlinien festhalten, dass besser größere Parameterräume, bei nicht allzu kleinen Parameterstufen angestrebt werden sollten.

[23] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)
[24] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)
[25] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

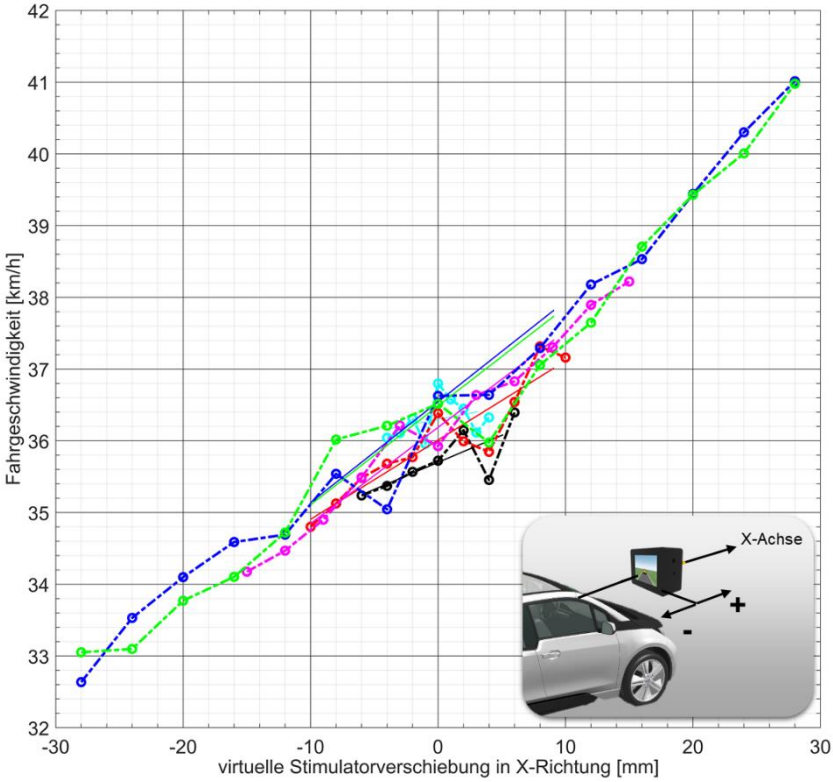


Abbildung 6.12: Vermessung der Sensitivität für die Kameraausrichtung hinsichtlich der virtuellen Verschiebung in X-Richtung (Fahrzeuglängsrichtung) mit sechs verschiedenfarbig dargestellten Versuchswiederholungen

Die außerdem notwendige Kalibrierung des virtuellen Kameramodells in der Umweltsimulation muss nur einmalig für den Aufbau ermittelt und mit entsprechenden Referenzwerten für das Verhalten auf der Straße überprüft werden. Somit kann man die gemessenen Werte bei jeder späteren Verwendung des Stimulators wieder in der Umweltsimulation eingeben, ohne dass diese neu ermittelt und überprüft werden müssen. Ein für diese Untersuchungen ermittelter Parametersatz aus der Kalibrierung ist in Abbildung 6.13 dargestellt.

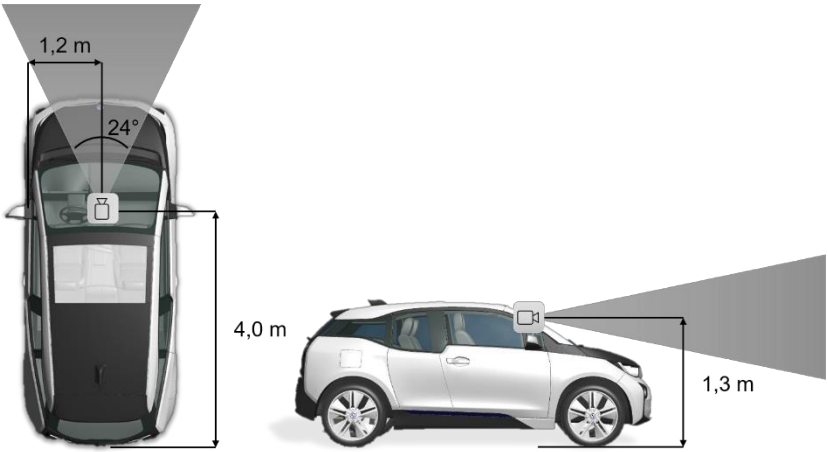


Abbildung 6.13: Kalibrierung des Kamerastimulators als Anbringung der virtuellen Kamera auf dem Fahrzeugmodell

Die Generierung der virtuellen Umwelteindrücke für den Stimulator kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. In dieser Arbeit werden beispielhaft zwei konkrete technische Umsetzungen untersucht.
Bei der ersten Lösung berechnet eine virtuelle Umweltsimulation basierend auf IPG CarMaker in Echtzeit die visuelle Darstellung. Im Vergleich dazu wird als zweites ein Bilderkatalog verwendet, woraus vorher generierte Bilder in Abhängigkeit zum verbleibenden Restabstand auf dem kompakten Stimulator angezeigt werden. Diese Lösung ist in der Anwendung ohne die Integration der umfangreichen Umweltsimulation deutlich weniger aufwändig und könnte damit für frühe Funktionstests die Arbeit in der Entwicklung erleichtern.

6.1.3. Einbindung in die Restumgebungen

Die Umgebung von CarMaker ist speziell für Anwendungen mit Anspruch auf Echtzeitfähigkeit entwickelt und wird über eine drahtlose Netzwerkverbindung mit dem Testfahrzeug sowie dem Stimulationsaufbau verbunden. Um die gesamte Streckenlänge von 100 m zuverlässig mit WLAN abdecken zu können, wird die Reichweite des Accesspoints durch einen Repeater erweitert. Untersuchungen an der verwendeten Übertragungstechnik, wie sie etwa im Rahmen der Co-Betreuten Abschlussarbeit von Sören Raible (2020)[26] erfolgt sind, stellen im Vorfeld sicher, dass diese Form der Einbindung keinen maßgeblichen Einfluss auf die Stimulation

[26] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

hat. Der prinzipielle Aufbau zur Signalübertragung ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Dabei wird das Geschwindigkeitssignal vom Versuchsfahrzeug per CAN ausgelesen und über einen Mikrokontroller von CAN in ein UDP-Paket übersetzt sowie per WLAN an den nahegelegenen WLAN-Accesspoint versendet. Dieser speist das empfangene Paket in ein kabelgebundenes LAN-Signal, welches wiederum von einem weiteren Mikrokontroller von UDP in eine CAN-Botschaft übersetzt wird. In diesem Format kann die Information dem Echtzeitsystem zugeführt werden, welches die virtuelle Umweltsimulation berechnet. Das Echtzeitsystem gibt die Ergebnisse per kabelgebundenem LAN an den Accesspoint aus, sodass von dort die Ergebnisse per WLAN an den CarMaker Client im Fahrzeug übertragen werden. Dieser berechnet aus den empfangenen Daten die visuelle Ausgabe für den Stimulator, welcher per VGA an den Computer angeschlossen ist. Das so dem Fahrzeug vorgespielte Videobild schließt wieder den Regelkreis, da daraus die Fahrzeugautomatisierung wiederum das Stellsignal für die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet.

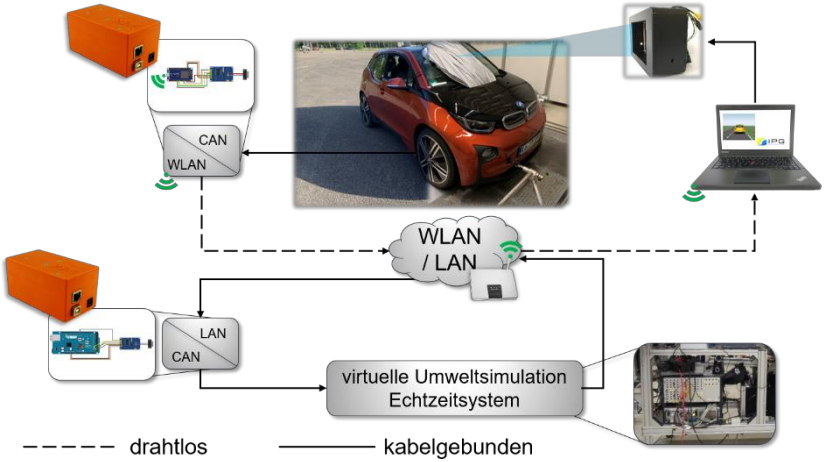


Abbildung 6.14: Prinzipieller Aufbau der Informationsübertragung zwischen Versuchsfahrzeug und virtueller Umweltsimulation

In Abbildung 6.15 ist das Testgelände mit der eingesetzten Technik zur drahtlosen Kommunikation zwischen Fahrzeug und Umweltsimulation zu sehen. Aufgrund der weiteren Strecken auf dem Testgelände wird das WLAN-Signal noch per Repeater verstärkt.

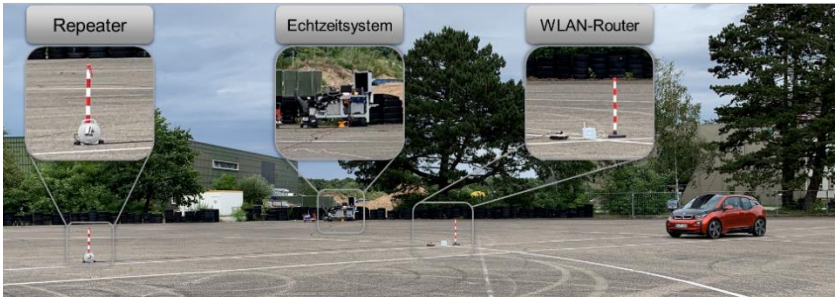


Abbildung 6.15: Testgelände am Campus Ost mit aufgebauter drahtloser Übertragungstechnik

6.1.4. Vorstellung der Referenzmesswerte vom Testgelände

Als Referenzwerte für das Verhalten des Versuchsfahrzeugs wird das zuvor vorgestellte Manöver für jede der vier ACC-Stufen in einer rein physischen Umgebung auf dem oben vorgestellten Testgelände am Campus Ost des KIT 12-mal wiederholt. Damit besteht letztendlich die gesamte Messreihe aus 48 Manöver-Wiederholungen. Die Durchführung dieser Messungen benötigt ungefähr 50 Minuten. Neben der reinen Auffahrt trägt auch die Rückfahrt zum Manöver-Ausgangspunkt maßgeblich zu dieser Dauer bei.

Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Messkurven für jede Stufe in einer Schar zusammengefasst und untereinander dargestellt. Abbildung 6.16 repräsentiert eine solche Messreihe vom Testgelände, wobei Ergebnisse aus dieser Umgebung für den Rest der Arbeit mit grünen Farben dargestellt werden. Als charakteristischer Wert wird der Erkennungsabstand bei jeder Manöverdurchführung als Kreis im Diagramm markiert. Somit kann einfach überblickt werden, wo das Egofahrzeug in den Manöverwiederholungen das Target-Fahrzeug als „erkannt“ anzeigt. Die Farbschattierungen von Hellgrün zu Dunkelgrün zeigt eine „Frühe Erkennung“ bis hin zur „Spätesten Erkennung“ in der jeweiligen Stufe. Somit stellt die hellgrüne Linie die frühste Erkennung, die dunkelste Linie die späteste Erkennung in der jeweiligen Kurvenschar dar. Zusätzlich wird unter der Schar noch ein Boxplot mit den Quartilen (blau) sowie als rote Linie der Mittelwert aus den Erkennungsabständen einer Stufe dargestellt. Diese Auswertung soll dabei helfen, die Erkennungsabstände und deren Streuung unter den vorherrschenden Randbedingungen besser einschätzen zu können.

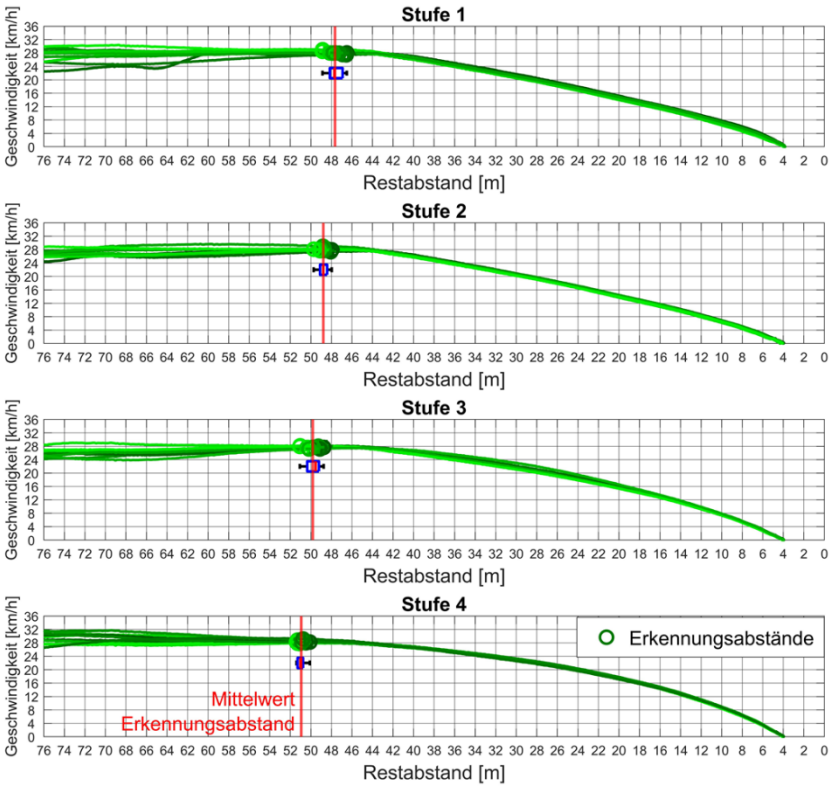


Abbildung 6.16: Referenzmessungen in der physischen Umwelt für die vier ACC-Stufen zur Wahl des Wunschabstands

In dem Schaubild ist zu sehen, dass in Stufe 1 die Anzeige einer Target-Erkennung im Schnitt bei 47,5 m liegt und kurz darauf die bis dahin konstant gehaltene Geschwindigkeit bis kurz vor dem Stillstand linear verzögert wird. Über die ACC-Stufen hinweg erfolgt die Erkennungsanzeige des Target-Fahrzeugs im Durchschnitt leicht früher (im Bereich von drei Metern), was in Stufe 4 durchschnittlich bei 50,9 m der Fall ist. Trotz der früheren Anzeige erfolgt die Verzögerung zunehmend progressiv, sodass die maximale Verzögerung mit höherer Stufe auch erst ab einem deutlich geringeren Restabstand erreicht ist. Allgemein streuen die Erkennungsabstände über alle Stufen hinweg auf einem ähnlichen Niveau in einem Bereich von 3 Metern. Die Wahl des Wunschabstands hat demnach nur einen kleinen Einfluss auf die Erkennungsanzeige des Target-

Fahrzeugs. Die eingeleitete Verzögerung verändert ihre charakteristische Form hin zu einer späteren und damit progressiver durchgeführten Verzögerung.

Messfahrten auf dem Testgelände mit physischem Target-Fahrzeug sind immer den natürlichen Umweltbedingungen, etwa Sonnenstand oder Wolkenlage zum Zeitpunkt der Untersuchung, unterworfen. Hierdurch wird die Reproduzierbarkeit der Messungen stark eingeschränkt. Dies kann sogar bei tief stehender Sonne früh morgens oder nachmittags zu gravierenden Problemen bei der Objekterkennung durch auftretende Blend-Effekte führen, sodass kein repräsentatives Verhalten beobachtet werden kann.

Eine Sensorstimulation schafft hier Abhilfe indem die Kamera immer gleiche Umgebungsbedingungen bietet, was im Folgenden genauer untersucht wird. Die dargestellten Bildeindrücke müssen jedoch virtuell generiert werden. In der hier vorliegenden Arbeit werden zwei Ansätze genauer untersucht, bei denen mit Hilfe der Kamerastimulation reproduzierbare Umweltbedingungen geschaffen werden und damit auch die Versuchszeit kürzer ausfallen.

6.1.5. Einsatz einer virtuellen Umweltsimulation (online generiertes Bildmaterial durch IPG CarMaker)

Bei der Verwendung einer virtuellen Umweltsimulation muss die Fahrzeuggeschwindigkeit an einen echtzeitfähigen Computer übertragen werden. Zu diesem Zweck kommt der in Kapitel 6.1.3 beschriebene Aufbau zum Einsatz. Das Echtzeitsystem berechnet auf Grundlage mehrerer Teilmodelle, beispielsweise umgebenden Verkehrsteilnehmern oder der Straße, wie Umgebungsbedingungen auf das Egofahrzeug einwirken. Diese Ergebnisse werden an einen weiteren Computer übertragen, welcher daraus das Bildmaterial generiert und auf dem angeschlossenen Stimulator anzeigt. Somit werden sowohl die Umweltsimulation, als auch die Generierung des Bildmaterials während der Manöverfahrt durchgeführt. Dieses Vorgehen kann demnach als Online-Berechnung bezeichnet werden.

Die Kommunikation zwischen Umweltsimulation und Versuchsfahrzeug wird über eine WLAN-Verbindung realisiert. Die Verwendung dieser drahtlosen Übertragung bietet die Möglichkeit, einerseits weniger zusätzlicher Technik ins Fahrzeug integrieren zu müssen und andererseits die Potentiale einer IP-basierten Übertragung erproben zu können. Beispielsweise kann die Fahrzeuggeschwindigkeit vom CAN-Bus drahtlos in das virtuelle Manöver eingebunden und die Simulationsergebnisse ohne Kabelverbindung an das bewegte Fahrzeug übertragen werden. Der so erfolgte Aufbau bietet zwar eine genaue Abbildung des verbleibenden Restabstands auf dem Stimulator, bringt

jedoch auch erhebliche Aufwände bei der Einrichtung und eine entsprechende Anfälligkeit für Störungen in der Signalübertragung mit sich.

a. Messungen auf dem Testgelände mit Stimulation

Die Fahrten auf dem Testgelände mit installierter Kamerastimulation basieren auf der oben beschriebenen Konfiguration, welche bei den Referenzmessungen in rein physischer Umgebung verwendet wird. Es kommt die gleiche Teststrecke auf dem Campus Ost des KIT mit der 93 Meter langen Diagonale zum Einsatz. Statt des physischen Target-Fahrzeugs wird die vorgestellt Kamerastimulation verwendet. Deren Ausrichtung und Kalibrierung wird vor den Messungen auf dem Testgelände mittels Fahrten in der Prüfstandsumgebung durchgeführt.

Abbildung 6.17 zeigt die gemessenen Geschwindigkeitsverläufe über dem verbleibenden Restabstand auf dem Testgelände mit Kamerastimulation, welche aus gemeinsamer Forschung mit Matthias Andresen (2020)[27] entstanden sind. Der Abstand wird bei diesem Aufbau nicht physisch ermittelt, sondern resultiert aus der Abstandsermittlung in der virtuellen Umweltsimulation. Gleichzeitig wird vom Fahrzeug das Geschwindigkeitssignal sowie der Zustand des ACC-Systems aufgezeichnet. So können im Nachgang über die identischen Geschwindigkeitswerte in beiden Messaufzeichnungen die Informationen vom Fahrzeug mit denen aus der virtuellen Umweltsimulation synchronisiert werden.

[27] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

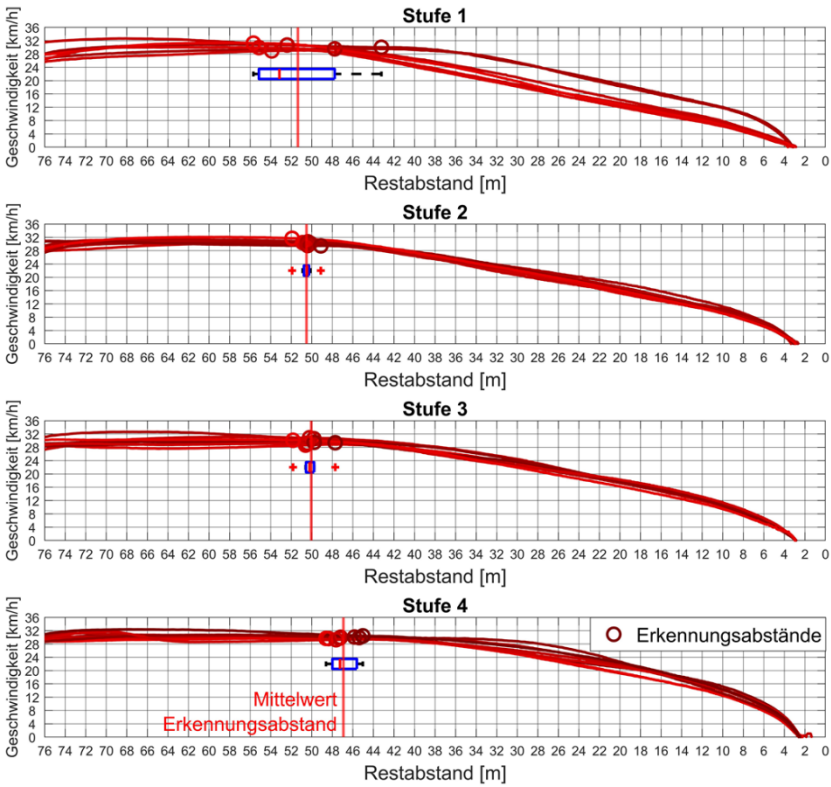


Abbildung 6.17: Messungen an den vier ACC-Stufen zur Wahl des Wunschabstands auf dem Testgelände mit Kamerastimulation und Online-Berechnung der Umweltsimulation

Bei Stufe 1 setzt die Erkennung des Target-Fahrzeugs im Schnitt bei einem verbleibenden Restabstand von 51,1 m ein. Auch in dieser Umgebung wird nach ungefähr drei Metern die Geschwindigkeit bis kurz vor dem Stillstand linear verzögert. Der Abstand, bei der die Anzeige der Targeterkennung einsetzt, verringert sich leicht über die vier Stufen hin zu 47 m Meter. Der anschließende Verzögerungsverlauf verändert sich von dem weitestgehend linearen Geschwindigkeitsabbau in Stufe 1 hin zu einer progressiven Bremsung in Stufe 4, welche ihr Maximum kurz vor dem Stillstand besitzt. Das Testfahrzeug kommt über alle Messungen drei Meter vor dem virtuellen Target zum Stehen.

b. Messungen auf dem Prüfstand

Die Signalübertragung für die vorherige Untersuchung mit Kamerastimulation auf der Teststrecke kann weitestgehend unverändert für die Messungen auf dem Rollenprüfstand verwendet werden. Da hierbei die Kommunikation IP-basiert ist, lassen sich die drahtlosen Komponenten ohne großen Aufwand durch kabelgebundenen Lösungen austauschen. Störungen durch fremde WLAN-Geräte in der Prüfstandsumgebung lassen sich so vermeiden.

Der Prüfstand wird für die Untersuchungen im Modus „Straßensimulation“ betrieben. Um den Einfluss der Signalübertragung zum und vom Fahrzeug besser einschätzen zu können, wurde diese sowohl kabelgebunden als auch drahtlos verwendet. Untersuchungen in Zusammenarbeit mit Sören Raible (2020)[28] ergaben dabei keine signifikanten Unterschiede in den Messergebnissen. Die Messungen werden nach demselben Vorgehen wie bei den beiden vorherigen Messreihen vom Testgelände aufbereitet und sind in Abbildung 6.18 dargestellt.

[28]Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

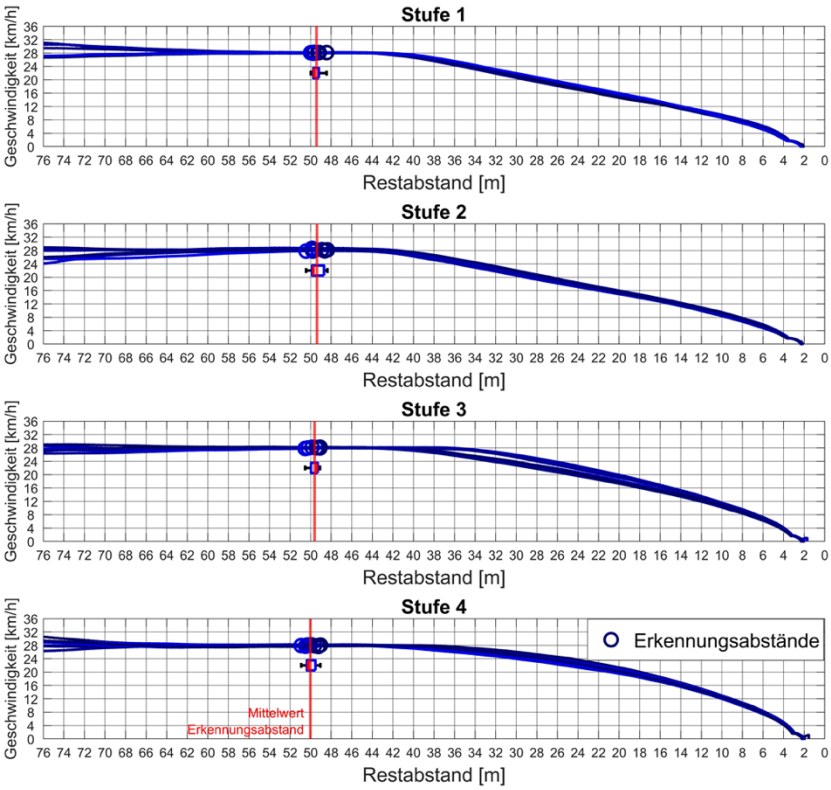


Abbildung 6.18: Messungen an den vier ACC-Stufen zum Wunschabstand auf dem Rollenprüfstand mit Kamerastimulation und Online-Berechnung der Umweltsimulation

Das Diagramm zeigt, dass in Stufe 1 die Anzeige einer Target-Erkennung im Schnitt bei 49,5 m liegt und ab 42,5 m, die bis dahin konstant gehaltene Geschwindigkeit, bis kurz vor dem Stillstand linear verzögert wird. Über die Stufen hinweg erfolgt die Erkennungsanzeige nahezu identisch bei knapp 50 Metern (jeweils verteilt über einen Bereich von zwei Metern). Trotz des identischen Abstands für die Erkennungsanzeige erfolgt mit höherer Stufe die Verzögerung zunehmend progressiv, sodass die maximale Verzögerung mit höherer Stufe auch erst ab einem deutlich geringeren Restabstand erreicht ist. Allgemein streuen die Erkennungsabstände über alle Stufen hinweg auf einem ähnlichen Niveau in einem

Bereich von 2 bis 3 Metern. Das Fahrzeug kommt schlussendlich mit einem Restabstand von etwas mehr als 2 Meter zum Stehen.

c. Vergleich der Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Untersuchung

Die zuvor ermittelten Messkurven werden im Folgenden miteinander verglichen und dabei Unterschiede sowie Gemeinsamkeiten diskutiert. Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 6.19 die wichtigsten Kennwerte aus Kapitel 5.4 zusammengetragen und farblich der jeweiligen Umgebung zugeordnet.

Umgebung	ACC-Stufe	Erkennungs-abstand [m]	Streuung Erkennung-abstand [m]	Einsetzen der Verzögerung nach Erkennung [m]	Verzögerungs-form	End-abstand [m]	Streuung Endabstand [m]
Testgelände vollkommen physische Umgebung	1	47,5	3	5	linear	4	0,1
	2	48,8	2	6	weit. linear	4	0,1
	3	49,9	3	8	weit. progressiv	4	0,1
	4	50,9	2	5	progressiv	4	0,1
Testgelände mit Kamera-stimulation	1	51,1	12,8	6	linear	3	0,4
	2	50,5	3	4,5	weit. linear	3	0,3
	3	50,0	4	5	weit. linear	3	0,1
	4	47,0	3,6	9	progressiv	3	0,2
Rollenprüf-stand mit Kamera-stimulation	1	49,5	2	7	linear	2,1	0,1
	2	49,5	2,5	7,5	linear	2,1	0,1
	3	49,8	2	9,8	weit. progressiv	2,1	0,1
	4	50,0	2,1	8	progressiv	2,1	0,1

Abbildung 6.19: Vergleich der drei Validierungsumgebungen anhand des Erkennungs- und Endabstands

Grundsätzlich weicht der Mittelwert des Erkennungsabstands über alle drei Umgebungen hinweg mit ca. 50 m leicht voneinander ab. Damit wird auch bei den beiden Umgebungen mit Kamerastimulation das Verhalten von der Auffahrt auf ein physisches Fahrzeug sehr gut reproduziert. Einzig die Verwendung der Sensorstimulation bei der Fahrt auf dem Testgelände weist mit Werten um 4 Meter eine wenig höhere Streuung auf. Der Rollenprüfstand wiederum zeigt mit 2 Metern eine um einen Meter geringer ausfallende Streuung.

Die Verzögerung setzt ca. 5 bis 10 Meter nach der Target-Erkennung ein. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Umgebungen kaum. Viel mehr beeinflusst die

Stufe des Wunschabstands das weitere Verhalten. Die Verzögerung setzt mit höherer Stufe nicht mehr zu einem direkt erkennbaren Abstand ein, sondern wird langsam aus der Konstantfahrt heraus aufgebaut. Die anschließende Abbremsung wird auch durch die Stufe des Wunschabstands geprägt. Stufe 1 weist eine größtenteils lineare Verzögerung auf, wohingegen mit zunehmender Stufe eine immer stärker werdende, progressive Bremsung erfolgt.

Den Stillstand erreicht das Egofahrzeug immer mit einem nahezu gleichen Abstand vor dem Target. Allerdings ist hier die Wahrnehmung durch die Kamerastimulation im Abstand kleiner fünf Meter nicht ähnlich zur physischen Umgebung, sodass mit ihr installiert der Endabstand bei 3 bzw. 2 Metern liegt.

Schlussendlich lässt sich festhalten, dass die untersuchten Umgebungen ein hohes Maß an Vergleichbarkeit aufweisen. Dabei besitzt der Rollenprüfstand in Kombination mit der Kamerastimulation die höchste Reproduzierbarkeit durch geringster Streuung. Das Testgelände zusammen mit der Stimulation streut dagegen mehr, kann aber trotzdem die allgemeinen Tendenzen bei der Verzögerung über die Stufen des Wunschabstands abbilden. Damit besitzt diese Validierungsumgebungen zwar eine höhere Variation in den Messwerten, bringt allerdings durch die Unabhängigkeit von sichtbehindernden Umwelteinflüssen auch Vorteile gegenüber der vollkommen physischen Umwelt mit.

Der Aufwand zur Einrichtung der echtzeitfähigen Umweltsimulation und der dafür notwendigen Signalübertragung sind jedoch im Entwicklungsalltag eine große Einstiegshürde für die Verwendung bei der Validierungsarbeit. Aus diesem Grund wird im nächsten Unterkapitel eine weniger aufwändigere Lösung mit offline Bildmaterial evaluiert.

6.1.6. Einsatz eines Bilderkatalogs (offline generiertes Bildmaterial)

Zum einfacheren Aufbau und Betrieb der hier vorgestellten Validierungsumgebungen soll im Folgenden eine Offline-Generierung ausgewählter Bilder mit dem Target-Fahrzeug in unterschiedlichen Abständen untersucht werden. Der dabei verwendete Bilderkatalog ist in der Co-Betreuten Abschlussarbeit von Tobias Montag (2019)[29] entstanden, die Messungen sind gemeinsam mit Adrian Peschina (2020)[30] durchgeführt worden. Somit wird während des Manövers nur noch vom Computer im Fahrzeug aus einem zuvor generiertem Bilderkatalog das passende Bild zum verbleibenden Restabstand ausgesucht und auf dem Stimulator ausgegeben. In Abbildung 6.20 sind die Abstufungen aufgeführt, aus denen sich der

[29] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)
[30] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

verwendete Bilderkatalog zusammensetzt. Die Bildabstufungen sind bei engerem Abstand feiner aufgelöst, sodass Abstandsänderungen nah des Targets möglichst genau der Fahrzeugautomatisierung vermittelt werden können.

Restabstand [m]	1 - 3	3 - 12	12 - 20	20 – 30	30 – 40	40 - 100
Bildabstufungen [m]	0,05	0,1	0,5	1	2	5

Abbildung 6.20: Abstufungen des Bilderkatalogs

a. Messungen auf dem Testgelände mit Stimulation

Bei der Validierungsumgebung mit Stimulation auf dem Testgelände ist der Aufbau zur Signalübertragung bei der Online-Bildgenerierung mittels Umweltsimulation besonders aufwändig. Abhilfe schafft hier ein Computer im Fahrzeug mit einem hinterlegten Bilderkatalog, der das zur aktuellen Entfernung passende Bild des Targets auswählt und an den Stimulator überträgt. Abbildung 6.21 zeigt die so gewonnen Messergebnisse, welche auf gleiche Art und Weise wie bisher dargestellt sind.

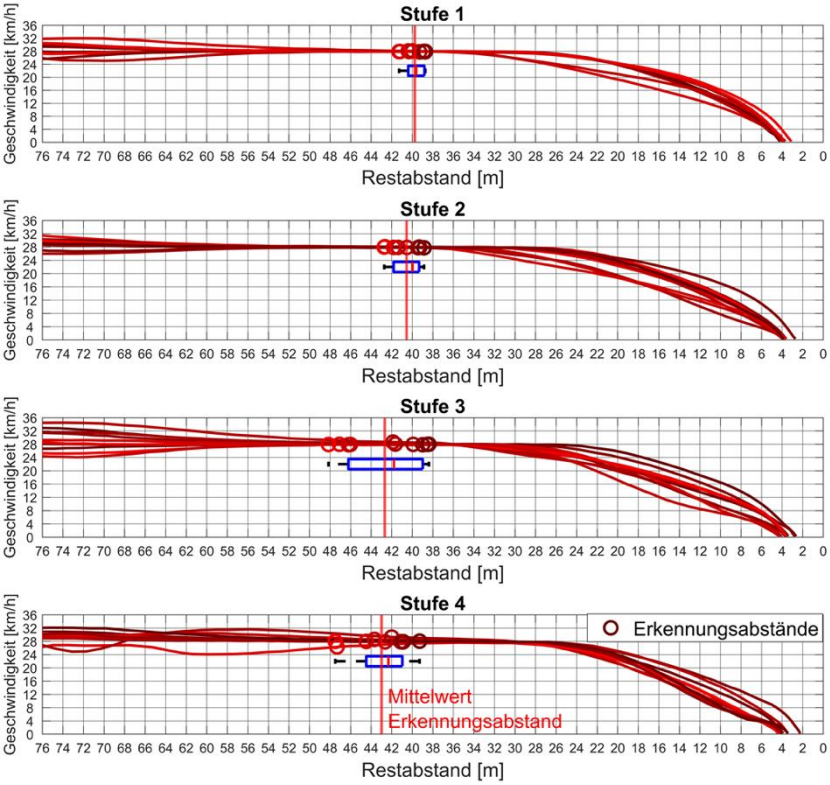


Abbildung 6.21: Messungen an den vier ACC-Stufen zum Wunschabstand auf dem Testgelände mit Kamerastimulation und Verwendung des Bilderkatalogs als Offline-Generierung der grafischen Ausgabe

Die Messungen zeigen, dass in Stufe 1 die Anzeige einer Target-Erkennung im Schnitt bei 39,9 m liegt und ab 32 m die Fahrgeschwindigkeit mit abnehmendem Abstand zunehmend stärker bis zum Stillstand verzögert wird. Über die Stufen hinweg schwankt die Erkennungsanzeige zwischen 38 und 48 m, wohingegen in Stufe 4 durchschnittlich mit 43 Metern am frühsten die Erkennung angezeigt wird. Überdies ist zu sehen, dass mit höherer Stufe die Verzögerung später einsetzt. Allgemein streuen die Erkennungsabstände über alle Stufen hinweg deutlich stärker, als es bei der Online-Bildgenerierung der Fall war. Das Fahrzeug kommt mit einem Restabstand von ungefähr 4 Metern vor dem Target zum Stehen.

b. Messungen auf dem Rollenprüfstand

Die Ergebnisse der Messungen mit offline-generiertem Bilderkatalog auf dem Rollenprüfstand sind in Abbildung 6.22 zusammengefasst.

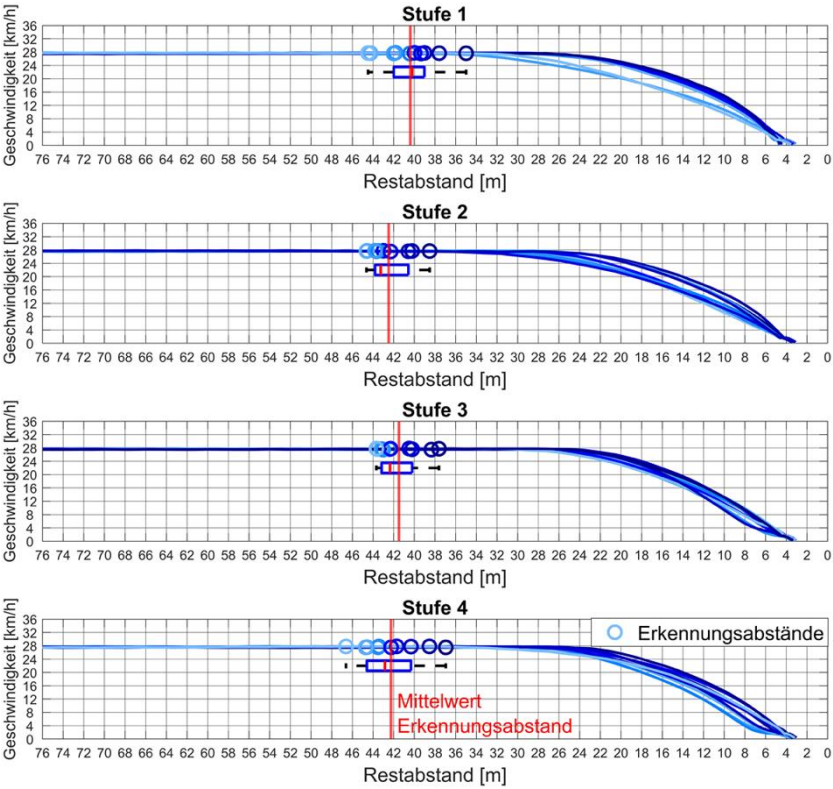


Abbildung 6.22: Messungen an den vier ACC-Stufen zum Wunschabstand auf dem Rollenprüfstand mit Kamerastimulation und Verwendung des Bilderkatalogs als Offline-Generierung der grafischen Ausgabe

Die Messungen zeigen, dass in Stufe 1 die Anzeige einer Target-Erkennung im Schnitt bei 40,2 m liegt und ab 33 m die Fahrgeschwindigkeit mit abnehmendem Abstand zunehmend stärker bis zum Stillstand verzögert wird. Über die Stufen hinweg schwankt die Erkennungsanzeige zwischen 34 und 46 m, wohingegen in

Stufe 2 durchschnittlich mit 42,4 Metern am frühsten die Erkennung angezeigt wird. In dieser Umgebung ist jedoch nicht erkennbar, dass mit höherer Stufe die Verzögerung auch später einsetzt. Hierbei streuen die Erkennungsabstände über alle Stufen hinweg deutlich stärker, als es bei der Online-Bildgenerierung der Fall ist. Das Fahrzeug kommt mit einem Restabstand von ca. 4 Metern vor dem Target zum Stehen. Anzumerken ist, dass vereinzelt noch kurz vor Stillstand die Verzögerung abgeschwächt wird, sodass der Endabstand dann 3 Meter beträgt.

c. Erkenntnisse aus der Untersuchung mit offline-generiertem Bildmaterial

Die Verwendung von offline-generiertem Bildmaterial hat gezeigt, dass sich das kamerabasierte ACC-System erfolgreich stimulieren lässt.

Der Aufwand für die Verwendung des Katalogs beschränkt sich auf die einmalige Erstellung der Bilder. Dafür ist der Aufbau zur Versuchsdurchführung deutlich einfacher und reduziert sich auf den Computer im Fahrzeug, welcher das Bildmaterial auf dem Stimulator ausgibt. Auch ein Austausch des Katalogs, beispielsweise für Manöver mit anderen Target-Fahrzeugen, ist einfach durchführbar.

Aufgrund der Bildabstufungen von 5 beziehungsweise 2 Metern im Bereich der Target-Erkennung zwischen 55 und 40 Metern schwankt die Erkennungsanzeige deutlich stärker, als es bei der online-generierung der Fall ist. Hier müssten weiterführende Untersuchungen mit einem in diesem Bereich feiner aufgelösten Bilderkatalog genauer untersuchen, inwiefern sich auch dort das Verhalten von der rein physischen Umgebung reproduzieren lässt.

Schlussendlich lässt sich festhalten, dass ein offline-generierter Bilderkatalog grundsätzlich das kamerabasierte ACC-System stimulieren kann und wenig dynamische Manöver, wie z.B. stationäre Folgefahrten für Energieeffizienz-Untersuchungen, so untersucht werden können. Die Stimulationsqualität ist dabei maßgeblich von der Bildabstufung in relevanten Abstandsbereichen abhängig und sollte für die entsprechende Anwendung ausgelegt werden.

6.1.7. Zusammenfassung der Untersuchungen an den vier Stufen des ACC-Wunschabstands

Die Untersuchungen an den vier Stufen des ACC-Wunschabstands zeigen, wie das Vorgehen mit einer Sensorstimulation am Gesamtfahrzeug bei Variation von Parametern der Automatisierung eingesetzt werden kann. Auch wenn der Aufwand zum Aufbau gemischt virtuell physischer Validierungsumgebungen größer ist, bieten diese ein deutlich höheres Maß an Kontrollierbarkeit über die Versuchs-Umgebung. Somit können gezielt einzelne Parameter an der

Fahrzeugautomatisierung oder der Umwelt variiert und die Auswirkungen daraus quantifiziert werden.

Für die Untersuchungen wurden zu Beginn des Kapitels zwei Validierungsziele definiert. Dabei stand aus Sicht des Entwickelnden einer automatisierten Fahrfunktionen der Parameter im Fahrzeug zur Wahl des Wunschabstands im Fokus. Es sollte untersucht werden, ob diese Stufe Einfluss auf die Anzeige eines erkannten Target-Fahrzeugs hat. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dies weniger signifikant der Fall ist. Die erkennbaren Abweichungen liegen innerhalb der Streuung, welche allein eine Versuchswiederholung mit sich bringt. Viel mehr hat sich gezeigt, dass die gewählte Stufe des Wunschabstands das Verhalten der Automatisierung bei der weiteren Auffahrt beeinflusst. Eine höhere Stufe des Wunschabstands sorgte für einen späteren und dann progressiv ablaufenden Geschwindigkeitsabbau. Der Endabstand zwischen Ego- und Target-Fahrzeug ist wiederum unabhängig von der Stufe.

Als zweite Perspektive wurde die Übertragung von Fahrzeuguntersuchungen aus rein physischen Validierungsumgebungen in gemischt virtuell / physische Umgebungen mit Verwendung der Kamerastimulation untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass sich das Fahrzeugverhalten mit Stimulation sowohl auf dem Testgelände, als auch auf dem Rollenprüfstand reproduzieren lässt. Vor allem der Rollenprüfstand weist dabei die größtmögliche Kontrolle über Umgebungsparameter und kann damit auch ein besonders hohes Maß an Reproduzierbarkeit aufweisen.

Neben der Online-Generierung des Bildmaterials werden auch Untersuchungen an einem offline erstellen Bilderkatalog durchgeführt. Die Messungen zeigen, dass die Vereinfachung der Umweltsimulation in der Lage ist, eine Stimulation der Kamerasensorik zu ermöglich. Eine erhöhte Streuung beim Erkennungsabstand deutet darauf hin, dass die Bildabstufung des verwendeten Katalogs in diesem Abstandsbereich noch zu grob aufgelöst ist, um dort das Verhalten von der physischen Umgebung oder dem online-generierten Bildmaterial abbilden zu können. Sofern ein entsprechend aufgebauter Bilderkatalog zum Einsatz kommt, wäre eine so aufgebaute Umgebung also beispielsweise zur frühen Überprüfung von Zielwerten oder zur schnellen Kontrolle von grundsätzlichen Systemeigenschaften geeignet.

6.2. Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Dämmerungsszenarien

Im ersten Abschnitt des Kapitels 6 wurde der Einfluss von virtuell generierten Umwelteindrücken bei Variation des eingestellten Wunschabstands für das ACC-System untersucht. Darauf aufbauend werden nun gewonnene Erkenntnisse aufgegriffen und auf Untersuchungen bezüglich der Reproduzierbarkeit von Szenarien mit Dämmerungsfahrten angewendet. Die dabei durchgeführten Untersuchungen sind im Rahmen der Masterarbeit von Christopher Kolling (2021)[31] entstanden. In einem ersten Schritt dienen Fahrten auf dem Testgelände mit physischem Target bei einsetzender Abenddämmerung als Referenz. Das dabei beobachtete Verhalten, beispielsweise eine später einsetzende Objekterkennung und damit spätere Verzögerung, wird daraufhin mittels Stimulator und einer Verminderung der Darstellungshelligkeit bei virtuell generierte Umwelteindrücke auf einem Rollenprüfstand nachgestellt.

Als erster Schritt des Vorgehens wird im Folgenden das Validierungsziel festgelegt. Die reproduzierbare Untersuchung von Dämmerungseinflüssen kann beispielsweise für die Analyse einer rechtzeitigen Objekterkennung und anschließenden Verzögerung bei Abendfahrten dienen. Diese Problemstellung verursacht mit konventionellen Entwicklungsumgebungen erheblichen Aufwand, da die Rekonstruktion von Helligkeitsbedingungen bei Erprobungsfahren im öffentlichen Straßenverkehr nur sehr eingeschränkt möglich ist und dazu beispielsweise nur ein enges Zeitfenster und über dies der jahreszeitenabhängige Sonnenstand unkontrollierbare Einflüsse darstellen. Das Validierungsziel lautet, dass die Frage „Lässt sich das Verhalten des ACC-System bei Fahrt auf ein stehendes Target in Abenddämmerung mit dem Rollenprüfstand und der Kamerastimulation nachstellen?“ beantwortet werden kann.

Als Szenario wird die Fahrt aus knapp 100 Metern Entfernung auf ein stehendes Target-Fahrzeug verwendet. Damit können die Erfahrungen aus den vorherigen Untersuchungen zur Wahl des Wunschabstandes des ACC-Systems aufgegriffen werden. In den durchgeführten Untersuchungen wird immer Stufe 1 für den Wunschabstand im Fahrzeug eingestellt, damit die Verzögerung möglichst früh eingeleitet und dann gleichmäßig abgebremst wird. Somit werden diesmal keine Parameter im Fahrzeug, sondern an der Umwelt über die Versuchsdurchführung variiert.

[31] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

6.2.1. Messungen auf dem Testgelände mit physischem Target

Das Fahrzeugverhalten auf dem Testgelände mit physischem Target-Fahrzeug wird für die späteren Untersuchungen als Referenz aufgezeichnet. Dabei wird neben der Uhrzeit auch die Umgebungshelligkeit zu Beginn jeder Manöverwiederholung über die Helligkeits-Sensorik der Lichtautomatik des Versuchsfahrzeugs dokumentiert. Diese ermittelt über zwei Sensoren, einen nach oben und einen nach vorne gerichtet, die Umgebungshelligkeit. Ersterer ermittelt seine Werte in W/m², der zweite Sensor gibt die Werte in LUX aus. Die Messungen werden im August bei klarem Sonnenschein ohne Bewölkung ab kurz vor 20 Uhr noch ohne messbare Dämmerung (1701 W/m² und 2600 LUX – die Sensoren geben damit ihren Maximalwert aus) durchgeführt und bis 21:46 Uhr ohne messbare Umgebungshelligkeit (0 W/m² und 0 LUX) durchgehend wiederholt. Eine Durchführung benötigt dabei ungefähr drei Minuten, sodass in dem Zeitraum von 2 Stunden knapp 50 Wiederholungen durchgeführt werden konnten. Um realistische Straßenverhältnisse abzubilden, wird das Abblendlicht im Versuchsfahrzeug eingeschaltet. Abbildung 6.23 zeigt die Lichtverhältnisse zu Beginn der Messreihe um 19:52 Uhr und am Ende um 21:46 Uhr. Die Fahrten verlaufen Richtung Nord-Osten, damit die Sonne beim Untergang nicht direkt in die Kamera strahlt und zu Blend-Effekten führt.



Abbildung 6.23: Eindrücke von den Lichtverhältnissen zum Start um 19:52 Uhr (links) und dem Ende der Versuchsreihe um 21:46 Uhr

Die erhobenen Messdaten sind zur besseren Vergleichbarkeit in vier Phasen (Dämmerungsphase 1 bis 4) eingeteilt, was in Abbildung 6.24 dargestellt ist. Jede dieser Phasen deckt damit ungefähr 25 Minuten ab und beinhaltet 10 Messungen.

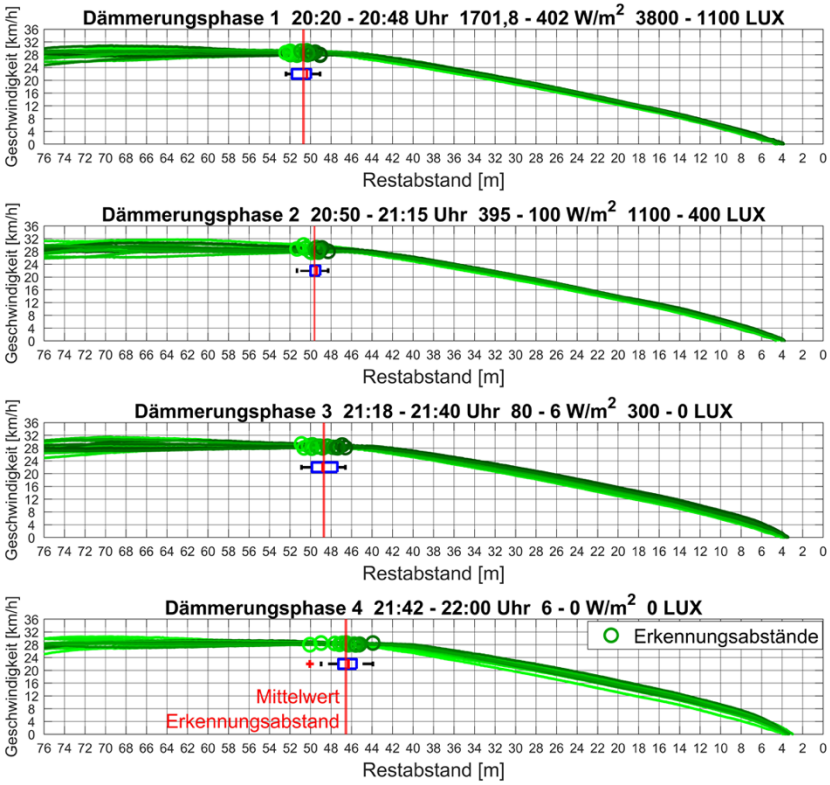


Abbildung 6.24: Messungen auf dem Testgelände mit physischem Target über die Abenddämmerung zwischen ab 19:52 Uhr bis 21:46 Uhr

In Dämmerungsphase 1 liegt der durchschnittliche Erkennungsabstand bei 50,8 m und damit bei einem ähnlichen Wert wie bei den Referenzmessungen in Kapitel 6.1.4. Über die gesamte Versuchsreihe hinweg ist zu erkennen, dass bei zunehmender Dämmerung die Erkennung immer später einsetzt. Hierbei kann die Variation in den Erkennungsabständen nicht mehr einer Streuung unter gleichen Randbedingungen zugeschrieben werden, sondern liegt maßgeblich an der sich kontinuierlich ändernden Umgebungshelligkeit. Die zunehmend später einsetzende Erkennung bedingt wieder eine progressive Verzögerung, da weniger Strecke zur gleichmäßigen Verzögerung zur Verfügung steht. Der Endabstand liegt zu Beginn der Untersuchung wieder bei 4 Metern. Über den Abend hinweg verringert sich

allerdings auch dieser Wert, sodass in der letzten Dämmerungsphase bis auf einen Abstand von 3 Metern zum Target-Fahrzeug aufgefahren wird.

6.2.2. Messungen mit Rollenprüfstand und stimulierter Dämmerung

Der Aufbau des System-Modells „Umwelt“ zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit von Dämmerungsfahrten auf dem Rollenprüfstand mit Kamerastimulation greift auf den in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Aufbau mit Rollenprüfstand und Kamerastimulation zurück. Statt der Parametervariation am ACC-System im Fahrzeug wird nun die Darstellung auf dem Stimulator verändert. Es wird einerseits das Darstellungs-Szenario von „Daylight“ mit 50% Displayhelligkeit auf „Night Scene“ mit zu Beginn 85% Helligkeit gewechselt. Im Anschluss wird dort die Helligkeit in Prozentschritten bis 70% verringert und die Messung auf jeder Stufe drei Mal wiederholt. Durch diesen Ablauf umfasst die Messreihe wieder knapp 50 Einzelmessungen und besitzt einen Parameterraum, welcher die Eindrücke aus der physischen Umgebung abdecken soll. Da eine Fahrt zurück zum Ausgangspunkt bei diesem Versuchsaufbau entfällt, kann die komplette Messreihe in einer guten halben Stunde durchgeführt werden. Abbildung 6.25 zeigt die Darstellung der Umwelt zu Beginn und Ende der Messreihe.

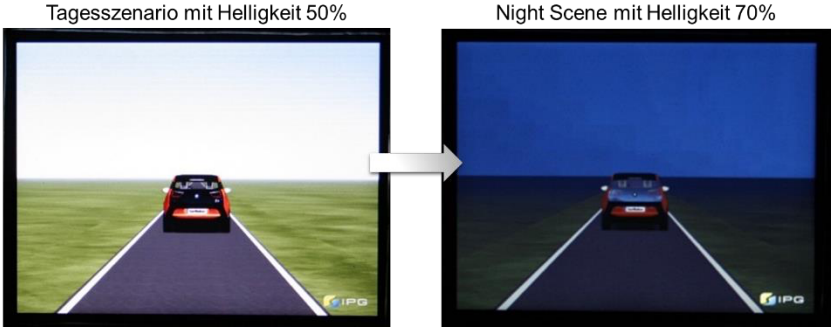


Abbildung 6.25: Darstellung der Stimulatoreindrücke zu Beginn und am Ende der Messreihe

Wie schon bei den Messreihen zuvor werden auch diesmal zur besseren Übersichtlichkeit die Messungen in Diagrammen mit Kurvenscharen zusammengefasst. So beginnt Abbildung 6.26 im ersten Subplot mit den Einstellungen der Stufe eins. Darunter beginnen dann die Variationen der Stimulatorhelligkeit mit jeweils drei Helligkeitsprozentpunkten in einem Diagramm zusammengefasst.

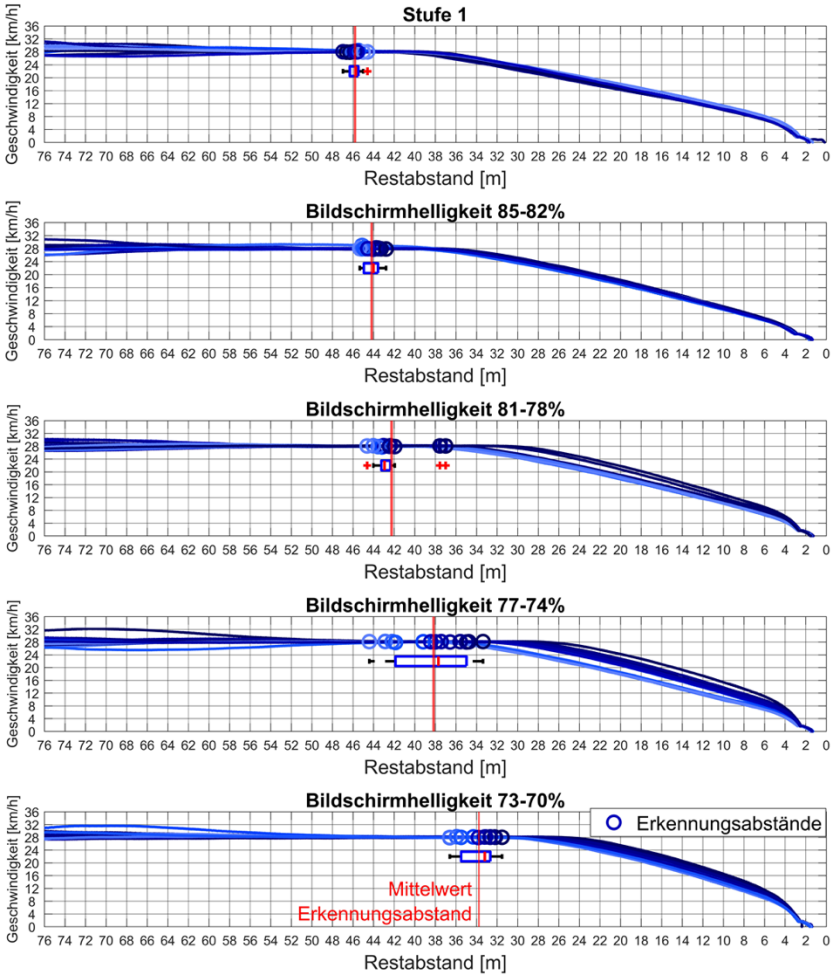


Abbildung 6.26: Messungen auf dem Rollenprüfstand mit stimulierter Dämmerung durch Anpassung der Stimulatorhelligkeit

Die Messungen in Stufe 1 zeigen eine Anzeige der Target-Erkennung ab durchschnittlich 46 Metern. Damit setzt die durchschnittliche Erkennung ca. vier Meter später gegenüber den vorherigen Messungen auf dem Rollenprüfstand mit

Kamerastimulation von knapp 50 Metern ein. Dies ist durch Schwankungen bei wiederholter Anbringung des Stimulators zu erklären und kann zukünftig durch ein weiter standardisiertes Vorgehen zur Ausrichtung minimiert werden. Der Wechsel auf „Night Scene“ mit 85% Helligkeit verringert die durchschnittliche Erkennungsanzeige um zwei Meter auf 44 m. Auch in der Helligkeitsabstufung zwischen 81% bis 78% wird im Durchschnitt zwei Meter später das erkannte Target angezeigt. Im Helligkeitsberech zwischen 77% und 74% verteilt sich die Anzeige der Target-Erkennung über einen größeren Bereich zwischen 44,5 m und 33,5 m, womit anscheinend die Kamera in diesem Helligkeitsbereich die größten Erfassungsschwierigkeiten besitzt. Die letzten Messungen zwischen 73% und 70% liegen wiederum dichter zwischen einem Abstand von 37 m und 31,5 m zusammen.

Der Dämmerungseinfluss von der physischen Umgebung kann mit Stimulation bei Einstellungen bis 77% abgebildet werden, wenn die Anzeige der Targeterkennung über alle Helligkeiten hinweg um vier Meter nach früher angepasst wird. Dies ist etwa durch eine entsprechende Verschiebung des Stimulators möglich.

6.2.3. Vergleich der Messungen und Erkenntnisse aus den Untersuchungen

Werden die Abstände vom Prüfstand wie oben beschrieben nach früher verschoben, lässt sich das Verhalten von der Dämmerungsfahrt auf dem Testgelände durch virtuelle Einflüsse nachstellen. Abbildung 6.27 zeigt einen direkten Vergleich der einzelnen Phasen, in der die Target-Erkennung stattfindet. Daraus wird deutlich, dass eine entsprechende Parametrisierung der Stimulation vergleichbare Erkennungsabstände zur Folge hat.

Für die zukünftige Entwicklungsarbeit lässt sich festhalten, dass der Einsatz einer Kamerastimulation großes Potential für effizientere Untersuchungen an Dämmerungseinflüssen besitzt. Es entfällt nicht nur die Rückfahrt zur Manöverausgangsposition. Auch das gezielte Nachstellen von Grenzbedingungen (so genannte „Edge-Cases“), ohne das Warten auf natürliche Umgebungsbedingungen, stellt einen großen Effizienzgewinn dar.

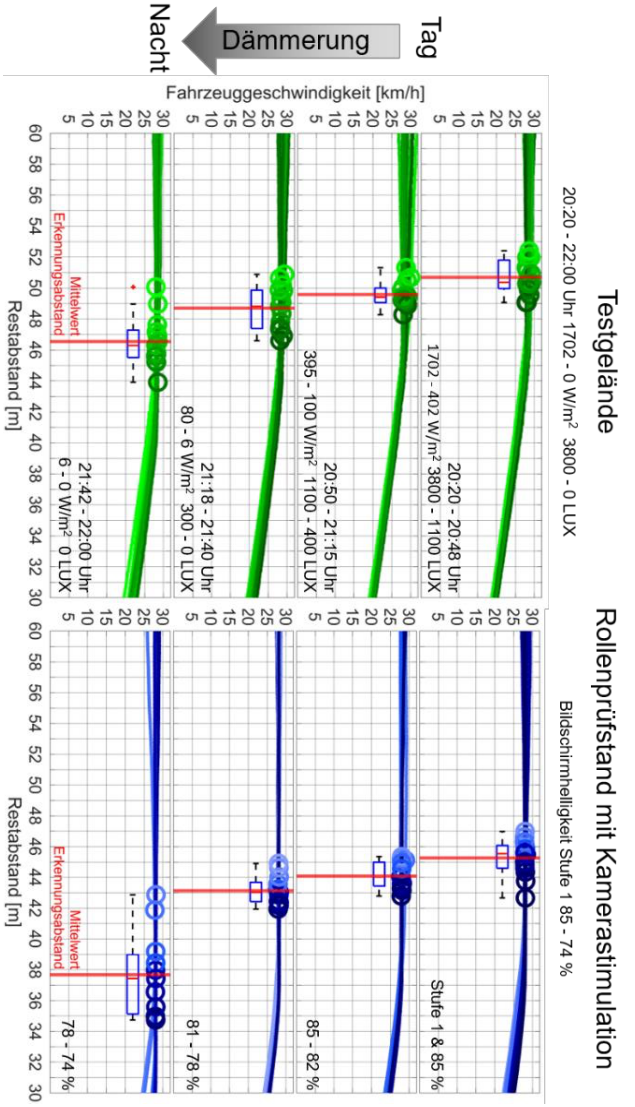


Abbildung 6.27: Vergleich der Messwerte zur Dämmerungsfahrt zwischen Testgelände mit physischem Target-Fahrzeug (links) und stimuliertem Prüfstandsaufbau (rechts)

6.3. Ermöglichung von frühen Validierungsaktivitäten einer multikriterielle Fahrstrategieplanung

Neben Untersuchungen zur sensorstimulierten Auffahrt soll im folgenden Kapitel anhand dynamischerer Fahrszenarien die Verwendung des kompakten Kamerastimulators weiter untersucht werden. Zu diesem Zweck bietet die gemeinsame Forschung mit Dominic Waldenmayer (Waldenmayer et al., 2021) Fragestellungen hinsichtlich der Energieverbräuche von hybrid elektrischen Fahrzeugen bei einer multikriteriellen Fahrstrategieplanung. Hierbei liegen die Forschungsfragen von Herrn Waldenmayer bei den möglichen Effizienzgewinnen einer längerfristigen Fahrstrategieplanung. Die Fahrstrategieplanung arbeitet mit dem Abstandswert zum vorausfahrenden Fahrzeug, welcher durch die Umfeldsensorik ermittelt wird. Soll Forschung an dieser Planung bereits zu einem frühen Zeitpunkt in der Entwicklung am Gesamtfahrzeug erfolgen, müssen einige Randbedingungen beachtet werden. Eine zentrale Frage liegt in den erwartbaren Vorteilen der Fahrstrategieplanung. Hierzu muss die Testumgebung einerseits in ein bereits bestehendes Fahrzeug integriert werden und andererseits ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit aufweisen. Dabei muss sichergestellt sein, dass unter gleichen Umgebungsbedingungen gleiche Ergebnisse produziert werden können. Hierdurch wird vermieden, dass die Ergebnisse nicht Charakteristiken der Testumgebung abbilden, sondern tatsächlich das Verhalten der Fahrstrategieplanung wiedergeben. Unter diesen Randbedingungen bringt die sensorstimulierte Validierungsumgebung in Verbindung mit dem Rollenprüfstand einerseits eine gute Reproduzierbarkeit durch die virtuelle Umweltsimulation und andererseits eine hohe Repräsentanz des physischen Versuchsfahrzeugs mit realen Energieverbräuchen mit sich.

Details zur Funktionsweise und dem Ablauf der Trajektorienplanung können aus (Waldenmayer et al., 2021) entnommen werden.

6.3.1. Integration der Trajektorienplanung in ein hybridelektrisches Fahrzeug

Um die Forschung von Herrn Waldenmayer am Gesamtfahrzeug zu ermöglichen, muss in einem ersten Schritt die Trajektorienplanung in ein Gesamtfahrzeug integriert werden. Hierzu müssen Signale vom Fahrzeug und der Umgebungs-Sensorik an den entsprechenden Schnittstellen empfangen sowie die Steuersignale wieder in das Fahrzeug eingespeist werden. Abbildung 6.28 zeigt die Einbindung der Trajektorienplanung an die Fahrzeug- und Sensorschnittstellen. Dabei kommt als Entwicklungsfahrzeug der bereits in Kapitel 4.1.1 vorgestellte Porsche Cayenne S Hybrid mit einem 34 kW Elektromotor und einer 1,7 kWh Nickel-Metallhydrid Traktionsbatterie als P2 Hybrid zum Einsatz. An diesem Fahrzeug kann die interne

CAN-Kommunikation mitgelesen und somit die Energieverbräuche im Betrieb ermittelt sowie hinsichtlich der hybriden Fahrstrategie untersucht werden. Die CAN-Nachrichten werden zur Verarbeitung in Matlab durch einen Mikrokontroller, wie er in Kapitel 5.1.6 vorgestellt wurde, in serielle Kommunikation umgewandelt und an den Computer mit der Trajektorienplanung übertragen. Für die Ermittlung der Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen wird eine Monokamera vom Typ „MobilEye 630“ verwendet. Diese stellt Informationen über Abstände zu umgebenden Fahrzeugen ebenfalls per CAN zur Verfügung. Die Steuerbefehle aus der Planung werden als analoges Spannungssignal über die Anschlussstelle des Fahrpedals (E-Gas) wieder in das Fahrzeug eingespeist und damit die Integration abgeschlossen.

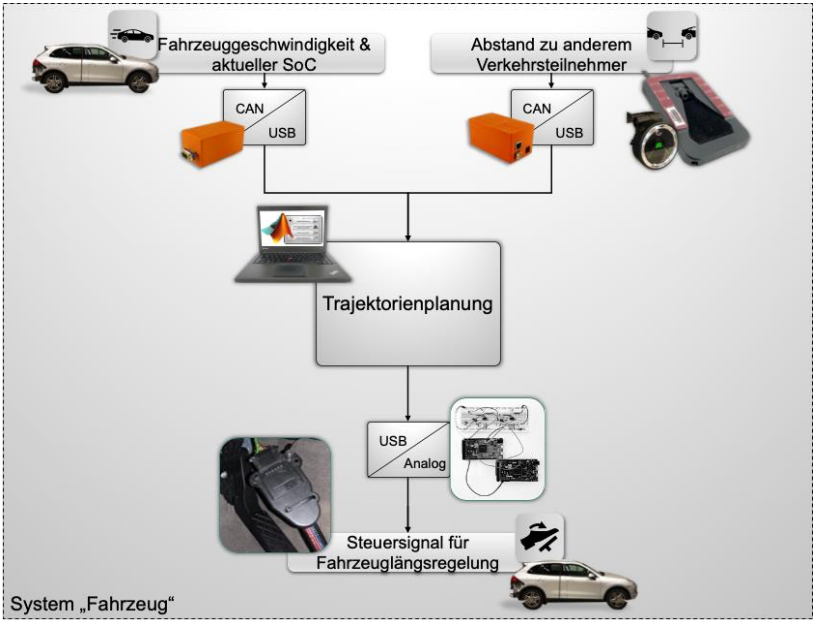


Abbildung 6.28: Integration der Trajektorienplanung in den Informationsfluss des Fahrzeugs und die Umfeldsensorik

6.3.2. Definition des Validierungsziels und Auswahl des Fahrszenarios

Das Validierungsziel für die Untersuchungen lässt sich wieder aus zwei Perspektiven betrachten. Einerseits aus Sicht von Herrn Waldenmayer, der hier als Entwickler der Trajektorienplanung folgender Fragestellung nachgeht: „Ist die

Trajektorienplanung in der Lage, das Fahrzeug energetisch günstig hinter einem Target-Fahrzeug mit sich ändernder Geschwindigkeit her zu steuern?“

Für die hier vorliegende Forschungsarbeit stellt sich viel mehr die Frage „Kann man mit Hilfe der Validierungsumgebung, basierend auf dem Rollenprüfstand und der Kamerastimulation, die Fahrzeugautomatisierung in Wechselwirkung mit dem Gesamtfahrzeug nutzen und deren Funktion reproduzierbar testen?“ Somit stehen die Chancen und Grenzen der eingesetzten Validierungsumgebungen im Fokus. Dabei soll einerseits die Kamerastimulation die Umgebungsbedingungen aus der virtuellen Umwelt reproduzierbar sowie repräsentativ für reale Fahreindrucke übertragen und andererseits der Rollenprüfstand am Gesamtfahrzeug realitätsnahe Energieverbräuche ermöglichen.

Die Modularität der Validierungsumgebung bietet den Vorteil, dass bei Bedarf einzelne Teile, etwa die Kamera und deren Stimulation für sich, alleine betrieben und so schneller optimiert werden können. Dies ist aufgrund der Komplexität des Gesamtaufbaus sehr hilfreich.

Die Trajektorienplanung ist zu einem so frühen Zeitpunkt in der Entwicklung noch nicht Echtzeit fähig. Aus diesem Grund wird bei der Untersuchung in einem ersten Durchlauf ohne Regelung mit Konstantfahrt hinter dem Target hergefahren und der Abstand konstant gemessen. Daraus wird das Geschwindigkeitsprofil des Target-Fahrzeugs berechnet. In einem zweiten nachgelagerten Szenario-Durchlauf wird dann die offline berechnete Trajektorie auf das Ego-Fahrzeug ausgegeben und die Verbräuche daraus ermittelt.

Als Szenario kommt für das Target-Fahrzeug ein Geschwindigkeitsprofil wie in Abbildung 6.29 zum Einsatz. Dabei fährt das Target erst konstant mit 23 km/h, anschließend verzögert es auf 13 km/h und hält diese Geschwindigkeit. Der Anfangsabstand beträgt 10 Meter. Im zweiten Durchlauf mit Regelung der Ego-Geschwindigkeit ergibt sich diese aus der Reaktion der Trajektorienplanung und soll immer einen sicheren Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen einregeln. Mit Hilfe dieses Vorgehens kann nachvollzogen werden, wie die Fahrzeugautomatisierung auf die Geschwindigkeitsänderung des Target-Fahrzeugs reagiert und entsprechend der Abstand eingeregelt wird.

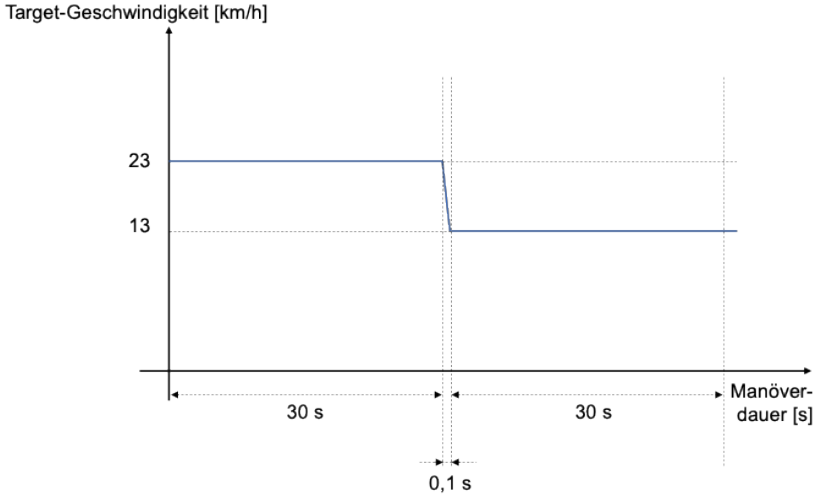


Abbildung 6.29: Manöver zur Validierung der Trajektorienplanung als Geschwindigkeitsprofil des Target-Fahrzeugs

Zur Kalibrierung und Ausrichtung der Kamerastimulation sowie bei der Umwelterfassung des Manövers durch die Trajektorienplanung fährt das Egofahrzeug zunächst mit einer konstanten Geschwindigkeit von 18 km/h welche zwischen der minimal und maximal Geschwindigkeit des untersuchten Szenarios liegt.

6.3.3. Gestaltung des System-Modells „Umwelt“

Die Kalibrierung und Ausrichtung der Kamera wird in einem ersten Schritt nur mit den für die Stimulation notwendigen Komponenten durchgeführt. Die Konfiguration des IPEK-XiL-Ansatzes zeigt Abbildung 6.30. Dabei ist die physische Komponente des Systems „Fahrzeug“ nur durch die Kamera repräsentiert. Die virtuelle Kamera steht für die Videoausgabe aus der virtuellen Umweltsimulation, welche es zu kalibrieren gilt. Das Restfahrzeug ist auf den Regler zur Konstantfahrt mit 18 km/h reduziert.

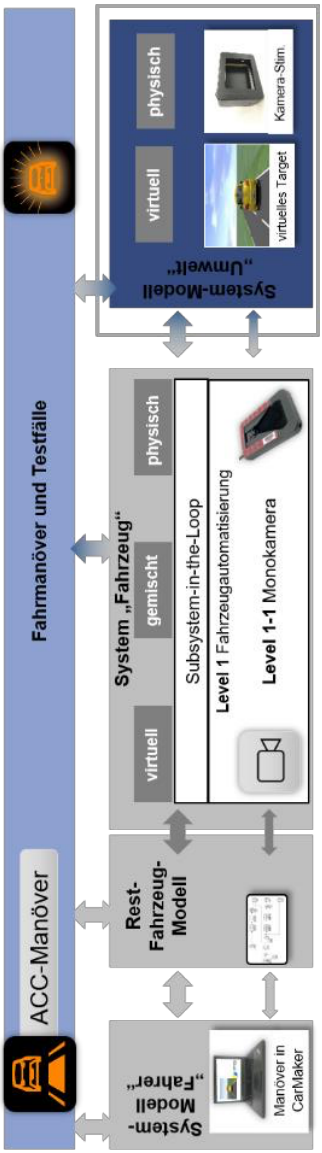


Abbildung 6.30: Konfiguration des IPEK-XiL-Aufbaus für die Ausrichtung und Kalibrierung der Kamerastimulation

Der Informationsfluss erfolgt dabei nach dem Ablauf in Abbildung 6.31. Der so erfolgte Aufbau kann nach der erfolgreichen Parametrisierung ohne großen Änderungsaufwand in die Validierungsumgebung mit Gesamtfahrzeug und Rollenprüfstand integriert werden.

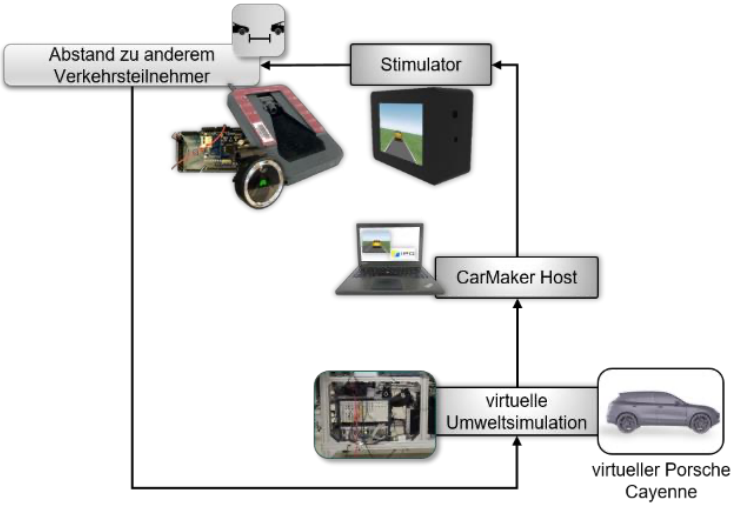


Abbildung 6.31: Entwurf des HiL-Aufbaus zur Kalibrierung und Ausrichtung des IPEK-XiL-Aufbaus zur Kamerastimulation

Der ausgerichtete Aufbau aus Kamera und Stimulator ist in Abbildung 6.32 dargestellt. Dabei ist auf dem Stimulator (3) ein vorausfahrendes Fahrzeug zu sehen, welches vom Kamerasystem (1) als Target erkannt wird und deshalb auf dem Display (2) unten in der Mitte als grünes Symbol eingeblendet wird. Eine weiterführende Auseinandersetzung mit der Parametrisierung dieses Aufbaus wird in Kapitel 6.3.4 geführt.

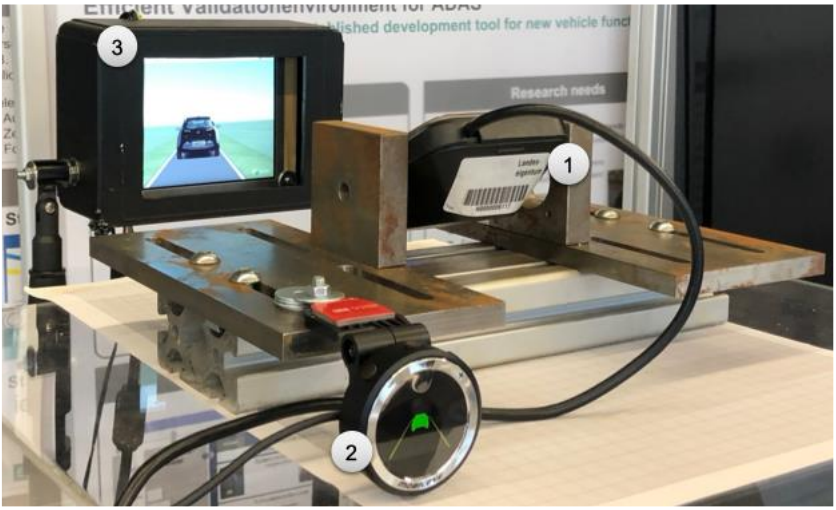


Abbildung 6.32: HiL-Aufbau zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Stimulator und Fahrzeugkamera

Die Trajektorienplanung nutzt in der aktuellen Ausführung nur die Fahrzeuglängsregelung zur Umsetzung von Fahrtrajektorien und keine Querregelung, etwa durch Lenkmanöver. Aus diesem Grund kann zur Einbindung des Gesamtfahrzeugs ein Rollenprüfstand verwendet werden. Als Umweltsimulation kommt CarMaker mit einer Online-Generierung des stimulierten Bildmaterials zum Einsatz. Die Konfiguration des IPEK-XiL-Ansatzes zur Validierung am Gesamtfahrzeug zeigt Abbildung 6.33. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Gestaltung des System-Modell „Umwelt“. Somit soll die Kamerastimulation den Abstand zum Vorausfahrenden Fahrzeug reproduzierbar bereitstellen und der Rollenprüfstand realistische Verbräuche durch repräsentative Fahrwiederstände ermöglichen.

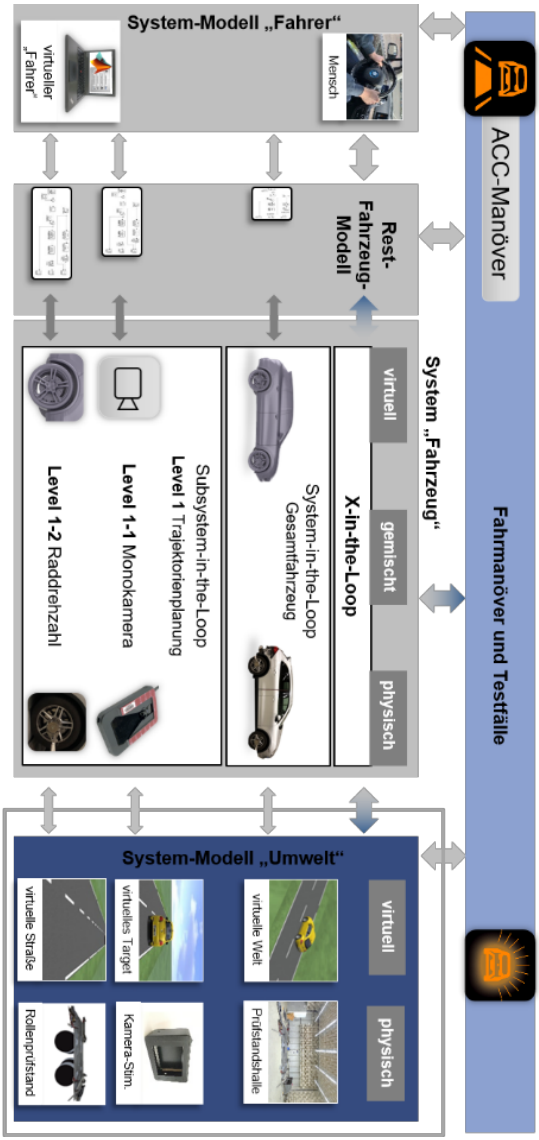


Abbildung 6.33: IPEK-XiL-Aufbau zur Validierung der Trajektorienplanung am Gesamtfahrzeug

Die Validierungsumgebung für das „System-in-Development“ Trajektorienplanung im Wechselspiel mit dem Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 6.34 dargestellt. Dabei ist der Aufbau aus Abbildung 6.28 im System „Fahrzeug“ zusammengefasst und steht über die Schnittstelle zwischen Kamera und Stimulator sowie zwischen Fahrzeugräder und Rollenprüfstand mit dem System-Modell „Umwelt“ im Austausch.

Da der Rollenprüfstand in der Straßensimulation läuft, stellt er eine parallele Umweltsimulation dar. Somit gibt er direkt die virtuelle Straße über die entsprechenden Fahrwiderstände in der Ebene an das Ego-Fahrzeug aus. Eine Kommunikation zur virtuellen Umweltsimulation der Kamerastimulation ist aufgrund der ebenen Straße nicht notwendig. Soll hingegen eine aufwändigere Streckentopologie, etwa mit Steigungen, realitätsgetreu gefahren werden, ließe sich der Fahrwiderstand des Rollenprüfstands auch aus der virtuellen Umweltsimulation einbinden (Düser et al., 2011).

Als Sensorik zur Umfelderfassung wird auf eine Monokamera zurückgegriffen, welche als Aftermarket-Lösung nicht zwangsläufig im Fahrzeug selbst betrieben werden muss. Zur Reduktion von Schwingungseinflüssen wird deshalb die Kamera mit entsprechendem Stimulator neben dem Fahrzeug betrieben und stellt damit das „System-Under-Investigation“ dar. Die so generierten CAN-Botschaften, werden dann per Kabel in das Fahrzeug übertragen. Die Verbindung zwischen Kamera und Stimulator entspricht, abgesehen von der Anordnung neben dem Fahrzeug, jenem aus Kapitel 5.3.3. Die MobilEye-Lösung der Kamera bietet dabei außerdem einen besseren Einblick in die Funktionsweise der Umwelterfassung. Durch die unmittelbar ablesbaren Abstandsschätzungen kann beispielsweise die Abstimmung zwischen Kamera und Stimulator deutlich einfacher erfolgen.

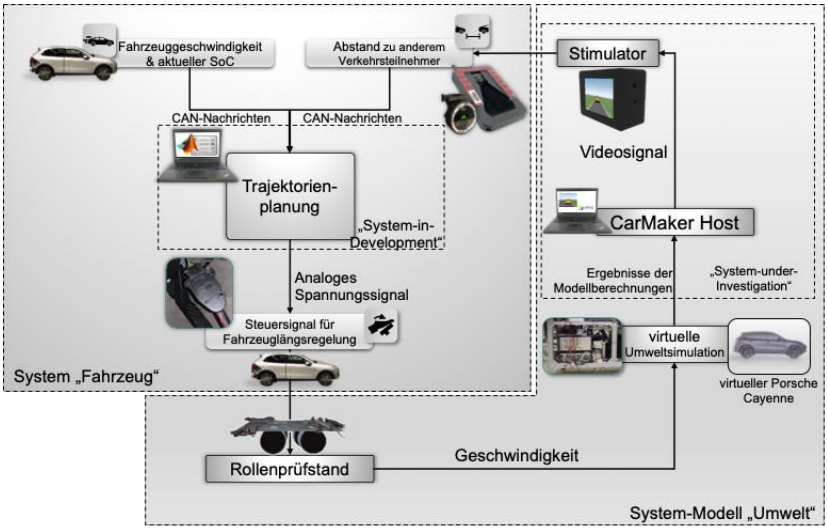


Abbildung 6.34: Konzept der Validierungsumgebung im Wechselspiel mit dem Versuchsfahrzeug

Das zuvor vorgestellte Konzept ist auf dem Rollenprüfstand des IPEK am Campus Ost aufgebaut worden, was in Abbildung 6.35 zu sehen ist. Zur besseren Nachvollziehbarkeit des stimulierten Manövers durch die Bedienenden, wird das Stimulator-Bildsignal auch auf der Leinwand vor dem Fahrzeug angezeigt.

Beim Aufbau und Betrieb dieser Umgebung hat sich gezeigt, dass es die Entwicklung sehr beschleunigt, wenn für alle Schnittstellen (z.B. serielle Kommunikation per USB oder Ethernet/UDP) eine eigenständige Testlösung verfügbar ist. Diese kann in der Entwicklung beispielsweise durch Testempfänger oder –Sender einen Einblick in die Kommunikation an der gewünschten Stelle des Aufbaus ermöglichen. Hierdurch sind Teilmodule der Umgebung testbar ohne den Gesamtaufbau betreiben zu müssen. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass sich Ersatzumgebungen häufig anders verhalten (z.B. Aussende-Frequenz von Nachrichten) und so der finale Gesamtaufbau unterschiedliche Randbedingungen mitbringt. Diese Differenzen sorgen für kleinere Anpassung zu Beginn der Inbetriebnahme des Gesamtaufbaus und damit selbstverständlich immer für ein Restrisiko bei der Inbetriebnahme.

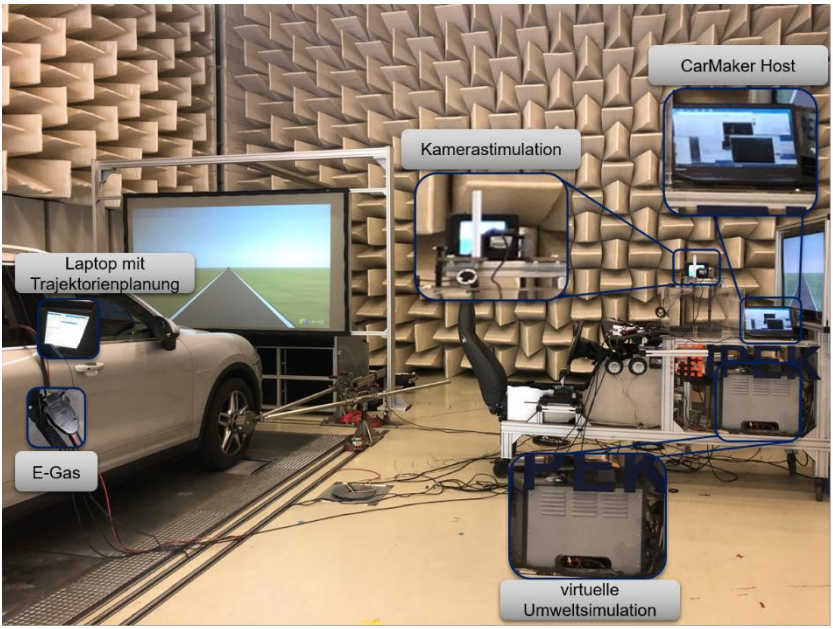


Abbildung 6.35: Übersicht des Gesamt-Aufbaus für die Trajektorienplanung am Gesamtfahrzeug auf dem Rollenprüfstand

6.3.4. Aufbau der Sensorstimulation

Die Kamerastimulation in der hier aufgebauten Validierungsumgebung basiert größtenteils auf der Lösung aus Kapitel 5.3.3. Statt der fest an der Frontscheibe verbauten Kamera wird die Aftermarket-Lösung außerhalb des Fahrzeugs eingesetzt. Durch den eingerichteten Entwicklerzugang gibt diese Lösung die geschätzten Abstände zu umgebenden Objekten als CAN-Botschaft aus, was unmittelbar Rückschlüsse auf die Umweltwahrnehmung und damit die Qualität der Stimulation zulässt. Die so durchgeführten Untersuchungen entstanden im Rahmen der Co-Betreuten Abschlussarbeit von Oussama Oualha (2022)[32]. Zur Kalibrierung und Ausrichtung wird noch nicht der Aufbau mit Gesamtfahrzeug und Rollenprüfstand benötigt. Deshalb wird in einem ersten Schritt nur die Umweltsimulation mit CarMaker-Host und angeschlossenem Stimulator in Wechselwirkung mit der Fahrzeugkamera betrieben. Diese Teilkomponenten der Validierungsumgebung sind in Abbildung 6.31 als prinzipieller Aufbau dargestellt.

[32] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Wird nun das in Kapitel 6.3.2 vorgestellte Szenario durchgeführt, ergibt sich ein Verlauf der Abstandsschätzungen, wie er in Abbildung 6.36 dargestellt ist. Dabei können die von der Kamera geschätzten Abstände unmittelbar mit denen aus der Umweltsimulation verglichen werden.

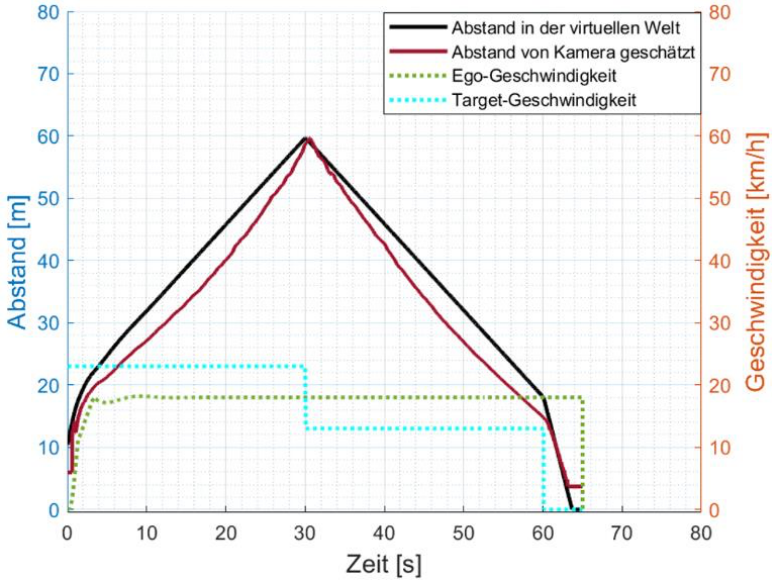


Abbildung 6.36: Messergebnis einer weiter verwendeten Parametrisierung (Ausrichtung und Kalibrierung) der Kamerastimulation

Hierbei ist erkennbar, dass die stimulierte Kamera bei einer akkuraten Abstimmung den Abstand tendenziell unterschätzt. Dieser Trend wird bis zum Abstand von 40 Metern leicht größer und verschwindet im Anschluss bis zum Zeitpunkt der Geschwindigkeitsänderung des Targets. In der zweiten Hälfte des Manövers ergibt sich ein ähnliches Bild, sodass die Kamera auch hier tendenziell unterschätzende Abstände übermittelt.

Generell gilt es bei der Ausrichtung und Kalibrierung zwei Ziele zu verfolgen. Einerseits sollen die geschätzten Abstände möglichst exakt die tatsächlichen Abstände abbilden. Andererseits sollen keine allzu großen Gradienten entstehen. Diese würden im späteren Auswertungsverlauf nämlich zu größeren Abweichungen bei der Target-Geschwindigkeits-Schätzung führen.

Abbildung 6.37 zeigt zwei Diagramme von Messungen mit abgeändertem Abstand zwischen Kamera und Stimulator. Dabei ist im linken Schaubild der Abstand größer als im Aufbau für Abbildung 6.36, rechts hingegen kleiner.

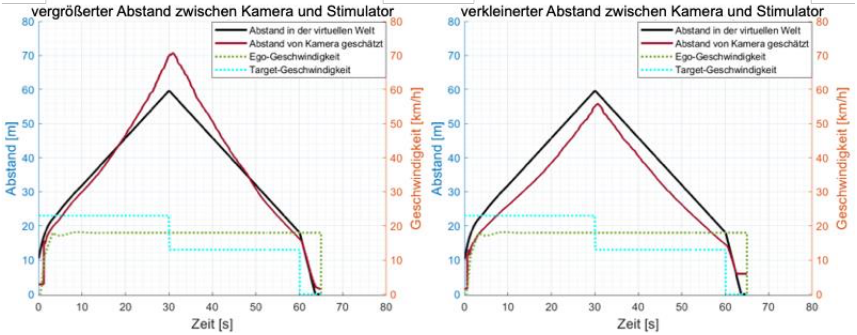


Abbildung 6.37: Abstandsschätzung bei unterschiedlich eingestellter Positionierung in X-Richtung zwischen Kamera und Stimulator

Zu sehen ist, dass bei vergrößertem Abstand nur bis zu einem Abstand von ungefähr 40 Metern noch eine leichte Unterschätzung stattfindet. Ab diesem Abstand steigt die Schätzung jedoch sehr stark an und übertrifft im Maximum den tatsächlichen Abstand um 20 Meter. Somit liegt die absolute Abweichung der Abstandschätzung zwar bis zu einem Abstand von 60 Metern auf einem niedrigen Niveau, jedoch ist der Gradient in der Kurve gerade bei Abständen größer 40 Meter deutlich größer, sodass bei den größeren Abständen die Geschwindigkeitsschätzung gröbere Fehler machen würde. Bei verkleinertem Abstand verläuft die Abstandsschätzung allgemein gleichmäßiger, jedoch ist der absolute Fehler in der Schätzung deutlich größer und damit auch nicht brauchbar.

Messungen zum Einfluss des virtuellen Field of View (vFoV) sind in Abbildung 6.38 dargestellt. Eine Verkleinerung des Blickwinkels führt dazu, dass auf dem Stimulator-Bildschirm ein kleinerer Ausschnitt aus der virtuellen Welt abgebildet wird. Somit verteilt sich weniger Blickwinkel auf derselben Anzeigefläche. Dieser Umstand führt dazu, dass die Heckpartie des Targets größer und damit näher erscheint, was eine zunehmende Unterschätzung durch die Kamera zur Folge hat. Schlussendlich wird der vFoV so eingestellt, dass der Abstand aus der virtuellen Umweltsimulation möglichst getroffen wird und stärkere Gradienten in der Abstandsschätzung vermieden werden.

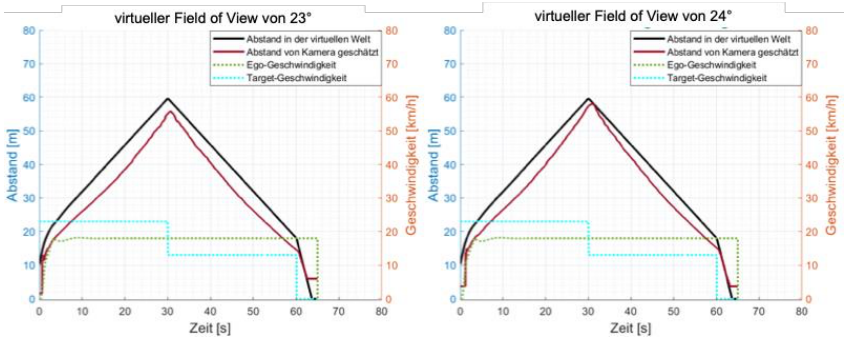


Abbildung 6.38: Abstandsschätzung bei unterschiedlich eingestelltem virtuellem Field of View

Über die gesamte Parametrisierung hinweg werden die unterschiedlichen Einflussgrößen mit absteigender Sensitivität aufeinander abgestimmt. Um schnell Änderungen an der Ausrichtung zwischen Kamera und Stimulator zu ermöglichen wird auf eine Einhausung verzichtet.

6.3.5. Einbindung in die Restumgebung und Durchführung von Messungen

Nachdem die Kamerastimulation initial parametrisiert und das Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand fixiert ist, können die Messungen durchgeführt werden. Hierbei ist zu beachten, dass bei den so auf dem Prüfstand aufgezeichneten Manövern das Egofahrzeug mit einer anderen Geschwindigkeit fährt, als in den zuvor durch ein virtuelles Fahrzeug gefahrenen Geschwindigkeitsprofilen. Dies ist auf die manuelle Steuerung des Fahrzeugs zurückzuführen. Die gewonnenen Messergebnisse sind in Zusammenarbeit mit Hannes Weiß im Rahmen dessen Masterarbeit entstanden (Weiß, 2022)[33]. Abbildung 6.39 zeigt davon die Abstandsschätzung des Kamerasystems für fünf nacheinander durchgeführte Versuchswiederholungen im Vergleich zum Abstand aus der virtuellen Umweltsimulation. Darin ist zu erkennen, dass die Abstandsschätzungen über die Wiederholungen hinweg einen sehr ähnlichen Verlauf nehmen. Die Schwankung beim maximalen Abstand von 53 Metern liegt dabei auf einem niedrigen Niveau von 3 Metern, was einer Schwankung von ungefähr 5 % entspricht.

[33] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

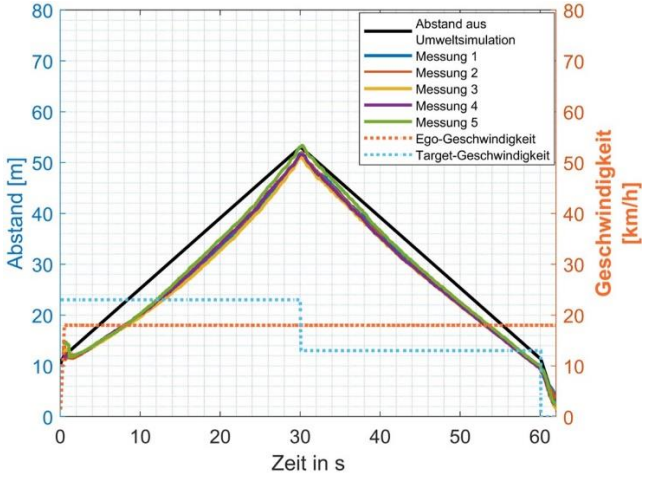


Abbildung 6.39: Fünf Messwiederholungen des Abstands zwischen Ego- und Target-Fahrzeug bei konstanter Ego-Geschwindigkeit

Aus den empfangenen Abstandsinformationen berechnet die Trajektorienplanung unter Berücksichtigung der Ego-Geschwindigkeit die Geschwindigkeit des Target-Fahrzeugs. Ergebnisse einer solchen Schätzung stellt Abbildung 6.40 unten dar. Zur besseren Weiterverwendung wurde einer der Messläufe mit Hilfe eines Savitzky-Golay-Filter geglättet. Darin ist zu erkennen, dass die Target-Geschwindigkeit leicht zunimmt. Dieser Trend resultiert jedoch aus der Abstandsschätzung der Kamera, welche in mittleren Abständen zwischen 10 und 40 Metern zu einer leichten Unterschätzung der Abstände neigt. Der so ermittelte Geschwindigkeitsverlauf dient im nächsten Schritt als Vergleichsgröße beim eingeregelten Abstand.

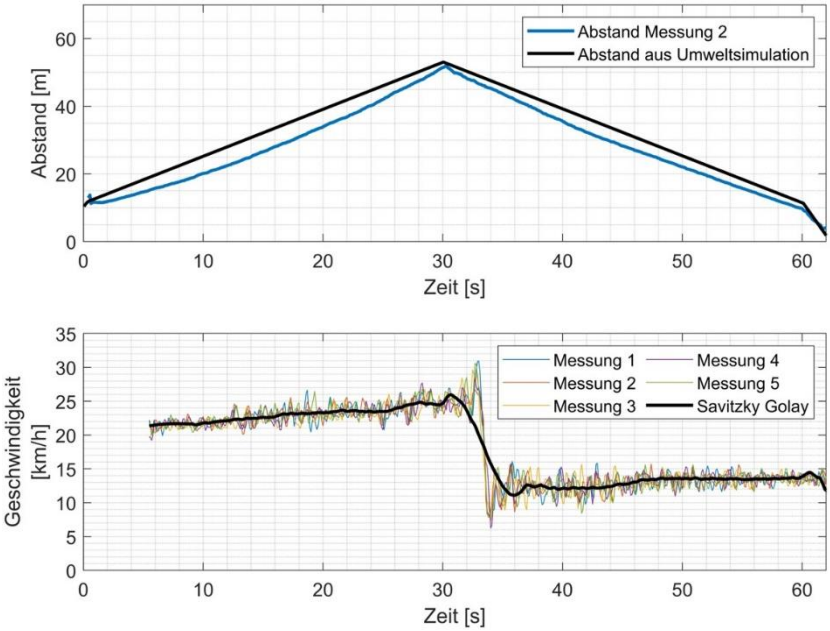


Abbildung 6.40: Schätzungen der Target-Geschwindigkeit basierend auf den Abstandsinformationen der Kamera

Die weitere Signalverarbeitung und Trajektorienableitung wird näher in der Forschungsarbeit von Waldenmayer erläutert. Um die Tragweite und Zusammenhänge der Sensorstimulation im Gesamtsystem besser nachvollziehen zu können zeigt Abbildung 6.41 oben die Eingabe-Größen resultierend aus der Kamerastimulation und untenstehend den SoC-Werten im Fahrzeug. Die Diagramme dazwischen zeigen die durchlaufenen Zwischenschritte. Ausgehend vom stimulierten Abstand zum Target und der daraus abgeleitete Target-Geschwindigkeit (oben) folgt die daraus abgeleitete Soll-Trajektorie des Ego-Fahrzeugs (grün). Zur Umsetzung dieser Trajektorie hat die Planung die darunter liegende Gaspedalstellung (rot) berechnet. Diese hat eine Ist-Trajektorie zur Folge, welche unter anderem mit Hilfe des Verbrennungsmotors umgesetzt wird. Hierbei ist zu erkennen, dass in den Versuchswiederholungen das Fahrzeug reproduzierbar die VKM drei Mal startet und dabei eine Lastpunktverschiebung durchführt, sodass die Batterie geladen wird. Somit wird direkt auf die Fahrgeschwindigkeit des Target-Fahrzeugs reagiert und als Folge daraus der Verbrennungsmotor gestartet, womit Schlüsse auf die Ladestrategie der Hybridbatterie ermöglicht werden. Die gesamte Prozesskette ist abhängig von den Eingabegrößen der Kamera-Stimulation.

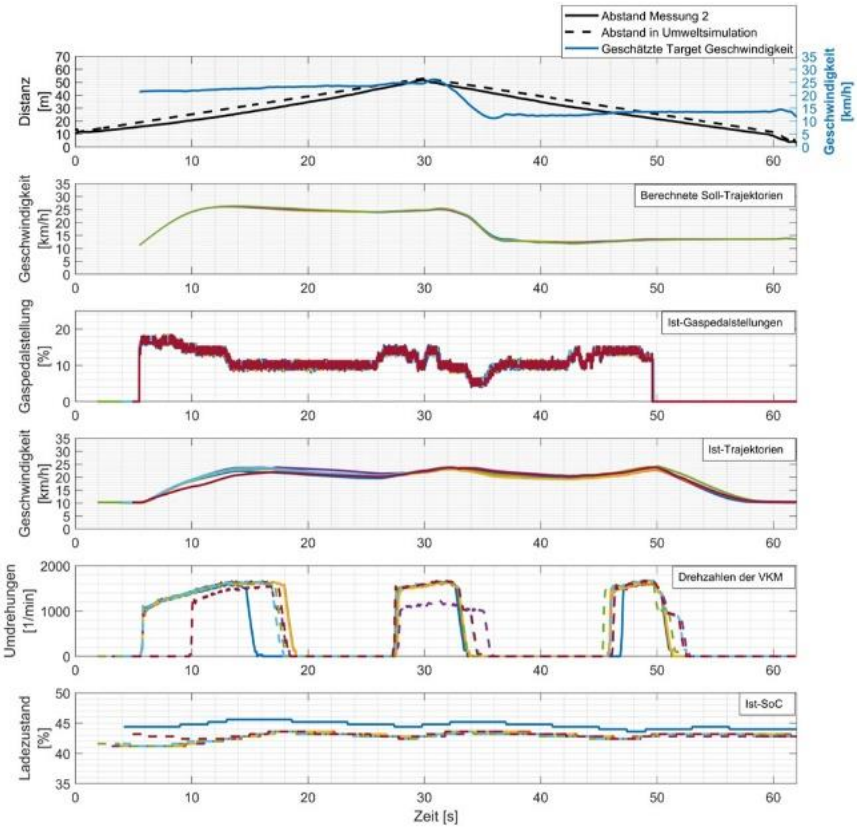


Abbildung 6.41: Messwertübersicht mit Einblick in Batterie-Lade-Strategie bei der wiederholten Manöverdurchführung

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Stimulation der Kamera im verwendeten Aufbau reproduzierbare Umwelteindrücke vermittelt und im Zusammenspiel mit dem Rollenprüfstand Untersuchungen am Gesamtfahrzeug wertvolle Erkenntnisse über komplexe Wechselwirkungen zwischen Automatisierung und hybridem Antriebsstrang gewonnen werden.

Eine Erhebung von Messwerten am Gesamtfahrzeug mit einem so frühen Entwicklungsstrand und der anschließenden Analyse komplexer Zusammenhänge im Antriebsstrang ist mit bisherigen Entwicklungsmethoden nicht leistbar gewesen. Die Validierung hätte rein simulativ erfolgen müssen, da eine Realfahrt aufgrund

des so früh noch nicht echtzeitfähigen Algorithmus nicht möglich ist. Die Verwendung der Kamera-Stimulation nach dem in dieser Arbeit entwickelten Vorgehen kombiniert beides und versetzt die Entwickelnden in die Lage sehr früh in der Entwicklung Algorithmen-Anpassungen am komplexen Gesamtsystem Antriebsstrang auszuprobieren und schnell Auswirkungen von Anpassungen beobachten zu können.

6.4. Zusammenfassung und Fazit

Nach dem Entwurf eines Vorgehens zum Aufbau einer Validierungsumgebung für Fahrerassistenzsysteme auf Gesamtfahrzeugebene unter Verwendung der Sensorstimulation sowie einer anschließenden Weiterentwicklung, zeigt deren Anwendung anhand dreier Beispiele die Verwendung in der Praxis und verdeutlichen damit den Mehrwert für Entwicklungsaktivitäten am Gesamtsystem.

Als erste Untersuchung werden Messungen an den vier Stufen des ACC-Wunschabstands durchgeführt. Dabei sollen mithilfe des Vorgehens Umgebungen aufgebaut werden, um Einflüsse zweier Versuchs-Größen nachzuvollziehen. Ersterer ist der Wunschabstand des ACC-Systems. Dieser ist eine einstellbare Größe innerhalb des Fahrzeugsystems und beschreibt den Abstand, welcher bei einer Folgefahrt vom Egofahrzeug eingeregelt werden soll. Als zweite Versuchs-Größe wird der Umfang virtueller Umwelteindrücke untersucht. Hierbei wird durch Verwendung der Kamerastimulation, dem Rollenprüfstand und dem Testgelände, die Menge virtuell generierter Umwelteinflüsse, die auf die Fahrzeugautomatisierung einwirken, variiert.

Durch die Wahl des Wunschabstands für das ACC-System werden Auswirkungen auf die Fahrzeugregelung unter möglichst reproduzierbaren Umgebungsbedingungen hinsichtlich der Variation eines Parameters des Fahrzeugsystems beobachtet. Dabei wird gezeigt, dass die nach dem Vorgehen aufgebaute Validierungsumgebung eine reproduzierbare Versuchsumgebung bereitstellt, in der unter gleichen Bedingungen gleiche Ergebnisse erzeugt werden. Außerdem konnte beobachtet werden, dass die Wahl des Wunschabstands beim Versuchsfahrzeug keinen Einfluss auf die Anzeige des erkannten Target-Fahrzeugs besitzt. Allerdings ändert sich das Verhalten beim Geschwindigkeitsabbau bei der Auffahrt auf ein stehendes Fahrzeug. So wird bei Stufe 1 früh mit einer linearen Verzögerung gebremst, wohingegen sich dieses Verhalten über die Stufen bis hin zu Stufe 4 zu einem späteren Eingreifen und einer daraus progressiv ablaufenden Verzögerung entwickelt.

Neben dem Einfluss des Wunschabstands auf das ACC-System wird als zweiter Parameter der Umfang virtueller Komponenten als Bestandteile der Validierungsumgebung systematisch verändert. So werden drei unterschiedliche Ausprägungen aufgebaut und anschließend die Manöver zur Variation des Wunschabstands für das ACC-System jeweils zwölf Mal wiederholt. Die drei Ausprägungen sind:

- Das Testgelände mit physischem Target: Es kommen keine virtuellen Umwelteindrücke zum Einsatz. Das Verhalten in dieser Umgebung kann somit als Referenz herangezogen werden.
- Der Rollenprüfstand mit installierter Kamerastimulation: Es werden alle für das ACC-System relevanten Eindrücke aus einer virtuellen Umweltsimulation an das Versuchsfahrzeug übertragen.
- Testgelände mit installierter Kamerastimulation: Die Umwelteindrücke werden gemischt physisch und virtuell generiert.

Als Ergebnis dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass Umgebungen mit virtuellen Umwelteindrücken in der Lage sind das Verhalten aus rein physischen Umgebungen reproduzierbar und ohne weniger kontrollierbaren Neben-Einflüsse, wie etwa Sonnenstand oder andere Wetterbedingungen, wiederzugeben. Somit kann der Grad virtueller Umwelteindrücke mit Fortschreiten des Entwicklungsstands angepasst werden und für zuverlässigere Testergebnisse sorgen.

Als zweite Anwendung des Vorgehens werden Untersuchungen an Auffahrmanövern bei Dämmerung mit einem kamerabasierten ACC-System durchgeführt. Dabei wird vergleichbar zu den ersten Untersuchungen wieder auf ein stehendes Target-Fahrzeug aufgefahren. Als Umgebung wurde für Referenzwerte das bekannte Testgelände verwendet, bei dem über einen Abend hinweg durchgehend das Manöver wiederholt und damit von hellem Sonnenschein bis hin zu untergegangener Sonne alle Helligkeitszustände durchlaufen wurden. Das dabei beobachtete Verhalten wurde daraufhin in der Umgebung mit Rollenprüfstand und Kamerastimulation durch Variation von Stimulationsparametern nachgebildet.

Hieraus kann festhalten werden, dass die Validierungsumgebung auf dem Rollenprüfstand in der Lage ist, die Dämmerungseindrücke vom Testgelände reproduzierbar wiederzugeben. Dabei kann mit entsprechender Stimulator-parametrisierung das Verhalten vom Testgelände bei heller Versuchsumgebung bis hin zur untergegangenen Sonne wiederholt werden.

Die dritte Anwendung des Vorgehens besteht aus prototypischen Untersuchungen an einer multikriteriellen Trajektorienplanung. Dazu wurden als Vorentwicklung die

Algorithmen der Trajektorienplanung als Matlab-Programm in ein hybridelektrisches Fahrzeug eingebunden und über eine Monokamera mit Umwelteindrücken versorgt. Das Gesamtfahrzeug befand sich auf einem Rollenprüfstand, damit realistische Energieverbräuche reproduzierbar gemessen werden konnten.

Der so erfolgte Aufbau hat gezeigt, dass eine modulare Gestaltung der Validierungsumgebung bei der Entwicklung große Vorteile besitzt, sodass schnell kleinere Systembestandteile, beispielsweise der Triebstrang des Fahrzeugs auf dem Rollenprüfstand oder die Kamerawahrnehmung in Verbindung mit der Sensorstimulation, getrennt vom Rest getestet werden können. Trotz des aufwändigen Aufbaus ist die Validierungsumgebung in der Lage, ausgehend von den virtuell erzeugten Umwelteindrücken durch die reproduzierbaren Testwiederholungen die Zusammenhänge im Antriebsstrang bis hin zur Betriebsstrategie der Batterieladung durch Lastpunktverschiebung reproduziert untersuchbar zu machen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Erkenntnisse aus den drei Untersuchungen unmittelbar Forschungsfrage 3 „Können stimulierte Szenarien reale Fahreindrücke abbilden und somit aufwändige Tests aus rein physischen Umgebungen in gemischt virtuelle /physische Umgebungen verlagern?“ adressieren und diese mit „Ja, die Kamerastimulation kann reale Fahreindrücke abbilden und reproduzierbare Untersuchungen ermöglichen. Damit sind Untersuchungen in gemischt physisch/virtuellen Umgebungen möglich.“ beantworten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss der vorliegenden Arbeit fasst das folgende Kapitel die Arbeit mit deren Ergebnissen sowie Erkenntnissen zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Entwicklungs- und Forschungsmöglichkeiten.

7.1. Zusammenfassung

Die Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen stellt die Automobilbranche vor eine Vielzahl von Herausforderungen. Neben der parallelen Entwicklung von elektrischen Antrieben und konventionellen Motoren müssen immer umfassendere Fahrzeugautomatisierungen zur Marktreife gebracht werden.

Zu Beginn der Arbeit wird im aktuellen Stand der Forschung (Kapitel 2) eingegangen. Hieraus ergibt sich der Bedarf für neue Validierungsumgebungen sowie die Zielsetzung (Kapitel 3). Dabei wird auf die Besonderheiten beim Umgang mit Fahrzeugautomatisierungen eingegangen. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit folgendes Forschungsziel:

Forschungsziel

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Beitrags für die Validierung von Fahrerassistenzsystemen am Gesamtfahrzeug mit Hilfe der Sensorstimulation auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes.

Durch das erarbeitete Vorgehen wird ein Beitrag geleistet, durch den schon früh im Entwicklungsprozess am Gesamtfahrzeug ohne Eingriff in die Fahrzeugelektronik eine Funktionsüberprüfung erfolgen kann. Zu diesem Zweck folgt das Vorgehen dem IPEK-XiL-Ansatz und dem darin aufgezeigten Weg zum Aufbau einer Validierungsumgebung. Die Basis hierfür stellen die beiden Grundannahmen dar:

Grundannahmen:

1. Fahrerassistenzsysteme lassen sich mit Hilfe des IPEK-XiL-Ansatzes sowohl auf Komponenten, als auch auf Gesamtfahrzeugebene validieren.

2. Die Wiederverwendung von Komponenten der Validierungsumgebung hilft dabei das Entwicklungsrisiko besser einschätzen zu können.

Die erste Grundannahme bestätigt sich durch die Konfiguration und den Aufbau der in dieser Arbeit genutzten Validierungsumgebungen. Hierzu werden basierend auf dem IPEK-XiL-Ansatz sowohl die Zusammensetzung, als auch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten gezielt eingestellt. Am Beispiel der Ultraschallstimulation zeigt sich so das gewünschte Verhalten.

Grundannahme zwei bestätigt sich bei der Anwendung der Kamerastimulation. Diese lässt sich sowohl auf dem Rollenprüfstand mit virtuellen Fahrwiderständen, als auch auf dem Testgelände mit physischer Beschleunigung des Fahrzeugs wiederverwenden. Die Wirkungen auf das Versuchsfahrzeug sind zwischen den beiden Umgebungen vergleichbar, wodurch gezeigt wird, dass das Risiko durch den Wechsel der Umgebungen beherrschbar ist.

Auch die drei formulierten Forschungsfragen werden beantwortet:

Forschungsfragen

1. Wie muss die Sensorstimulation für Sensoren von Fahrerassistenzsystemen aufgebaut sein, damit eine Validierung am Gesamtfahrzeug erfolgen kann?

2. Welche Herausforderungen gibt es bei der Integration der Sensorstimulation in schon bestehende Validierungsumgebungen auf Gesamtfahrzeugebene?

3. Können stimulierte Szenarien reale Fahreindrücke abbilden und somit aufwändige Tests aus rein physischen Umgebungen in gemischt virtuelle /physische Umgebungen verlagern?

Forschungsfrage 1 wird in Kapitel 5.1.4 mit dem grundlegenden Aufbau einer Sensorstimulation beantwortet. Daraufhin werden in Kapitel 5.1.5 Stimulationslösung für die Helligkeits- Regen- und Beschleunigungssensorik erarbeitet. In Kapitel 5.2.2 wird das Vorgehen für die Ultraschallsensorik angewendet und in Kapitel 5.3.1 zur Stimulation einer Mono-Kamerasensorik genutzt. Die grundlegende Unterscheidung zwischen direkt und indirekt messender Sensorik ebnet dabei den Weg zur Gestaltung der Stimulatoren. Direkt messende Sensorik hat zur Folge, dass die Stimulation unmittelbar die physische Größe im Umfeld des Sensors beeinflussen muss (Etwa die Temperatur beeinflussen in der Umgebung des Fahrzeugthermometers). Im Gegensatz dazu gestaltet sich die Stimulation indirekt messender Sensoren aufwendiger. Hierzu wird in vier Schritten vorgegangen:

i) Detektion des Sensor-Impulses
ii) Absorption des vom Sensor ausgesendeten Signals
iii) Aussenden von synthetisch erzeugten Sensorsignalen
iv) Ausrichtung und Kalibrierung der Stimulation

Das Vorgehen zum Aufbau der Sensorstimulation ist im Ablauf zur Validierung von Fahrerassistenzsystemen auf gesamtfahrzeugebene mit Hilfe des IPEK-XiL-Frameworks eingebunden. Dieser besteht in dieser Arbeit aus den folgenden fünf Schritten:

- Definition des Validierungsziels
  Festhalten eines angestrebten Ziels, dessen Erfüllung durch quantifizierbare Kriterien überprüft wird.
- Auswahl eines geeigneten Szenarios
  Bestimmung eines Szenarios, welches das gewünschte Systemverhalten zur Verfolgung des Validierungsziels auslöst.
- Gestaltung des Systemmodells „Umwelt“
  Aufbau der Validierungsumgebung unter Berücksichtigung der relevanten Umwelteindrücke.
- Aufbau der Sensorstimulation
  Entwurf und Parametrisierung von Lösungen zur Signalübertragung sowie geeigneter Schnittstellen zur Übermittlung der Umwelteindrücke.
- Einbindung in die Restumgebung
  Integration der einzelnen Komponenten, aus denen sich die Validierungsumgebung zusammensetzt.

Forschungsfrage 2 wird in Kapitel 5.1.6 und Kapitel 5.2.4 beantwortet. Darüber hinaus zeigt Kapitel 6 drei weitere Integrations-Beispiel, welche mögliche

Herausforderungen am Rollenprüfstand oder dem Testgelände aufzeigen. Hierbei stellt sich unter anderem der begrenzte Platz vor den Sensoren am Rollenprüfstand als eine zu berücksichtigende Herausforderung dar. Beispielsweise nimmt die Fixierung des Versuchsfahrzeugs auch Platz in der Nähe der zu stimulierenden Sensoren ein. Des Weiteren kann die externe Fahrzeugkühlung mit ihrem Luftstrom Stimulatoren in Bewegung versetzen, sodass deren Eindrücke gestört auf die Fahrzeugsensorik einwirken. Hilfe kann hierbei der Wechsel von einer für Wind anfälligen Leinwand hin zu einem kleinen Display vor der Kamera sein. Auf dem Testgelände stellt sich beispielsweise seitlich einfallendes Sonnenlicht als Störgröße heraus, welches durch eine mehrschichtige Abschirmung ferngehalten werden kann. Diese Beispiele verdeutlichen, dass bei der Stimulation ein tieferes Verständnis über die Wirkweise und die relevanten Parameter der Stimulation notwendig ist. Damit lassen sich gezielt die Stimulations-Qualität einstellen und ungewollte Einflüsse ausschließen. Die Ausrichtung und Kalibrierung der Stimulation hat sich beim Aufbau der Sensorstimulation und anschließenden Integration in die Gesamt-Validierungsumgebung als folgenreicher Arbeitsschritt herausgestellt. Kleine Veränderungen können hier die Qualität der Arbeitsergebnisse maßgeblich beeinflussen. In diesem Zusammenhang ist die Verwendung eines Rollenprüfstands mit der Kamerastimulation als Beispiel genauer betrachtet worden. Hierbei muss das zu untersuchende System auf dem Rollenprüfstand sowie der Stimulator vor dem Sensor korrekt positioniert sein. Über dies wird durch eine zuvor ermittelte Ausrollkurve das Widerstandsverhalten auf dem Rollenprüfstand dem Verhalten in der realen Welt entsprechend kalibriert. Auch der Kamerastimulator wird durch Messungen auf der realen Straße entsprechend so kalibriert, dass das stimulierte Verhalten dem auf der realen Straße entspricht. Dies bedeutet, dass bei einer gefahrenen Geschwindigkeit immer der gleiche Abstand vom ACC-System eingeregelt wird.

Forschungsfrage 3 wird in Kapitel 6.1 durch Untersuchungen an der Wunschabstandstufe des ACC-Systems und in Kapitel 6.2 durch Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Dämmerungsszenarien beantwortet. Eine Absicherung von kamerabasierten automatisierten Fahrfunktionen bei unterschiedlicher Umgebungshelligkeiten stellt in der Praxis größere Probleme hinsichtlich der Reproduzierbarkeit sowie der Kontrollierbarkeit vorherrschender Versuchsbedingungen dar. Beide Beispiele zeigen, dass die Stimulation das Verhalten aus der rein physischen Umgebung reproduzieren kann. Hierbei muss bekannt sein, welche Größen wie Einfluss auf die Stimulation haben können. Zum Beispiel kann die Bildwiderholrate auf dem Stimulator zu einer verzögerten Objekterkennung führen oder die Helligkeit des Stimulator-Displays die Darstellung der Fahrzeugheckansicht Abweichend vom realen Fahreindruck wiedergeben. Eine initiale Untersuchung dieser Größen und eine darauf aufbauende Einstellung

ermöglicht dann schnell durchführbare Untersuchungen mit einer sehr hohen Reproduzierbarkeit.

Im Rahmen der dritten Anwendung, der Ermöglichung von frühen Validierungsaktivitäten einer multikriteriellen Fahrstrategieplanung am Gesamtfahrzeug, wird eine Validierungsumgebung für Untersuchungen an einer kamerabasierten ACC-Funktion aufgebaut. Dabei lässt sich ein hybridelektrisches Fahrzeug mit einer Kamerasensorik zur Umwelterfassung auf dem Rollenprüfstand betreiben. Die so aufgebaute Validierungsumgebung ermöglicht Untersuchungen an einer prototypischen Trajektorienplanung, womit schon ein früher Entwicklungsstand am Gesamtfahrzeug für eine Analyse der Auswirkungen auf den Antriebsstrang verwendet werden kann. Neben dem frühen Erkenntnisgewinn lässt sich so auch während der Weiterentwicklung in kleinen Schritten die Umgebung dem Entwicklungsstand anpassen, sodass durch überschaubare Veränderungen das Entwicklungsrisiko minimiert wird. Die so durchgeführte Untersuchung zeigt, dass mit dem Vorgehen nicht nur Entwicklungsarbeit vom Testgelände auf den Prüfstand verlagert werden kann, sondern auch deutlich früher in der Entwicklung Erkenntnisse gewonnen werden können.

Abschließend ist festzuhalten, dass sich Validierungsumgebungen zur Entwicklung von Fahrerassistenzsysteme auf Gesamtfahrzeugebene mit Anwendung der Sensorstimulation anhand des in dieser Arbeit entwickelten Vorgehens wirkungsvoll aufbauen lassen. Somit ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Reproduzierbarkeit, Kontrollierbarkeit sowie Wiederholbarkeit. Hierdurch können Untersuchungen in ihrer Agilität gesteigert und damit früher sowie viel schneller und mit gezielt eingestellten Umwelteindrücken unabhängig von sonst vorherrschenden Umgebungseinflüssen durchgeführt werden.

7.2. Ausblick

Zum aktuellen Zeitpunkt ist bereits absehbar, dass der Trend zur immer umfassenderen Automatisierung von Fahrfunktionen weitere Herausforderungen an die Entwickelnden stellen wird. Eine zunehmende Vernetzung zwischen den Fahrzeugsensoren sowie der steigende Umfang von Software-Komponenten für die Signalauswertung bis hin zur damit verbundenen Umweltmodellierung führen zu vollkommen neuen Fragestellungen.

Als Vorgehen zum Aufbau von Validierungsumgebungen für solche Systeme leistet diese Arbeit einen Beitrag, um in Zukunft einfacher mit dem steigenden Anteil digitaler Regelungsbestandteile Schritt halten zu können. So lassen sich in Zukunft

zunehmend Szenarien und Testfälle aus dem rein virtuellen Testen in Validierungsaktivitäten mit gemischt virtuell-physischen Prototypen weiterführen. Neben der Funktionsentwicklung werden auch die Wechselwirkungen mit den menschlichen Passagieren verstärkt untersucht werden müssen. Hierzu bieten physische Umgebungen das größte Maß an Authentizität in der Wirkung auf den Menschen. Der Einsatz von Stimulatoren in Kombination mit der Fahrt auf dem Testgelände kann sowohl den Menschen als auch das Fahrzeug adäquat in das Szenario einbinden.

Nach der Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen müssen diese auch in der Typenzulassung sowie zukünftig bei der regelmäßigen Fahrzeuginspektion berücksichtigt werden. Das hier vorgestellte Vorgehen ermöglicht Umgebungen, welche unabhängig vom Fahrzeugtyp Informationen durch Stimulatoren an die Fahrzeuge übertragen und diese so in standardisierte Manöver einbinden können.

Um der steigenden Anzahl zu testender Fahrmanöver Sorge zu tragen, werden einerseits immer mehr Untersuchungen im rein Virtuellen durchgeführt. Andererseits bietet die Automatisierung von Validierungsaktivitäten auf Prüfständen am Gesamtfahrzeug, wie etwa bei Rau (2018)[34] , (Mandel, Lutz, Rau, Behrendt & Albers, 2019) oder (Mandel, Wäschle, Lutz & Behrendt, 2021) vorgestellt, die Möglichkeit, Messergebnisse auch ohne menschliche Aufsicht und damit kostengünstiger zu erhalten. Dabei kann außerdem mittels Model-Based Systems Engineering (MBSE) das Anforderungsmanagement integriert und Grenzfälle schneller identifiziert werden. Gerade zur Überprüfung neuer Softwarestände ist ein solches Vorgehen eine effizientere Lösung.

[34] Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Literaturverzeichnis

Abendroth, B. (2001). *Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen*. Stuttgart: Ergonomia Verlag.

ADAC. (2011). *ADAC Fahrzeugtest: Vergleichstest von Notbremsassistenten - Audi A7, BMW 5er, Infiniti M, Mercedes CLS, Volvo V60, VW Passat*. Verfügbar unter: https://docplayer.org/24771172-Testbericht-vergleichstest-von-notbremsassistenten.html Zugriff am 19.03.2022.

Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In I. Horvath, F. Mandorli & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2010 Symposium* .

Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.

Albers, A., Behrendt, M., Matros, K., Holzer, H. & Bohne, W. (2014). Development of Hybrid-Powertrains by Means of X-in-the-Loop-Approach. *ATZ-Elektronik*.

Albers, A., Burkhardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In A. E. Samuel (Ed.), *15th International Conference on Engineering Design - ICED 2005.* Melbourne: The Design Society. https://doi.org/10.5445/IR/1000007075

Albers, A., Düser, T. & Ott, S. (2008). X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebsystemen. In *8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation.* Kassel.

Albers, A., Fischer, J., Klingler, S. & Behrendt, M. (2014). Durchgängige Validierung und Verifizierung am Beispiel der akustischen Eigenschaften eines Elektrofahrzeugs. In *7. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug.* Graz.

Albers, A., Geier, M., Behrendt, M. & Ott, S. (2008). Eine integrierte Entwicklungsumgebung für Antriebsstrangsysteme. In Car Training Institute (CTI) (Hrsg.), *7. Internationalen CTI Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe* .

Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference* .

Albers, A., Landes, D., Behrendt, M., Weber, C., Siegel, A. & Husung, S. (2015). Determination of acoustic contributions of car components to the far field using transfer functions. In M. Bargende, H.-C. Reuss & J. Wiedemann (Hrsg.), *15. Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik* (Proceedings). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPEMM – Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In J.-C. Bocquet (ed.), *16th International Conference on Engineering Design - Proceedings of ICED 2007.* Glasgow: The Design Society.

Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). The integrated Product engineering Model (iPeM) in context of Product Generation Engineering. In L. Wang & T. Kjellberg (Hrsg.), *Proceedings to the 26th CIRP Design Conference* .

Albers, A., Schille, F., Wysocki, T. von, Behrendt, M., Birkhold, J.-M. & Cortès, S. (2017). Methode zur Kalibrierung des Kupplungssystems und Objektivierung des Wiederstartkomforts hybrider Antriebsstränge auf dem Akustikrollenprüfstand. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2017* (VDI-Berichte, Bd. 2309). VDI Verlag.

Albers, A., Yan, S. & Behrendt, M. (2016). Validation Support for Distributed Vehicle Development Based on the XiL-Approach. In *36th FISITA World Automotive Congress (FISITA 2016). Creative Thinking for Future Automobiles* (Bd. 2). Stansted.

Albrecht, H. R., Gerdus, E., Snyder, A. & Sun, A. (2022). *NHTS's 2022 Light Vehicle Pedestrian Automatic Emergency Braking Test Summary* (Bd. 2023). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Alonso, L., Milanés, V., Torre-Ferrero, C., Godoy, J., Oria, J. P. & Pedro, T. de. (2011). Ultrasonic sensors in urban traffic driving-aid systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*. https://doi.org/10.3390/s110100661

Apple Inc. (2022). *Apple Maps*. Verfügbar unter: https://maps.apple.com Zugriff am 30.03.2025.

Audi AG. (2015a). *SSP 634: Audi Q7 (Typ 4M) Bordnetz und Vernetzung*. Verfügbar unter: https://www.vdveer-engineering.nl/en/information/vag-ssp/ssp-vag/ssp-vag-en/413-ssp-634-audi-q7-type-4m-onboard-power-supply-and-networking Zugriff am 19.03.2022.

Audi AG. (2015b). *SSP 635: Audi Q7 (Typ 4M) Fahrerassistenzsysteme*. Verfügbar unter: https://www.vdveer-engineering.nl/en/information/vag-ssp/ssp-vag/ssp-vag-en/414-ssp-635-audi-q7-type-4m-driver-assistance-systems Zugriff am 19.03.2022.

Autonomous Emergency Braking Test Group. (2012). *AEB Test Procedures*. Verfügbar unter: www.thatcham.org/safety/pdfs/AEB_test_procedures_aug12.pdf Zugriff am 19.07.2021.

AUTOSAR. (2025). *AUTOSAR*. Verfügbar unter: https://www.autosar.org/standards/ Zugriff am 31.03.2025.

AVL List GmbH. (2019). *AVL ADAS/AD Testing and Simulation*. Verfügbar unter: https://justauto.h5mag.com/just-auto_magazine_dec19/avl_list Zugriff am 15.06.2025.

Baderschneider, M. & Mertke, T. (2010). *Testsystem für kamerabasierte Fahrerassistenzsysteme,* TESIS DYNAware GmbH & Bertrandt Ing.- Büro GmbH.

BASF SE. (2016). *Basotect® - Der vielseitige Schaumstoff aus Melaminharz;*. Verfügbar unter:

https://documents.basf.com/5916be706e35e3b3fe4cd30347e2890a0242e3ea/Basotect_BASF_d.pdf Zugriff am 25.11.2021.

BMW Group AG. (2013). *I01 Fahrerassistenzsysteme. BMW Service - Technisches Training. Produktinformation.*

BMW Group AG. (2014). *Fahrerassistenzsysteme - auf dem Weg zum autonomen Fahren*. Verfügbar unter: https://www.connect.de/bilder/114785320/800x480-c2/Fahrerassistenzsysteme.jpg Zugriff am 25.11.2021.

B-Parts. (2021). *BMW i3 KAFAS ECU closed*. Verfügbar unter: https://bparts-eu.s3-eu-west-1.amazonaws.com/images/31946/original/images/31946/clean_image/fxqez4ww5qdasm0777g874i7utp9uqih.jpg Zugriff am 24.11.2021.

Braess, H.-H. & Seiffert, U. (2013). *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01691-3

Butcher, L. (2021). *AVL and Stähle enable active steering on vehicle testbeds*. Verfügbar unter: https://www.autonomousvehicleinternational.com/news/simulation/avl-and-stahle-enable-active-steering-on-vehicle-testbeds.html Zugriff am 30.03.2025.

Destatis. (2020). *Alle 9 Stunden stirbt ein Mensch bei einem Geschwindigkeitsunfall in Deutschland. Pressemitteilung Nr. N 039*. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/07/PD20_N039_46241.html Zugriff am 19.03.2022.

Donges, E. (1982). *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. Automobil-Industrie.

DPA. (2024). *Waymo-Robotaxis machen 100.000 Fahrten pro Woche*. Verfügbar unter: https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/unternehmen---institutionen/waymo-robotaxis-machen-100-000-fahrten-pro-woche/27487790 Zugriff am 31.03.2025.

DSPACE. (2021). *Radar Test Bench. Compact test solution for radar-based applications and autonomous driving,* dSPACE. Verfügbar unter:

https://www.dspace.com/shared/data/pdf/2021/dSPACE-Radar-Testbench-Compact-3D_TwoPager_2021-12_E.pdf Zugriff am 19.03.2022.

Düser, T. & Albers, A. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In *Automobiles and sustainable mobility: Proceedings of the FISITA 2010 World Automotive Congress, Budapest, Hungary, May 30 - June 4, 2010* (1-CD). Gépipari Tudományos Egyesület = Scientific Association for Mechanical Engineering (GTE).

Düser, T. & Hettel, R. (2016). *Verfahren zur Simulation von Kurvenfahrten,* WO 2015/028585. https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20181107/patents/EP3039398NWB1/document.pdf.

Düser, T., Olms, H., Haase, A., Gavel, R. von, Schmidt, C. & Schmidt, U. (2011). *Fahrzeugrollenprüfstände. Von der Zertifizierung bis hin zur mechatronischen Entwicklungsplattform* (Bd. 341). Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.

Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. https://doi.org/10.3139/9783446449084

Els (Automotive iQ), P. (2017). *How much testing will prove automated cars are safe?* Verfügbar unter: https://www.automotive-iq.com/autonomous-drive/articles/how-much-testing-will-prove-automated-cars-are-safe Zugriff am 19.07.2021.

Euro NCAP. (2015). *European New Car Assesment Programme (Euro NCAP). Test Protocol - AEB systems* (Version 1.1). Verfügbar unter: https://cdn.euroncap.com/media/20876/euro-ncap-assessment-protocol-sa-v70.pdf Zugriff am 10.01.2022.

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2019). Verordnung (EU) 2019/2144 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2019 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge im Hinblick auf ihre allgemeine Sicherheit und den Schutz der Fahrzeuginsassen und von ungeschützten Verkehrsteilnehmern,. *Amtsblatt der Europäischen Union*, (L 325). Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj

FCC. (2012). *MOBILEYE 5 Teardown. Internal Photos Mobileye Technology*. Verfügbar unter: https://fccid.io/AECMOB005/Internal-Photos/Internal-Photos-1661800 Zugriff am 24.11.2021.

Fischer, J. C. H. (2018). Methoden für die Validierung des Fahrzeuginnengeräusches von Elektrofahrzeugen in Bezug auf tonale Geräusche aufgrund torsionaler Anregung durch den Elektromotor. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 106). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). https://doi.org/10.5445/IR/1000080314

FKFS. (2012). *Fahrt im Fahrsimulator des FKFS*. Verfügbar unter: https://www.fkfs.de/fileadmin/_processed_/2/3/csm_mech_bild_5-1-2_de_07_f1af045ecd.jpg Zugriff am 19.03.2022.

FKFS. (2014). *Stuttgarter Fahrsimulator des FKFS*. Verfügbar unter: https://www.pressebox.de/pressemitteilung/ace-stossdaempfer-gmbh/Stuttgarter-Fahrsimulator-Sichere-Fahrt-in-die-Endlagen-mit-ACE/boxid/704604 Zugriff am 25.11.2021.

Fluhr, D. (2018). *Waymo erreicht 10 Millionen Testmeilen,* Autonomes Fahren & Co - Magazin für Autonome Autos, Vernetzung, Robotik und Künstliche Intelligenz. Verfügbar unter: https://www.autonomes-fahren.de/waymo-erreicht-10-millionen-testmeilen/ Zugriff am 02.10.2021.

Forkenbrock, G. J. & Snyder, A. S. (2015). *NHTSA's 2014 automatic emergency braking test track evaluations.* (Report No. DOT HS 812 166). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Freund, K. (2024). *Qualcomm Has Become A Leader In Automotive Automation*. Verfügbar unter: https://www.forbes.com/sites/karlfreund/2024/10/08/qualcomm-has-become-a-leader-in-automotive-automation/ Zugriff am 31.03.2025.

Gadringer, M. E., Maier, F. M., Schreiber, H., Makkapati, V. P., Gruber, A., Vorderderfler, M. et al. (2018). Radar target stimulation for automotive applications. *IET Radar, Sonar & Navigation*, *12*(10), 1096–1103. https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5126

Galko, C., Rossi, R. & Savatier, X. (2014). Vehicle-Hardware-In-The-Loop system for ADAS prototyping and validation. https://doi.org/10.1109/SAMOS.2014.6893229

Gasser, T. M. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe* (Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt), Bd. 83). Bremerhaven.

Gietelink, O., Ploeg, J., Schutter, B. de & Verhaegen, M. (2006). Development of advanced driver assistance systems with vehicle hardware-in-the-loop simulations. *Vehicle System Dynamics*. https://doi.org/10.1080/00423110600563338

Habermann, B., Reuss, H.-C. & Meyer, G. (2020). *Positionspapier: Schlüsselrolle der E/E-Architektur und der Bordnetze für das Automobil der Zukunft*. Verfügbar unter: https://www.strategiekreis-automobile-zukunft.de/files/enova-position-bordnetze-und-fahrzeugarchitektur.pdf Zugriff am 24.11.2021.

Haken, K.-L. & Klement, W. (Hrsg.). (2013). *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. Mit 36 Tabellen sowie 20 Übungsaufgaben* (Fahrzeugtechnik, 3., aktualisierte Auflage). München: Hanser.

Hasel, M. (2015). XiL-basierte Kalibrierung und Validierung von Antriebssystemen durch den Einsatz von Rollenprüfständen. In *VDI Wissensforum 2015. Das Wechselspiel zwischen Kupplung, Dämpfer und Antriebssystemen* .

Haun, M. (2013). *Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter* (VDI-Buch, 2. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg.

He, Y., Yu, A., Liu, X. & Wang, Y. [Yuelin] (2024). Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS). In Y. Wang, M.-H. Chi, J. J.-C. Lou & C.-Z. Chen (Hrsg.), *Handbook of Integrated Circuit Industry* (S. 895–911). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2836-1_48

Hofmann, D. & Johnson, A. (1924). *Early Chassis Dyno*. Verfügbar unter: http://www.dnagarage.ca/early-chassis-dyno/ Zugriff am 24.11.2021.

IIHS - Insurance Institute for Highway Safety. (2018). Pedestrian autonomous emergency braking test protocol.

IIHS - Insurance Institute for Highway Safety. (2023). Real-world benefits of crash avoidance technologies.

Invest-in-bavaria.com. (2022). *Bayern: Ein Testfeld für die Zukunft der Mobilität*. Verfügbar unter: https://www.invest-in-bavaria.com/blog/beitrag/bayern-ein-testfeld-fuer-die-zukunft-der-mobilitaet Zugriff am 15.06.2025.

IPEK - Institut für Produktentwicklung. (2022). *Der Akustikrollenprüfstand mit Vehicle-in-the-LoopTechnologie des IPEK*. Verfügbar unter: https://www.ipek.kit.edu/downloads/220310_Flyer_ARP_De.pdf Zugriff am 30.03.2025.

ISO 22179 (2009). *Intelligent transport systems - Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems - Performance requirements and test procedures*. Genf: ISO copyright office.

ISO 15622 (2010). *Intelligent transport systems - Adaptive Cruise Control systems - Performance requirements and test procedures*. Genf: ISO copyright office.

ISO 15623 (2013). *Intelligent transport systems - Forward vehicle collision warning systems - Performance requirements and test procedures*. Genf: ISO copyright office.

ISO 19206 (2018). *Road vehicles -- Test devices for target vehicles, vulnerable road users and other objects, for assessment of active safety functions -- Part 1: Requirements for passenger vehicle rear-end targets*. Genf: ISO copyright office.

Johansson, J. & Oden, M. (2015). *Development of test equipment for analysis of camera vision systems used in car industry*. Verfügbar unter: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:859473/FULLTEXT01.pdf Zugriff am 24.11.2021.

K. Bengler, K. Dietmayer, B. Färber, M. Maurer, C. Stiller, H. Winner (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems - Review and Future Perspectives. In *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* (vol. 6, no. 4, Winter).

Kainz, A., Steiner, H., Schalko, J., Jachimowicz, A., Kohl, F., Stifter, M. et al. (2018). Distortion-free measurement of electric field strength with a MEMS sensor. *Nature Electronics*. https://doi.org/10.1038/s41928-017-0009-5

Keßler, G., Sieben, D., Bhange, A. & Börner, E. (2023). The Software Defined Vehicle - Technical and Organizational Challenges and Opportunities. In A. C. Kulzer, H.-C. Reuss & A. Wagner (Hrsg.), *23. Internationales Stuttgarter Symposium* (S. 414–426). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Klingler, S. (2016). Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 101). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). https://doi.org/10.5445/IR/1000073864

Koller, B. & Düser, T. (2020). Homologation und Validierung von automatisierten Fahrfunktionen. *ATZextra*, *25*(1), 22–27. https://doi.org/10.1007/s35778-020-0113-4

Krause, O. (2018). *Steuergerätebaum BMW i3,* elektrifiziert.net. Verfügbar unter: https://www.elektrifiziert.net/index.php?attachment/1979-pasted-from-clipboard-png/ Zugriff am 19.03.2022.

Lalli, M. (2020). *Autonomes Fahren und die Zukunft der Mobilität*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Landes, D. (2022). Ein Beitrag zur effizienten und frühzeitigen Prognose des Einflusses von Subsystemen des Antriebs und des Fahrwerks auf das Außengeräusch von Fahrzeugen. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 150). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). https://doi.org/10.5445/IR/1000151578

Lehr, P., Metzger, S., Geimer, M. & Budde, L. (2023). Validierungsumgebung für ein neues Kabinenkonzept am Beispiel eines Mähdreschers. In *ATZheavy duty* (Bd. 16, S. 34–37). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/s35746-023-1015-3

Leitner, A., Watzenig, D. & Ibanez-Guzman, J. (2020). *Validation and Verification of Automated Systems*. Results of the ENABLE-S3 Project. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14628-3

Levy, R. (2010). *IAA Nutzfahrzeuge Pressekonferenz: Mobileye präsentiert erstmals in Europa das neue Fahrerassistenzsystem zur Vermeidung von Unfällen mit Fussgängern*. Verfügbar unter: https://www.presseportal.ch/de/pm/100017548/100609800 Zugriff am 18.05.2025.

Mandel, C., Wolter, K., Bause, K., Behrendt, M., Hanf, M. M. & Albers, A. (2020). Model-Based Systems Engineering methods to support the reuse of knowledge within the development of validation environments. In *2020 IEEE International Systems Conference (SysCon).* IEEE.

Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. & Winner, H. (2015). *Autonomes Fahren*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9

McDowell, S. (2024). *Intel's Big Automotive Play: SoCs And An Acquisition*. Verfügbar unter: https://www.forbes.com/sites/stevemcdowell/2024/01/10/intels-big-automotive-play-socs-and-an-acquisition/ Zugriff am 31.03.2025.

Mercedes Benz Group AG. (2025). *Vom mitdenkenden zum autonomen Auto.* Verfügbar unter: https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/intelligent-drive.html#:~:text=Erstmals%20f%C3%BChrte%20Mercedes%2DBenz%20mit,Stern%20seit%20vielen%20Jahren%20Ma%C3%9Fst%C3%A4be. Zugriff am 07.05.2025.

Mercedes-Benz Group AG. (2024). *Drive Pilot - Hochautomatisiert bis 95 km/h auf der Autobahn.* Verfügbar unter: https://group.mercedes-benz.com/innovationen/produktinnovation/autonomes-fahren/drive-pilot-95-kmh.html Zugriff am 29.03.2025.

MobilEye. (2011). *Mobileye 5 – Technical Installation Guide_Rev 0.1. Technical Support Manual*.

Möller, D. & Haas, R. E. (2019). *Guide to automotive connectivity and cybersecurity. Trends, technologies, innovations and applications* (Computer Communications and Networks). Springer Fachmedien.

Mouchegh, J. (2023). *Das ist Samsungs neue Automotive-Prozessstrategie*. Verfügbar unter: https://www.all-electronics.de/automotive-transportation/das-

ist-samsungs-neue-automotive-prozessstrategie-176.html Zugriff am 20.11.2025.

Munsch, E. (2013). *Das Auto schaut mit. Elektronische Helfer im Auto werden künftig Standard. Ohne sie vergibt die Euro NCAP bald keine Bestnoten für Sicherheit mehr. Stereokameras werden ab 2016 üblich werden.,* Zeit. Verfügbar unter: https://www.zeit.de/mobilitaet/2013-09/autotechnik-assistenzsysteme/komplettansicht Zugriff am 15.06.2025.

Nuttall, C. (2020). *Nvidia to drive Mercedes cars*. Verfügbar unter: https://www.ft.com/content/090499f6-113d-4e91-a3cc-7bddf26b88d3 Zugriff am 31.03.2025.

NVIDIA. (2021). *SELF-DRIVING SAFETY REPORT*. Verfügbar unter: https://images.nvidia.com/content/self-driving-cars/safety-report/auto-print-self-driving-safety-report-2021-update.pdf Zugriff am 25.11.2021.

NVIDIA Corporation. (2023). *NVIDIA DRIVE OS Linux SDK Developer Guide*. Verfügbar unter: https://developer.nvidia.com/docs/drive/drive-os/6.0.7/public/drive-os-linux-sdk/drive_os_v5l_sdk_dev_guide.pdf Zugriff am 31.03.2025.

NXP Semiconductors. (2021). *I2C-bus specification and user manual*. Verfügbar unter: http://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf Zugriff am 04.12.2021.

Paulweber, M. & Lebert, K. (2014). *Mess- und Prüfstandstechnik. Antriebsstrangentwicklung - Hybridisierung - Elektrifizierung* (Der Fahrzeugantrieb). Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-04453-4

PEGASUS. (2019). *PEGASUS*. Verfügbar unter: https://www.pegasusprojekt.de/de/home Zugriff am 27.08.2023.

Pilkington (Hrsg.). (2023). *Kapitel 10 Der LiDAR-Sensor*. Verfügbar unter: https://www.pilkington.com/de-de/de/automotive/agr-news/martins-adas-blog/kapitel-10-der-lidar-sensor Zugriff am 15.06.2025.

Pohlandt, C., Brinkschulte, L. & Geimer, M. (2016). Entwicklungsmethode für elektrische und hybride Antriebssysteme. In *ATZ off highway* (S. 40–47).

Wiebaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.5445/IR/1000056137

Radlmayr, J. & Bengler, K. (2015). *Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren*. FAT-Schriftenreihe.

Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160

Reif, K. (2012). *Sensoren im Kraftfahrzeug*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2208-6

Rösener, C., Sauerbier, J., Zlocki, A., Eckstein, L., Hennecke, F., Kemper, D. et al. (2019). *Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Fahrzeugtechnik, Heft 128). Bremen.

SAE. (2016). *SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE*.

Salvendy, G. & Karwowski, W. (Eds.). (2021). *Handbook of human factors and ergonomics* (Fifth edition). Hoboken, New Jersey: Wiley.

Schäuffele, J. & Zurawka, T. (2016). *Automotive Software Engineering. Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen* (ATZ / MTZ-Fachbuch, 6. Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Schille, F. (2019). Methode zur generationsübergreifenden NVH-Optimierung des Wiederstartkomforts von Hybridfahrzeugen durch eine manöverbasierte Validierung auf dem Akustikrollenprüfstand. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 123). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Schmidt, S. & Frings, A. (2018). Systems Engineering mithilfe virtueller Prototypen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, *120*(5), 46–51. https://doi.org/10.1007/s35148-018-0029-0

Seiniger, P., Bartels, O., Inselt, T., Rodarius, C., Vissers, J., Aparicio, A. et al. (2012). Ein validiertes Testverfahren für Notbremssysteme-Ergebnisse des ASSESS Projekts. *5. Tagung Fahrerassistenz*.

Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.). (2013). *Energieeffiziente Antriebstechnologien. Hybridisierung - Downsizing - Software und IT* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Siebenpfeiffer, W. (2015). *Fahrerassistenzsysteme und Effiziente Antriebe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-08161-4

Sievers, G., Graf, S., Peperhowe, M. & Seiger, C. (2018). Simulation von Sensoren im SiL- und HiL-Umfeld. *ATZextra*. https://doi.org/10.1007/s35778-018-0038-3

Sikora, A., Lill, D., Schappacher, M., Gutjahr, S. & Gerber, E. (2013). Development of Car2X Communication and Localization PHY and MAC Protocol Following Iterative Spiral Model Using Simulation and Emulation. In M. Berbineau, M. Jonsson, J.-M. Bonnin, S. Cherkaoui, M. Aguado, C. Rico-Garcia et al. (eds.), *Communication Technologies for Vehicles. 5th International Workshop, France, May 14-15, 2013. Proceedings* (Lecture Notes in Computer Science Ser, v.7865, S. 136–145). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Sony Group Corp. (2022). *Sony VISION-S 02. An SUV creating the value of rich mobility*. Verfügbar unter: https://www.sony.com/en/SonyInfo/vision-s/vehicle2.html Zugriff am 31.03.2025.

Sovani, S. (2017). Simulation beschleunigt Entwicklung des autonomen Fahrens. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, *119*(9), 26–33. https://doi.org/10.1007/s35148-017-0092-y

Speth, J. (2009). *Videobasierte modellgestützte Objekterkennung für Fahrerassistenzsysteme*. München: Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme.

Stanley, B. (2021). *Snow, fog, and ice spotlight ADAS system weakness. Inclement weather continues to challenge ADAS system performance, potentially affecting driver trust in autonomous driving.,* automotiveworld.com. Verfügbar unter: https://www.automotiveworld.com/articles/snow-fog-and-ice-spotlight-adas-system-weakness/ Zugriff am 29.03.2025.

Stein, G. P., Mano, O. & Shashua, A. (2003). Vision-based ACC with a single camera: bounds on range and range rate accuracy. In *Proceedings IEEE IV 2003, Intelligent Vehicles Symposium* .

SystemPlus. (2020a). *Tesla Model 3 - Camera & CMOS Image Sensors*. Verfügbar unter: https://www.eetimes.com/wp-content/uploads/ILLUS5_TESLA_MODEL3_Cameras_CIS_SYSTEMPLUSCONSULTING_June2020.jpg Zugriff am 24.11.2021.

SystemPlus. (2020b). *Tesla Model 3 - Forward cameras (Triple camera)*. Verfügbar unter: https://www.eetimes.com/wp-content/uploads/ILLUS3_TESLA_MODEL3_ForwardCameras_SYSTEMPLUSCONSULTING_June2020.jpg Zugriff am 24.11.2021.

SystemPlus. (2020c). *Tesla Model 3 -Forward cameras : comparison with other forward Tri-Cam*. Verfügbar unter: https://www.eetimes.com/wp-content/uploads/ILLUS4_TESLA_MODEL3_ForwardCameras_Comparison_SYSTEMPLUSCONSULTING_June2020.jpg Zugriff am 24.11.2021.

Tellmann, D. (2011). *Hardware-in-the-loop-gestützte Entwicklungsplattform für Fahrerassistenzsysteme. Modelle der Umfeldsensorik und angepasste Fahrermodelle*. Kassel.

Tesla Inc. (2025a). *Autopilot-Funktionalität und Volles Potenzial für autonomes Fahren*. Verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_de/support/autopilot Zugriff am 07.05.2025.

Tesla Inc. (Tesla Inc., Hrsg.). (2025b). *Tesla Model Y Owner's Manual*. Verfügbar unter: https://www.tesla.com/ownersmanual/modely/de_de/GUID-005E1645-B0F5-49A0-9C59-44828B60D184.html Zugriff am 15.06.2025.

Thorn, E., Kimmel, S. & Chaka, M. (2018). *A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios. (Report No. DOT HS 812 623)*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

VDA: Verband der Automobilindustrie (Hrsg.). (2015). *Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. Verfügbar unter: https://www.vda.de/de/themen/digitalisierung/automatisiertes-fahren Zugriff am 20.11.2025.

VDA: Verband der Automobilindustrie. (2019). *Normungs-Roadmap zum automatisierten Fahren*. Verfügbar unter: https://www.vda.de/dam/jcr:93aed46a-f325-42cd-a071-5a624ae49297/VDA_04474_Normungsroadmap_A4_Web02.pdf Zugriff am 20.11.2025.

VDI 2206 (März 2003). *VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*.

Volkswagen AG. (2001). SSP 238: Datenaustausch auf dem CAN-Bus I.

Volkswagen AG. (2007). SSP 389: Der Parklenkassistent.

Waldenmayer, D., Buyer, J., Bause, K., Fuchs, F., Weiß, H., Chen, S. et al. (2021). Multikriterielle Fahrstrategieplanung für Hybrid-Elektrofahrzeuge mittels Verkehrsflussmodellierung.

Weiß, H. (2022). *Entwicklung und Untersuchng einer multikriteriellen Fahrstrategieplanung*. Masterarbeit. Hochschule Heilbronn.

Wickens, C. D. & Carswell, C. M. (2006). *Information Processing*. https://doi.org/10.1002/0470048204.ch5

Winner, H., Dietmayer, K., Eckstein, L., Jipp, M., Maurer, M. & Stiller, C. (2024). *Handbuch Assistiertes und Automatisiertes Fahren. Grundlagen, Komponenten und Systeme für assistiertes und automatisiertes Fahren* (ATZ/MTZ-Fachbuch, [4. Auflage-]. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg.

Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. & Singer, C. (Hrsg.). (2015). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (ATZ / MTZ-Fachbuch, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3

Witte, F. (2019). *Testmanagement und Softwaretest*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-25087-4

Wood, M., Robbel, P., Maass, M., Tebbens, R., Meijs, M., Harb, M. et al. (2019). *Safety First for Automated Driving*.

Yan, S. L. (2020). Vernetzte Validierungsumgebungen – ein Beitrag zur Validierung im verteilten Produktentwicklungsumfeld auf Basis des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes am Beispiel der Antriebssystementwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 130). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Yoshida, J. & Di Paolo Emilio, M. (2020). *A Tesla Model 3 Tear-Down After a Hardware Retrofit,* eetimes.com. Verfügbar unter: https://www.eetimes.com/a-tesla-model-3-tear-down-after-a-hardware-retrofit/4/

YouTube AI DRIVR. (2021). *Navigating around Manteca, CA in FSD BETA 9.1*. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=d1ckPzKY-rw Zugriff am 24.11.2021.

YouTube dSPACE Group. (2021). *Validating Radar Sensors and Functions for Autonomous Driving*. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=t0noOLYGPDw Zugriff am 25.11.2021.

Studentische Abschlussarbeiten die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor Co-betreut wurden:

Andresen, M. (2020). *Untersuchungen zur Übertragung von Validierungsaktivitäten kamerabasierter Fahrerassistenzsysteme zwischen Teststrecke und Rollenprüfstand mithilfe einer standortverteilten Umweltsimulation*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Baum, M. (2018). *Validierung von kamerabasierten Fahrerassistenzfunktionen unter Einsatz eines kompakten Kamerastimulators*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Borstel, A. von. (2018). *Übertragbarkeit von Validierungsaktivitäten an Fahrerassistenzsystemen von der Straße auf den Rollenprüfstand*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Doldt, L. (2018). *Untersuchung zur durchgängigen Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen anhand einer erweiterten Validierungsumgebung auf der Teststrecke hin zum XiL-Rollenprüfstand*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Freitag, N. (2017). *Validierung eines kamerabasierten Abstandsregeltempomaten mit Variation von Parametern der virtuellen Umwelt*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Knoll, M. (2019). *Entwicklung einer Stimulationsmethode für Beschleunigungssensoren nach dem MEMSPrinzip zur Validierung von Fahrerassistenzsystemen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Kolling, C. (2021). *Entwicklung einer Methode zum Übertrag von Validierungsaktivitäten zwischen Testgelände und Prüfstand unter Berücksichtigung von manöverrelevanten Umwelteinflüssen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Mattia, D. (2018). *Übertragbarkeit von Straßenversuchen auf den Rollenprüfstand zur Validierung von Notbremsassistenten*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Montag, T. (2019). *Untersuchungen zur Validierung von kame-rabasierten Fahrerassistenzsystemen durch den Vergleich computergenerierter Bilder gegenüber Abbildungen der realen Umgebung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Oualha, O. (2018). *Beitrag zur Validierungsumgebung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel des Regen- und Helligkeitssensors*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Oualha, O. (2022). *Untersuchungen an einer durchgängigen Validierungsumgebung für kamerabasierte Fahrerassistenzfunktionen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Peschina, A. (2020). *Entwicklung eines neuen Auswertungsansatzes für kamerabasierte Fahrerassistenzsysteme als Beitrag zur Validierung am*

Gesamtfahrzeug. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Pudlo, L. (2018). *Methoden zur energetischen Betrachtung mobiler elektrischer Antriebssysteme unter Verwendung des Abstandregeltempomaten auf genormten Fahrzyklen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Raible, S. L. (2020). *Entwicklung einer Methodik zur Charakterisierung von Übertragungssignalen bei der Verwendung einer virtuellen Umweltsimulation für die Validierung von Fahrerassistenzsystemen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Rau, O. (2018). *Ansätze zur Automatisierung von Tests zur Homologation von Fahrerassistenzsystemen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Wäschle, M. (2017). *Effiziente Validierung von monokamerabasierten ACC-Systemen durch virtuelle Erweiterung des Fahrzeugrollenprüfstandes am Beispiel eines Elektrofahrzeuges*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Wei, X. (2019). *Entwicklung einer Methode zur reproduzierbaren Validierung von kamerabasierten Fahrerassistenzsystemen unter Einsatz eines kompakten Kamerastimulators*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Xu, K. (2019). *Entwicklung einer Methode zur systematischen Ausrichtung von Stimulatoren für die Validierung kamarabasierten Fahrerassistenzsystemen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Publikationsliste

Albers, A., Lutz, S., Behrendt, M., Düser, T. & Hettel, R. (2017). Validation environment for function development and coverage of ADAS in the car development process. In M. Bargende, H.-C. Reuss & J. Wiedemann (Hrsg.), *17. Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik* (Proceedings). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Lutz, S. (2016). *Beitrag zum Entwurf einer Validierungsumgebung für ADAS am Beispiel eines ultraschall-basierten Einparksystems*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Lutz, S., Albers, A., Hettel, R. & Behrendt, M. (2017). Effizientere Validierung und Funktionsabsicherung von Fahrerassistenzsystemen auf dem Rollenprüfstand. In K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg, R. Stelzer, K. Brökel et al. (Hrsg.), *15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017.* Essen.

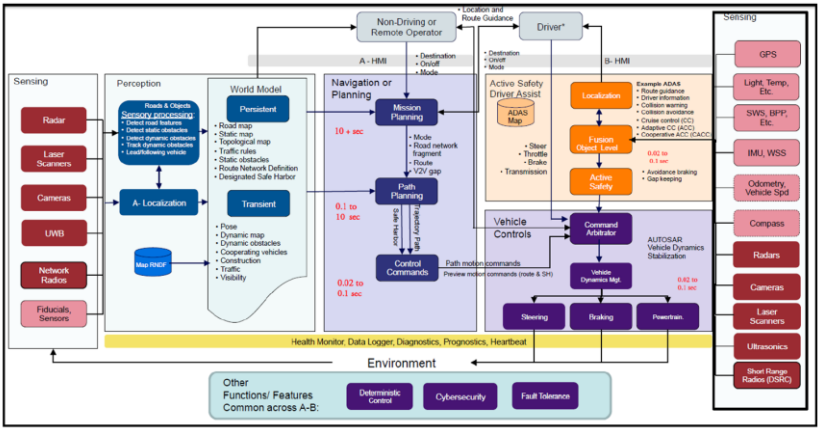
Lutz, S., Behrendt, M. & Albers, A. (2020). Continuous development environment for the validation of autonomous driving functions. In M. Bargende, H.-C. Reuss & A. Wagner (Hrsg.), *20. Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik.* Wiesbaden: Springer Vieweg.

Lutz, S., Hettel, R., Albers, A., Behrendt, M. & Schyr, C. (2018). *Verfahren zur Analyse eines Automatisierungssystems einer Anlage, Emulator zum zumindest Teilweise virtuellen Betreiben eines Automatisierungssystems einer Anlage und System zur Analyse eines Automatisierungssystems einer Anlage.* AVL List GmbH (Anmelder), WO 2019/119012 A1.

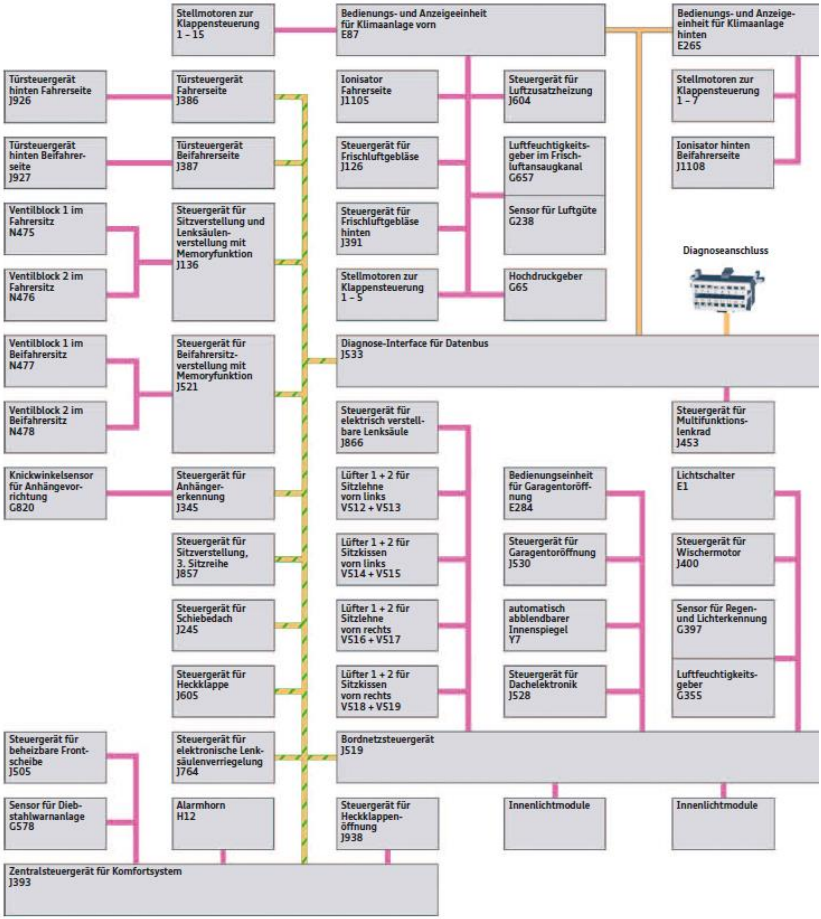
Mandel, C., Lutz, S., Rau, O., Behrendt, M. & Albers, A. (2019). Model-Based Engineering für die Automatisierung von Validierungsaktivitäten am Beispiel Fahrerassistenzsysteme. In R. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019* .

Mandel, C., Wäschle, M., Lutz, S. & Behrendt, M. (2021). A Model-Based approach for automation and traceability of validation activities – clarified for Advanced Driver Assistance Systems. In *9th International Symposium on Development Methodology* .

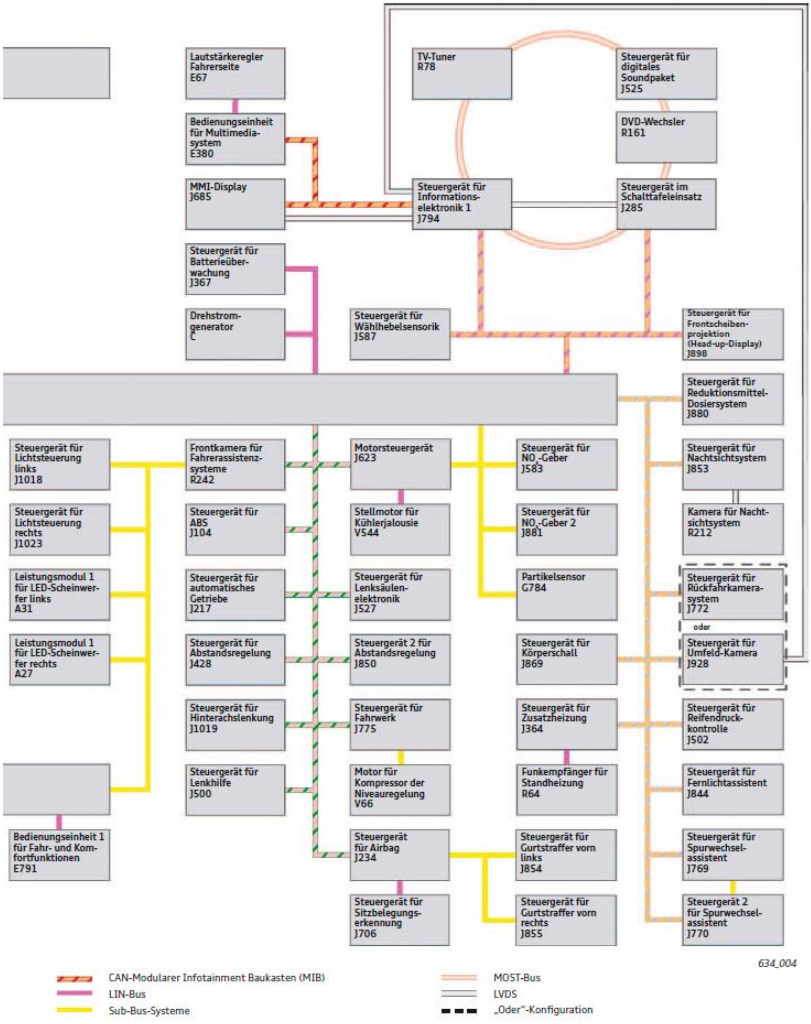
Anhang



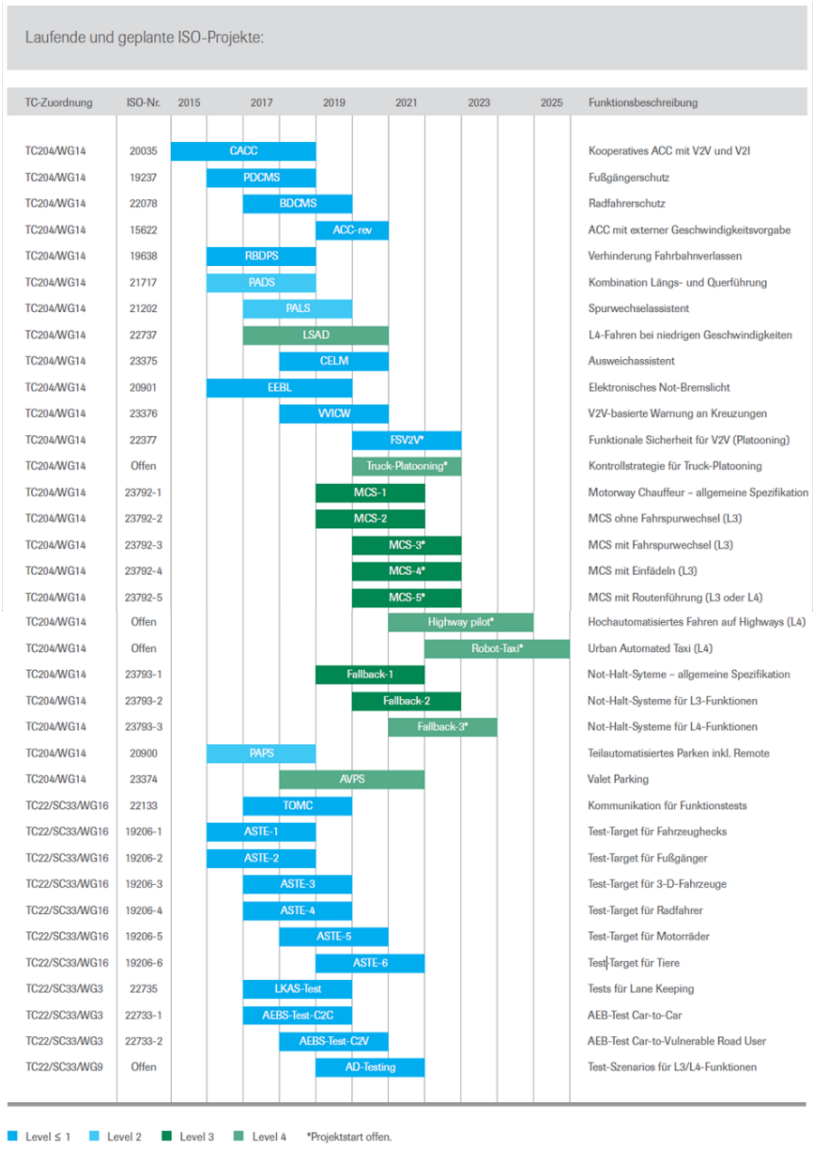
SAE International Autonomous Mode Functional Architecture Flow Diagram (Thorn et al., 2018)



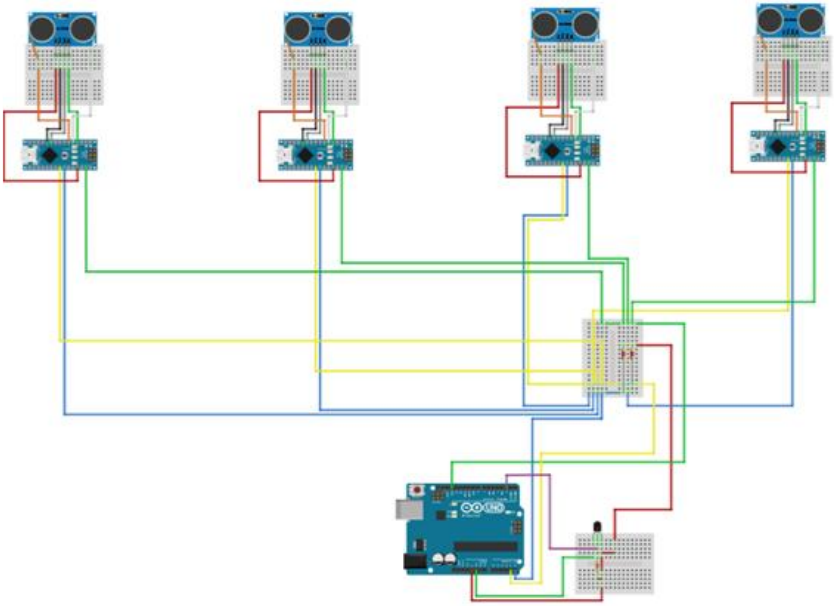
Steuergerätebaum in Groß Teil 1, Bezug zu Abbildung 2.32



Steuergerätebaum in Groß Teil 2, Bezug zu Abbildung 2.32



Laufende und geplante ISO-Projekte hinsichtlich Fahrerassistenz / Fahrfunktionen (VDA: Verband der Automobilindustrie, 2019)



Schaltplan eines Aufbaus zur Ultraschallstimulation an vier Sensoren (Lutz, 2016)[35]

[35] Abschlussarbeit des Autors (unveröffentlicht)