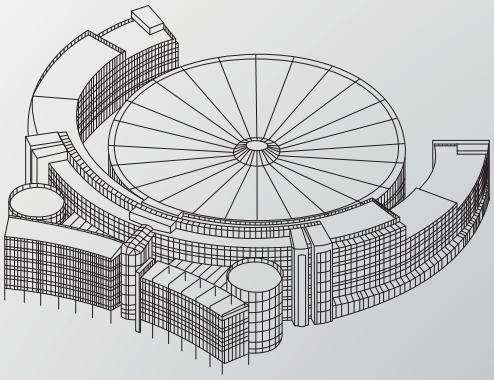
BERICHTE AUS DEM
PRODUKTIONSTECHNISCHEN
ZENTRUM BERLIN



Christian Buchholz

Hybrid-Prototype-in-the-Loop zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen

Fraunhofer IPK
INSTITUT PRODUKTIONSANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK

iwf
INSTITUT WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

BERICHTE AUS DEM
PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN

Christian Buchholz

Hybrid-Prototype-in-the-Loop zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. R. Stark
Prof. Dr.-Ing. H. Kohl
Prof. Dr.-Ing. R. Jochem
Prof. Dr.-Ing. J. Krüger
Prof. Dr.-Ing. M. Rethmeier
Prof. Dr.-Ing. G. Seliger
Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. Uhlmann

Fraunhofer IPK
INSTITUT PRODUKTIONSANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK

IWF
INSTITUT WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8-9
10587 Berlin
Telefon 030 39006-0
Fax 030 39110-37
E-Mail info@ipk.fraunhofer.de
URL www.ipk.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.de abrufbar.
ISBN: 978-3-8396-1650-5

D 83

Zugl.: Berlin, TU, Diss., 2020

Druck und Weiterverarbeitung:
Fraunhofer Verlag, Mediendienstleistungen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© **FRAUNHOFER VERLAG,** 2020
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Fachgebiet Industrielle Informationstechnik
Prof. Dr.-Ing Rainer Stark
Technische Universität Berlin

Hybrid-Prototype-in-the-Loop zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Christian Buchholz

an der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07.02.2020

Berlin 2020

für
Juliane Walli Ruth

Kurzfassung

Durch Maßnahmen der Fahrsicherheitstechnik konnten in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte in der Vermeidung von Unfällen und Abschwächung von Unfallfolgen erzielt werden. Fahrerassistenzsysteme (FAS), die den Fahrer in der Fahrzeugführungsaufgabe unterstützen, haben dazu einen wesentlichen Beitrag geleistet. FAS informieren und warnen den Fahrer, geben Feedback zuseinen Handlungen, verbessern den Komfort und reduzieren seine Belastung durch eine aktive Stabilisierung und Steuerung des Fahrzeugs. Zukünftige autonome Fahrzeuge werden mit FAS ausgestattet sein, die teilweise oder sogar vollständig die Kontrolle über die Fahraufgabe übernehmen und das Fahrzeug autonom steuern.

Bereits in der heutigen FAS Entwicklung ist es eine große Herausforderung, die Beherrschbarkeit des FAS für den Fahrer frühzeitig abzusichern. Die Beherrschbarkeit bemisst sich an der Möglichkeit und Fähigkeit des Fahrers, die Kritikalität einer Situation unter Zuhilfenahme des FAS wahrzunehmen, sich für eine angemessene Gegenreaktion zu entscheiden und diese mit Hilfe des FAS erfolgreich durchzuführen. Da insbesondere in die Fahraufgabe eingreifende FAS hochgradig in das Fahrzeug integrierte Systeme darstellen, ist die FAS Entwicklung eng mit der Fahrzeugentwicklung verknüpft. Der heutige Beherrschbarkeits-Test wird zumeist erst kurz vor Produktionsstart des Fahrzeugs mit prototypischen Test-Fahrzeugen durchgeführt. Änderungen, die zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung durchgeführt werden, sind in der Regel sehr kosten- und zeitintensiv. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher untersucht, wie FAS früher als im Stand der Technik im FAS Entwicklungsprozess hinsichtlich ihrer Beherrschbarkeit getestet werden können.

Auf Basis einer detaillierten Analyse des technischen FAS sowie der zugehörigen Entwicklungs- und Testprozesse werden zunächst die grundlegenden Möglichkeiten evaluiert, wie der Beherrschbarkeit-Test früher als im Stand der Technik durchgeführt werden kann. Diese Möglichkeiten werden hinsichtlich ökonomischer und technischer Potentiale analysiert.

Anschließend wird ein neues Testverfahren zur Umsetzung dieser Potentiale konzipiert. Das Testverfahren basiert auf einer neuartigen Zusammenstellung früher Entwicklungsprototypen zu einem testbaren FAS Prototyp. Der Beherrschbarkeitstest dieses Prototyps wird im Fahrsimulator anstatt im Fahrzeug ermöglicht. Um das Testverfahren im FAS Entwicklungsprozess einsetzen zu können, wird eine Methodik entwickelt. Diese stellt Werkzeuge, Methoden und Prozesse für die Testvorbereitung, -durchführung und -auswertung bereit und unterstützt die effiziente Durchführung. Das Testverfahren sowie die Methodik zu dessen Anwendung im FAS Entwicklungsprozess werden anschließend im Rahmen mehrerer Nutzertests evaluiert.

Auf Basis der erlangten Ergebnisse erfolgt die Bewertung, inwieweit die erarbeiteten Lösungen den Beherrschbarkeits-Test früher als heute üblich im FAS Entwicklungsprozess ermöglichen. Abschließend erfolgt die Bewertung der Potentiale, die das neue Testverfahren und die Methodik für den Test der Beherrschbarkeit zukünftiger FAS für das autonome Fahren bietet. Im Ausblick werden Weiterentwicklungspotentiale des entwickelten Testverfahrens und der Methodik beleuchtet. Dazu wird untersucht, ob und inwieweit das entwickelte Testverfahren auch auf andere Arbeitsbereiche der Mensch-Technik Kollaboration übertragbar ist.

Abstract

In the past decades, great progress has been made in preventing accidents and mitigating the consequences of accidents by means of driving safety technology measures. Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), which support the driver in the vehicle guidance task, have made a significant contribution to this. ADAS inform and warn the driver, provide feedback on his actions, improve comfort and reduce the driver’s stress stress by actively stabilizing and controlling the vehicle. Future autonomous vehicles will be equipped with ADAS that will partially or even completely take over control of the driving task and autonomously control the vehicle.

Already in today's ADAS development, there is the challenge of ensuring the ADAS controllability for the driver at an early stage. The controllability is determined by the ability of the driver to perceive the criticality of a situation with ADAS assistance, to decide on an appropriate counteraction and to carry out the ADAS supported counteraction successfully. Since ADAS that intervene in the driving task in particular are systems that are highly integrated into the vehicle, ADAS development is closely linked to vehicle development. Today's controllability test is usually performed shortly before the vehicles start of production using prototype test cars. Changes that are carried out at this stage of development are usually very costly and time-consuming. Within the scope of this work, it is investigated how ADAS controllability tests can be performed earlier in the ADAS development process.

Based on a detailed analysis of the ADAS technical background and associated development and test processes of ADAS development, the fundamental possibilities of how the controllability test can be carried out earlier than in the current state of the art will be evaluated. These possibilities will be analyzed with regard to economic and technical potentials.

Subsequently, a new test procedure will be designed. The test procedure is based on a novel combination of early development prototypes to a testable ADAS prototype. The controllability test of this prototype is facilitated in the driving simulator instead of in the vehicle. In order to enable the usage of the test procedure in the ADAS development process, a methodology is developed. This methodology provides tools, methods and processes for test preparation, execution and evaluation and supports the efficient execution of these steps. The test procedure and the methodology for its application in the ADAS development process are evaluated in several user tests.

On the basis of the results obtained, the evaluation of the developed solutions is carried out on the basis of the current weak points identified in the analysis. Finally, the potentials offered by the new test procedure and the methodology for testing the controllability of future ADAS are evaluated. In the outlook, further development potentials of the test procedure and the methodology are illuminated. In addition it is examined whether, and if so, to what extent the developed test procedure can also be applied to other areas of human-machine collaboration.

Geleitwort

Die Schriftenreihe „Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin“ wird von den Professoren der im Produktionstechnischen Zentrum Berlin dauerhaft angelegten Fach- und Forschungsgebiete der TU Berlin gemeinsam herausgegeben. Zweck der Schriftenreihe ist es, die auf den Gebieten der Produktentstehung, Produktionstechnik und Informationstechnik erarbeiteten Forschungsergebnisse einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die an den Fachgebieten des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin und am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik entstandenen Dissertationen. Daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen. Die Herausgeber wünschen sich ein reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn hieraus fruchtbare Dialoge mit Praktikern und Forschern entstünden.

Die Gesellschaft steht vor der großen Verantwortung die mobilitätsbezogenen Zielsetzungen der heutigen Verkehrssysteme sukzessive auf „verträglichere und sicherere Fahrzeug- und Umfeldsysteme“ umzustellen. Um diese ambitionierten Ziele erfüllen zu können, müssen neue digitale Entwicklungsmethoden und -werkzeuge erforscht, entwickelt und erprobt werden, damit anders als bisher üblich frühzeitig im Entwicklungsvorgehen und kontinuierlich über den gesamten Entwicklungsprozess die unterschiedlichen digitalen und mathematischen Modellbildungen vom Fahrzeug selbst, von den Assistenz- und Autonom-Systemen für den Fahrbetrieb sowie die Interaktionen zwischen dem Menschen als (Bei-)Fahrer mit dem Fahrzeug und seinen intelligenten Assistenz- und Autonom-Systemen sowie der Umwelt (vernetzte Infrastruktur) berücksichtigt werden.

Die vorliegende Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Christian Buchholz befasst sich mit dem Thema *„Hybrid-Prototype-in-the-Loop“* und verfolgt das Ziel aufzuzeigen, wie Fahrerassistenzsysteme früher als bisher üblich im Entwicklungsprozess hinsichtlich ihrer systemischen Beherrschbarkeit getestet, validiert und verifiziert werden können. Es ist daher im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift das erweiterte Ziel, eine gemischte (hybride) Testumgebung für die Fahrzeugingenieure zu entwickeln, welche die zuvor erwähnten frühzeitigen Erlebbarkeiten und Prüfbarkeiten von Fahrerassistenzsystemen nicht nur zulässt, sondern auch baukastenmäßig gestalten lässt.

Berlin, September 2020 Rainer Stark

Danksagung

Arbeiten wie diese Dissertation schreiben sich nicht von allein, sondern verdanken ihre Entstehung dem Zusammenwirken unterschiedlicher Personen. Daher ist es mir ein Anliegen den Menschen, die mich und diese Arbeit auf dem Weg zur Fertigstellung unterstützt und gefördert haben, von ganzem Herzen zu danken.

Mein erster Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, der diese Arbeit gefördert und betreut hat. Neben den am Fachgebiet bereitgestellten Strukturen und Möglichkeiten waren insbesondere unsere gemeinsamen Gespräche ein wichtiger Treiber, aus der schon früh vorhandenen Grundidee ein echtes, wissenschaftliches und industrielles Problem zu formulieren. Darüber hinaus waren die Analysen und gezielten, kritischen Fragen und Anmerkungen ein wichtiger Leitfaden während dem Verfassen der schriftlichen Arbeit und halfen maßgeblich bei deren Methodik und Strukturierung. Weiterhin möchte ich Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Die Kollegen aus dem Fachgebiet industrielle Informationstechnik und dem Fraunhofer IPK, mit denen ich sechs Jahre zusammengearbeitet habe, haben mich und mein Forschungsthema maßgeblich geprägt und sind damit ein weiterer wichtiger Gegenstand meiner Danksagung. Besonderer Dank geht hierbei an zwei Kollegen: Zum einen Diana Reich, die immer ein offenes Ohr für mich hatte, wenn ich mal wieder Fragen zum Thema „Usability“ oder dem richtigen Vorgehen zum Probandentest hatte. Insbesondere die Evaluation dieser Arbeit wäre ohne Dianas Ratschläge nie möglich gewesen. Zum anderen Simon Kind, der mein Vorgehen in vielen konstruktiven Gesprächen aus der Ingenieurssicht hinterfragt und mit guten Ratschlägen unterstützt hat.

Ein großer Dank auch an das Team, mit dem ich jahrelang das Digital Cube Test Center und den Functional Drive Fahrsimulator geplant und aufgebaut sowie verschiedene Studien in diesendurchgeführt habe. Im Rahmen der Arbeit möchte ich hierbei einen besonderen Dank an meine studentischen Mitarbeiter Jan Richter, Marten Stepputat, Nicolas Acker und Alexey Enin aussprechen: Ohne euer Mitdenken und euren weit über Norm hinausgehenden Einsatz, wären die umfangreichen Prototypen-Aufbauten und die Evaluationsstudien dieser Arbeit nie möglich gewesen.

Neben der Fachlichkeit spielt für mich seit jeher die Arbeitsatmosphäre eine große Rolle. Daher möchte ich hier meinen Büronachbarn Maik Auricht, Claas Blume und Sophia Rogge danken. Erst das, was unsere Kollegen scherzhaft als „Arbeitsehe“ bezeichneten, machte für mich die Anstellung am Fachgebiet zu mehr als einem Job: Zu einem Umfeld, das es mir ermöglicht kreativ und hochmotiviert zu arbeiten.

Ein weiteres großes Dankeschön geht an meine Korrekturleser, insbesondere an Marcus Gäbler und Sascha Zimmermann: Ich finde es beeindruckend, mit welcher Geduld ihr meine oft weitschweifigen und komplexen Sätze hinterfragt, entschlüsselt und mir hilfreiche und tiefgehende Kommentare zur Überarbeitung gegeben habt. Danke!

Diese Doktorarbeit wäre nie entstanden, wenn mir meine Eltern, Joachim und Erika Buchholz, nicht eine tolle Kindheit und ein Studium ermöglicht hätten. Insbesondere möchte ich euch für die Möglichkeit danken, Erfahrungen in verschiedenen Stationen neben meinem Studium sammeln zu können. So haben insbesondere mein Auslandsstudium und meine fünf Jahre in der Formula Student meine Sichtweisen maßgeblich geprägt und mich damit erst zur Promotion geführt. Vielen Dank euch beiden!

Der letzte Teil dieser Danksagung – und der grösste Dank – gebührt meiner Freundin Juliane Nägele. Nur deine permanente Unterstützung, die vielen Korrekturschleifen und die Motivation, wenn zwischendurch einmal nichts mehr voranging, haben diese Arbeit erst ermöglicht. Das Ergebnis ist genauso dein wie mein Verdienst! Dir widme ich daher diese Arbeit.

Berlin, September 2020 Christian Buchholz

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **III**
Abstract **V**
Geleitwort **VII**
Danksagung **IX**

Abkürzungsverzeichnis **XIV**
Abbildungsverzeichnis **XVII**
Tabellenverzeichnis **XXV**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit 2

2 Grundlagen **5**
2.1 Allgemeine Grundlagen 7
2.2 Grundlagen der Produktentstehung 10
2.2.1 Modell und Prototyp in der Produktentstehung 11
2.2.2 Tests in der Produktentstehung 12
2.2.3 Methodik als übergeordneter Begriff 14
2.2.4 Grundlagen der Bewertung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen 15
2.3 Grundlagen mechatronischer Systeme 16
2.4 Grundlagen der Fahrzeugführung und Fahrer-Fahrzeug-Interaktion 17

3 Stand der Technik **25**
3.1 Das technische Fahrerassistenzsystem 25
3.1.1 Stand der Technik von Fahrerassistenzsystemen 26
3.1.2 Aufbau von Fahrerassistenzsystemen 29
3.1.3 Trends in der Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen 40
3.1.4 Zusammenfassung der Struktur von Fahrerassistenzsystemen 44
3.1.5 Die Regelkreise der Fahrerassistenzsystem-Interaktion 48
3.2 Grundlagen des Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozesses 49
3.2.1 Aufbau und Charakteristika automobiler Produktentwicklungsprozesse 49
3.2.2 Das V-Modell zur Entwicklung mechatronischer Systeme 54
3.2.3 Die Eigenschaftsabsicherung im V-Modell 59
3.3 Grundlagen des Tests von Fahrerassistenzsystemen 63
3.3.1 Grundlagen des Mechanik-Tests 64
3.3.2 Grundlagen des Elektrik-/Elektronik-Tests 66
3.3.3 Grundlagen des Software-Tests 67
3.3.4 Grundlagen des Tests des User Experience Designs 77
3.3.5 Grundlagen des domänenübergreifenden Tests 81

3.4 Vorgehen im industriellen Integrations- und Testprozess von Fahrerassistenzsystemen 83
3.4.1 Der Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess 84
3.4.2 Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen 90
3.4.3 Integration und Test des Mechatronischen Regelsystems 93
3.4.4 Integration und Test des Teilsystems Mensch-Maschine Schnittstelle 97
3.4.5 Integration und Test von Fahrerassistenzsystemen 101

4 Analyse des Standes der Technik 105
4.1 Heutiges Vorgehen im Test der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen 107
4.2 Heutiger Einsatz von Fahrsimulatoren in industriellen Entwicklungsprozessen 115
4.3 Potentiale eines Testverfahrens für den früheren Test der Beherrschbarkeit 119
4.4 Ableitung der Forschungsfragen und Eingliederung in die Arbeit 125

5 Neues Testverfahren zum frühen Beherrschbarkeits-Test von Fahrerassistenzsystemen 127
5.1 Ansätze des frühen Fahrsimulator-basierten Tests 129
5.2 Analyse des Hybrid Prototyping Ansatzes zum frühen Test einer Mensch-Maschine-Interaktion mit gekoppelten Prototypen 136
5.3 Konzeption eines neuen Testverfahrens für den frühzeitigen Beherrschbarkeits-Test 142
5.4 Zielorientierte Ausgestaltung der Testumgebung Fahrsimulator 146
5.5 Analyse des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens und Synthese zur ersten Forschungshypothese 155

6 Methodik für den frühen Test der Beherrschbarkeit im Fahrerassistenzsystem Entwicklungsprozess 161
6.1 Ansätze der Umsetzung einer Methodik in der mechatronischen Systementwicklung 164
6.2 HPBench für den Aufbau und Test hybrider Fahrerassistenzsystem-Prototypen 166
6.3 Hybrid-Prototype-in-the-Loop Prozess und Methoden zum Einsatz der HPBench im Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess 172
6.4 Analyse der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik und Synthese zur zweiten Forschungshypothese 180

7 Evaluation der Forschungshypothesen 183
7.1 Definition des Anwendungsfalles und Erstellung des Prüfkonzepts 187
7.1.1 Anwendungsfall der Evaluation 187
7.1.2 Entwicklungsprojekt zur Bereitstellung des Bicycle Collision Avoidance Systems (BCAS) 190
7.1.3 Erstellung der Prüfspezifikation 195
7.1.4 Bestands-Infrastruktur in der Evaluation 197
7.2 Aufbau der HPBench und des Fahrsimulators 198
7.2.1 Prozessschritt HPBench Planung 199
7.2.2 Prozessschritt HPBench Spezifikation 211
7.3 Evaluation der Beherrschbarkeit des hybriden FAS Prototyps durch dessen Entwicklungsteam 214
7.3.1 Versuchsdesign der 1. Evaluationsstudie 214
7.3.2 Versuchsdurchführung der 1. Evaluationsstudie 227
7.3.3 Auswertung der 1. Evaluationsstudie 235
7.4 Aufbau des hybriden FAS Prototyps und Test der Beherrschbarkeit mit naiven Probanden 244
7.4.1 Versuchsdesign der 2. Evaluationsstudie 244
7.4.2 Versuchsdurchführung der 2. Evaluationsstudie 248
7.4.3 Auswertung der 2. Evaluationsstudie 253
7.5 Beherrschbarkeits-Test zukünftiger, hochautonomer Fahrerassistenzsysteme 261
7.6 Übertragbarkeit der HPiL Methodik in alternative Testumgebungen 268
7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Evaluation 271

8 Fazit und Ausblick 277
8.1 Fazit 277
8.2 Ausblick 280

Literaturverzeichnis XXVII

Anhang LI
Anhang A Detaillierte Beschreibung der Testverfahren des Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozesses LI
Anhang B Befragung „Fahrsimulatoren zur Absicherung im automobilen Produktentwicklungsprozess“ LVIII
Anhang C Gestaltungsparameter für Fahrsimulatoren LXI
Anhang D Prozesse, Methoden und Werkzeuge der HPiL Methodik LXIX
Anhang E Erste Evaluationsstudie LXXII
Anhang F Zweite Evaluationsstudie LXXVII
Anhang G Beherrschbarkeits-Test zukünftiger Fahrerassistenzsysteme und Übertragbarkeit der HPiL Methodik LXXXII
Anhang H Relevante Vorveröffentlichungen LXXXIII

Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Beschreibung
ABS	Antiblockiersystem
ACOSAR	Advanced Co-Simulation Open System ARchitecture Projekt
ADAS	Advanced Driver Assistent System
ADFC	Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club e. V.
AGT	Aggregateträger
AP	Anzeigen-Prototyping
AR	Augmented Reality
AUTOSAR	AUTomotive Open System Architecture
BCAS	Bicycle Collision Avoidance System
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAN-Bus	Controller Area Network Bussystem
CASE	Computer Aided Software Engineering
Car2Car	System zur Datenaustausch zwischen Fahrzeugen
Car2Infrastructure	System zur Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Infrastruktur
Car2X	System zum Datenaustausch von Fahrzeugen untereinander und mit der Infrastruktur
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computerized Numerical Control
DCTC	Digital Cube Test Center
DiL	Driver-in-the-Loop
DLR	Deutsches Institutes für Luft- und Raumfahrt
DMU	Digital MockUp
DOF	Degree of Freedom (Freiheitsgrad)
DRM	Design Research Methodology
E/E	Elektrik/Elektronik
EOP	End of Production
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem / Fahrerassistenzsysteme
FDS	Functional Drive Simulator

Begriff	Beschreibung
FDMU	Functional Digital MockUp
FiL	Function-in-the-Loop
FMI	Functional Mock-Up Interface
FMU	Functional Mock-Up Unit
FS	Fahrsimulator
HAP	Haptisches System (des Fahrsimulators)
HiL	Hardware-in-the-Loop
HitL	Human-in-the-Loop
HPiL	Hybrid-Prototype-in-the-Loop
HMD	Head Mounted Display
HMI	Human Machine Interface (auch: →MMS)
HUD	Head Up Display
HW	Hardware
INCOSE	International Council on Systems Engineering
ISO	International Organisation for Standardisation
IT	Informationstechnik
ITSQB	International Software Testing Qualifications Board
KBE	Knowledge Based Engineering
KE	Konzeptentscheid
KFZ	Kraftfahrzeug
KS	Konzeptsimulation
HW	Hardware
LED	Light-Emitting Diode (Leuchtdiode)
LKAS	Lane Keeping Assistance System
LKW	Lastkraftwagen
MBSE	Model Based Systems Engineering
MDS	Minimum Drive Simulator
MiL	Model-in-the-Loop
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle (auch: → HMI)
MVP	Minimum Viable Product
MVPE	Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklungs-Modell

Begriff	Beschreibung
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
PEP	Produktentstehungsprozess
PK	Produktkonzept
PKW	Personenkraftwagen
PMU	Physical MockUp
PVS	Produktionsvorbereitungsserie
RCP	Rapid Control Prototyping
RP	Rapid Prototyping
SAE	Society of Automotive Engineers
SiL	Software-in-the-Loop
SOP	Start of Production
SV	Stereoskopische Visualisierung
SysML	Systems Modeling Language
SW	Software
TLX	Task Load Index
TOTE	Test Operate Test Exit
UDP	User Datagram Protocol
UML	Unified Modeling Language
UX	User Experience
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VFF	Vorserien-Freigabe-Fahrzeuge
ViL	Vehicle-in-the-Loop
VR	Virtual Reality
XiL	X-in-the-Loop
XT	eXtreme Tailoring
0S	Nullserie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen der Arbeit 4
Abbildung 2: Verortung des Kapitels „2. Grundlagen“ in der Arbeit 7
Abbildung 3: System und dessen Charakteristika (nach VDI 3633, S. 1) 7
Abbildung 4: Zusammenhänge der Grundbegriffe Prozess, Methode und Artefakt im Verständnis der Arbeit (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 147) 9
Abbildung 5: TOTE-Modell (Lindemann 2009, S. 40) 10
Abbildung 6: Zusammenhang der Begriffe Methodik, Modell, Werkzeug, Methode und Test (nach Klein 2016, S. 14; Lütze 2014, S. 55) 15
Abbildung 7: Grundstruktur eines mechatronischen Systems, Regelung und Regelkreis (VDI 2206, S. 14, IEC 2014) 16
Abbildung 8: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt (Kraft 2011, S. 8) 17
Abbildung 9: Modell des menschlichen Informationsbearbeiters im Fahrzeug (Bubb 2015, S. 69) 18
Abbildung 10: Mensch-Maschine Interaktion zwischen Anzeige, Fahrer und Bedienelement (nach Winner et al. 2012, S. 35) 20
Abbildung 11: Verortung des Kapitels „3. Stand der Technik“ in der Arbeit 25
Abbildung 12: Allgemeine Systemdarstellung von Fahrerassistenzsystemen 30
Abbildung 13: Aufbau des FAS Subsystems „Steuerung“ 31
Abbildung 14: Aufbau des FAS Subsystems „Sensor“ 33
Abbildung 15: Aufbau des FAS Subsystems „Aktor“ 33
Abbildung 16: Aufbau des FAS Subsystems „Car2X- Kommunikation“ 34
Abbildung 17: Aufbau des FAS Subsystems „Anzeige“ 36
Abbildung 18: Aufbau des FAS Subsystems „Bedienelement“ 38
Abbildung 19: Exemplarische Sensor-Fusions-Architektur mit zentralisiertem Sensor-Steuergerät (nach Maurer und Stiller 2005, S. 12, 2005, S. 45) 41
Abbildung 20: Technologieinnovationen in der Gestaltung neuartiger Mensch-Maschine Schnittstellen (Bildquellen: Von links nach rechts - Diedrichs 2017; Automotive Technology 2017; Strickland 2017; Hampel 2016, S. 51; Atmel Cooperation 2014, S. 59) 43
Abbildung 21: Technische Systemdarstellung von Fahrerassistenzsystemen 44
Abbildung 22: Exemplarische Systemdarstellung eines FAS mit multiplen Teilsystemen: VW Parklenkassistenzsystem (nach Bubb 2015, S. 551ff; Volkswagen Service 2002) 45
Abbildung 23: Exemplarischer Aufbau eines FAS: VW Parklenkassistenzsystem (nach Volkswagen Service 2002; Bildquellen: Ebay 2019) 47
Abbildung 24: Die zwei Regelkreise der Fahrerassistenzsystem-Interaktion 49
Abbildung 25: Verständnis des allgemeinen Produktentwicklungsprozesses im Rahmen der Arbeit (PEP aus Stark et al. 2011, S. 21) 50
Abbildung 26: Verortung des automobilen Produktentwicklungsprozesses und dessen wichtigsten Meilensteine im allgemeinen Produktentwicklungsprozess (nach Kleinhans et al. 2015, S. 13; Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff) 52

Abbildung 27: Der automobile Produktentwicklungsprozess mit typischen Meilensteinen und Prozessschritten (nach Rudert und Trumpfheller 2015; Rude und Nalbant 2017; Bender 2005; Kleinhans et al. 2015; Schmitt 2015) 54
Abbildung 28: Makrozyklus des V-Modells nach VDI 2006 und inkrementelles Vorgehen mit zunehmender Produktreife (nach VDI 2206, S. 29–31) 55
Abbildung 29: MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin (Buchholz et al. 2018b, S. 125) 58
Abbildung 30: Prozessschritte und Aktivitäten im Testprozess (nach Zander-Nowicka 2008, S. 22ff; Weit e.V. 2017, S. 322–335) 60
Abbildung 31: Verortung des Testprozesses, dessen Artefakte und dessen Rollen im MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin 63
Abbildung 32: Virtuelle Geometrieanalyse mit dem anthropometrischen, virtuellen Mensch-Modell (Grohmann et al. 2017, S. 43) 65
Abbildung 33: Geometrieanalyse zum Test der anthropometrischen und ergonomischen Gestaltung – (Links) in der Virtual Reality (Bubb 2015, S. 593), (Rechts) in der Rapid-Prototyping Sitzkiste (Bubb 2015, S. 590), 66
Abbildung 34: (Links) 3D E-CAD-Modell eines Bordnetzes (Braess und Seiffert 2012, S. 676), (Rechts) Test-Board für den Elektriktest (Braess und Seiffert 2012, S. 663) 66
Abbildung 35: (Links) Regler einer Steuerung, modelliert in Simulink (MATLAB Answers 2014), (Rechts) Signalwandlung von zwei Sensor-Rohsignalen in Dymola (Engel et al. 2017, S. 21) 68
Abbildung 36: Open und Closed / X-in-the-Loop Tests an ausführbaren Systemen (nach Krasnogolowy 2009, S. 4) 69
Abbildung 37: Hardware-in-the-Loop Prüfstand zum Test von Radar-Sensorik (dSPACE 2019) 71
Abbildung 38: Exemplarische Fahrsimulations-Szene und Sensorsimulation mit geometrischen Modellen 72
Abbildung 39: (Links) Reflexionspunkte in einem Radarsensor-Modell (dSPACE 2018b), (Rechts) CFD-Modell eines akustischen Feldes (Kaltenbacher 2015, S. 517) 73
Abbildung 40: (Links) Basis-Fahrsimulator auf Basis von Consumer-Geräten (Reich 2017, S. 110), (Rechts) Komplexer Functional Drive Fahrsimulator 74
Abbildung 41: Vergleich der Soll- und Ist-Konfiguration eines Fahrsimulators zum Test eines Geschwindigkeitsreglers (Fischer et al. 2015, S. 144) 75
Abbildung 42: (Links) Inspektion eines Paper Prototypen (Buxton 2011, S. 372), (Rechts) Wizard-of-Oz Testfahrzeug für die Mensch-Maschine Konzeptsimulation (Meier-Arendt 2019, S. 43) 80

Abbildung 43: (Mitte) Kombiinstrument „Virtual Cockpit“ (Audi Online Konfigurator 2017), Im AP Tool modellierte digitale Anzeigeinhalte, wiedergegeben auf einem konventionellen Bildschirm (Links) und einer Virtual Reality Umgebung (Rechts) 80
Abbildung 44: (Links) Prototyp des mechatronischen Regelsystems im Testfahrzeug (Spinnarke 2017), (Mitte) Prototypische MMS im Test (Schmidt et al. 2016, S. 34), (Rechts) Feldtest eines Notbremsassistenzsystems (Bubb 2015, S. 612) 82
Abbildung 45: Exemplarische Darstellung der Entwicklungs- und Testaktivitäten am VW Einpark-FAS (nach Volkswagen Service 2002; Bildquellen: Ebay 2019) 84
Abbildung 46: Entwicklungs- und Testaktivitäten der FAS Entwicklung im automobilen Produktentwicklungsprozess 85
Abbildung 47: (Links) Inkrementelles Vorgehen zur Beschreibung der Schritte des Tests von Software (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 30), (Rechts) Abgeleitetes V-Modell zur Beschreibung der Schritte des Tests von Software 86
Abbildung 48: Das V-Modell zur Entwicklung von elektronischen Systemen und Software im Fahrzeug (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 23) 87
Abbildung 49: Der automobile Produktentwicklungsprozess und der FAS Entwicklungsprozess im MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin 88
Abbildung 50: Detaillierte Darstellung des FAS Entwicklungsprozesses im MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin 89
Abbildung 51: Verortung des Teilsystems *Mechatronisches Regelsystem* im FAS Systemschaubild sowie dessen Integration und Test im FAS Entwicklungsprozess 93
Abbildung 52: Test des mechatronischen Regelsystems und dessen Interaktionen im Regelkreis der Mechatronik 97
Abbildung 53: Verortung des Teilsystems *Mensch-Maschine Schnittstelle* im FAS Systemschaubild so-wie dessen Integration und Test im FAS Entwicklungsprozess 97
Abbildung 54: Test der Mensch-Maschine Schnittstelle und deren Interaktionen im Regelkreis der Fahrer-FAS Interaktion 101
Abbildung 55: Verortung des Fahrerassistenzsystems im FAS Systemschaubild sowie dessen Integration und Test im FAS Entwicklungsprozess 101
Abbildung 56: Integrierter Test des FAS und dessen Interaktionen im mechatronischen Regelkreis sowie dem Regelkreis der Fahrer-FAS-Interaktion 103
Abbildung 57: Verortung des Kapitels „4. Analyse des Standes der Technik“ in der Arbeit 107
Abbildung 58: Schätzung des Testaufwands für verschiedene Automatisierungsstufen und Fahrszenarien (Schuldt et al. 2014, S. 170) 109
Abbildung 59: Verortung der heutigen Tests zum Nachweis der Beherrschbarkeit im FAS Entwicklungsprozess 110

Abbildung 60: Test der Beherrschbarkeit am Beispiel des VW Einpark-Parkassistenzsystems (zusammengestellt aus den Abbildungen 37, 42, 44 und 45) 111
Abbildung 61: Ergebnis Expertenbefragung - Heutiger und sinnvoller (zukünftiger) Einsatz von Fahrsimulatoren in der Absicherung 117
Abbildung 62: Ergebnis Expertenbefragung – Akzeptable Änderungszeiten im Umbau einer Hard- und Software-Konfiguration auf eine Andere 118
Abbildung 63: Verortung des Beherrschbarkeits-Tests mit dem frühesten domänenbasierten FAS Prototyp im FAS Entwicklungsprozess (auf Systemebene) 120
Abbildung 64: Verortung des Potentials des Beherrschbarkeits-Tests mit dem frühesten domänenbasierten FAS Prototyp im automobilen Produktentwicklungsprozess 121
Abbildung 65: Verortung des Beherrschbarkeits-Tests vor der Domänen-Entwicklung im modifizierten FAS Entwicklungsprozess (Systemebene) 124
Abbildung 66: Verortung des Potentials des Beherrschbarkeits-Tests eines FAS vor der Domänenentwicklung im automobilen Produktentwicklungsprozess 124
Abbildung 67: Vorgehen im Rahmen der Arbeit zur Beantwortung der Forschungsfragen F I. und F II. 125
Abbildung 68: Verortung des Kapitels „5. Neues Testverfahren zum frühen Beherrschbarkeits-Tests von Fahrerassistenzsystemen“ in der Arbeit 129
Abbildung 69: Zusammenspiel zwischen FAS Prototyp, Fahrer und Fahrsimulator im Fahrsimulator-basierten Testverfahren 130
Abbildung 70: Systemarchitektur zum Test des in MATLAB/Simulink modellierten Stauassistenten (nach Auricht 2018) 130
Abbildung 71: Systemarchitektur zum Test des in MATLAB/Simulink modellierten Querführungsassistenten (nach Hiesgen 2012) 132
Abbildung 72: Systemarchitektur der Testumgebung zum Test eines in SysML modellierten Tempomaten (nach Düser 2010) 132
Abbildung 73: Systemarchitektur zum Test von in MATLAB/Simulink modellierten FAS (nach Bauer et al. 2015, S. 115) 133
Abbildung 74: Systemaufbau des Fahrsimulator-basierten Tests von FAS 134
Abbildung 75: (Links) Hybrides Mobiltelefon (nach Bruno et al. 2011, S. 111), (Rechts) Montagesimulation mit der Haptic Workstation (nach Ott et al. 2007, S. 845) 137
Abbildung 76: Montagesimulation mit Haptik Zelle (nach Akrap 2016, S. 30; Buchholz et al. 2017a, S. 551) 137
Abbildung 77: (Links) Hybrider Prototyp Waschmaschine (nach Barbieri et al. 2013, S. 314), (Rechts) Hybrider Prototyp Waschmaschine (nach Bordegoni et al. 2009, S. 184) 138
Abbildung 78: (Links) Hybrides Tailgate Device im Testfall Dämpfer-Kennfeld (nach Auricht et al. 2012b), (Rechts) im Testfall ATG Prototyp (nach Buchholz et al. 2018b) 139

Abbildung 79: Mechatronisches Regelsystem, zusammengesetzt nach den Ansätzen des Hybrid Prototyping 140
Abbildung 80: Systemarchitektur zur Evaluation der Nutzbarkeit im AP Prototypen erstellten digitalen Anzeigeinhalte im Test von FAS – (Links) Mittelkonsole, (Rechts) Head-Up Display (nach Buchholz et. al. 2017b). 143
Abbildung 81: Zusammenspiel der Lösungselemente des Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Testverfahrens für den frühen Beherrschbarkeits-Test 144
Abbildung 82: Systemarchitektur des hybriden FAS Prototyps zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit im Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren 145
Abbildung 83: Gestaltungsparameter-Konfiguration eines Fahrsimulators für den Test von FAS (nach Hartfiel et al. 2018, S. 664) 149
Abbildung 84: Gestaltungsparameter-Konfiguration des Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit 151
Abbildung 85: Technische Gestaltungsparameter-Konfiguration des Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit 153
Abbildung 86: Systemaufbau des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens für den frühen Beherrschbarkeits-Test von FAS 155
Abbildung 87: Möglicher Aufbau eines hybriden FAS Prototyps zum Test des VW Parklenkassistenzsystems (Bildquellen: IPG Automotive GmbH 2018b; Arduino Project 2018; Seiffert und Rainer 2008, S. 64) 157
Abbildung 88: Verschiedene Ausprägungen der Struktur des hybriden FAS Prototyps zur Abbildung von Trends der Gestaltung von FAS 158
Abbildung 89: Hybrider FAS Prototyp und dessen Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test für den frühzeitigen, umfassenden Test der Beherrschbarkeit des FAS 160
Abbildung 90: Verortung des Kapitels „6. Methodik des frühen Tests der Beherrschbarkeit im Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen“ in der Arbeit 163
Abbildung 91: HPiL Methodik, Prozess, Methoden und HPBench Werkzeuge für den Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test von Fahrerassistenzsystemen 164
Abbildung 92: Konfiguration des vorgeplanten, generischen HPBench Frameworks (Links) zum hybriden FAS Prototyp für den frühen Beherrschbarkeits-Test (Rechts) 166
Abbildung 93: Instanziierung zur Umsetzung von HPBench Templates für die Unterstützung des Aufbaus von Prototypen im CASE- und im AP-Tool 167
Abbildung 94: Aggregation zur Umsetzung des HPBench Baukastens für die Unterstützung des Aufbaus von Anzeige- und Bedienelement-Prototypen 168
Abbildung 95: HPBench Operator Panel zur Unterstützung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests 169
Abbildung 96: Systemarchitektur der HPBench 170

Abbildung 97: Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Prozess 172
Abbildung 98: Verortung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Testverfahrens, dessen Artefakte und dessen Rollen im FAS Entwicklungsprozess 174
Abbildung 99: Erster Prozessteil „Aufbau HPBench“, Rollen und Eingangs-/Ausgangsartefakte 175
Abbildung 100: Template-basierte Integration in der Teilsystem-Entwicklung des mechatronischen Regelsystems, Eingangs-/ Ausgangsartefakte und Rollen 176
Abbildung 101: Template-basierte Integration in der Teilsystem-Entwicklung der MMS, Eingangs-/Ausgangsartefakte und Rollen 177
Abbildung 102: Zweiter Prozessteil „Aufbau des hybriden FAS Prototyps“, Rollen und Eingangs-/ Ausgangsartefakte 178
Abbildung 103: Dritter Prozessteil „HPiL Test des hybriden FAS Prototyps“, Rollen und Eingangs-/ Ausgangsartefakte 179
Abbildung 104: Verortung des Kapitels „7. Evaluation der Forschungshypothesen“ in der Arbeit 185
Abbildung 105: Statistik der Unfallurachsen von PKW gegenüber Radfahrern in Berlin 2011 bis 2016 (ADFC Berlin 2017) 188
Abbildung 106: Systemarchitektur des BCAS (nach Grohmann et al. 2017, S. 17) 191
Abbildung 107: Sequenzdiagramm zur Darstellung der dynamischen Funktionsweise des BCAS 192
Abbildung 108: 3D CAD Modelle der MMS der drei Projektteams (Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017) 193
Abbildung 109: 3D CAD Modell und Dymola-Prototypen des mechatronischen Regelsystems (nach Grohmann et al. 2017) 194
Abbildung 110: Bestehender Functional Drive Simulator für die Evaluation 197
Abbildung 111: (Links) Setup des Functional Drive Simulators in der Vier-Seiten Visualisierung, (Rechts) Visualisierung der Front-Sicht mit dSpace ASM und Unity3D 198
Abbildung 112: Verortung der Prozessschritte HPBench Planung und HPBench Spezifikation im FAS Entwicklungsprozess 199
Abbildung 113: Bewertung der Gestaltungsparameter des Functional Drive des Fahrsimulators mit dSpace ASM Visualisierung zur Nutzbarkeit im HPiL Test 201
Abbildung 114: Bewertung der Gestaltungsparameter des Functional Drive des Fahrsimulators mit Unity3D Visualisierung zur Nutzbarkeit im HPiL Test 201
Abbildung 115: Spezifische Systemarchitektur der HPBench für den frühen Beherrschbarkeits-Test des BCAS 210
Abbildung 116: HPBench Template in Processing 211
Abbildung 117: HPBench Template in Dymola 211
Abbildung 118: HPBench Baukasten-Elemente und exemplarische Integration in den Functional Drive Simulator (Bildquellen: DELTA COMPONENTS GmbH 2018; Conrad Electronic SE 2018; Audeme LLC 2016; SparkFun Electronics 2018) 212

Abbildung 119: (Links) Integration der Hardware-Elemente und (Rechts) Software-Elemente des HPBench Baukastens in den Functional Drive Simulator 213
Abbildung 120: Prozessteile „Aufbau des hybriden FAS Prototyps“ und „Test des hybriden FAS Prototyps“ im ersten Evaluationstest 214
Abbildung 121: Layout des Digital Cube Test Centers für die Evaluation 223
Abbildung 122: Setup und Rollen zur Testdurchführung des HPiL Tests 224
Abbildung 123: Setup und Rollen zur Testdurchführung des MiL Tests 225
Abbildung 124: Testsetup zur Testdurchführung des KS Tests 226
Abbildung 125: Testszenarien der ersten Evaluationsstudie 227
Abbildung 126: MMS Lösungselemente und Systemarchitektur des hybriden BCAS Prototyps des Projektteams 1 228
Abbildung 127: MMS Lösungselemente und Systemarchitektur des hybriden BCAS Prototyps der Projektteams 2 (oben) und Projektteams 3 (unten) 229
Abbildung 128: Dauer der Testdurchführung MiL, KS und HPiL Tests 237
Abbildung 129: Beurteilung der Anwendbarkeit der HPBench Werkzeuge für die Aufgaben des Aufbaus, der Integration und des Tests des Mechatronischen Regelsystems 239
Abbildung 130: Beurteilung der Anwendbarkeit der HPBench Werkzeuge für die Aufgaben des Aufbaus, der Integration und des Tests der Mensch-Maschine Schnittstelle 240
Abbildung 131: Beurteilung der wahrgenommenen Nutzbarkeit im Vergleich zwischen MiL und HPiL sowie KS und HPiL Test durch die Prüfer 241
Abbildung 132: Beurteilung der wahrgenommenen Nützlichkeit im Vergleich des MiL und HPiL sowie KS und HPiL Tests durch die Prüfer 241
Abbildung 133: Beurteilung der Beanspruchungshöhe im Vergleich des MiL und HPiL Tests durch die Prüfer (nach Buchholz und Stark 2017, S. 78) 242
Abbildung 134: Beurteilung der Beanspruchungshöhe im Vergleich des KS und HPiL Tests durch die Prüfer (nach Buchholz und Stark 2017, S. 78) 242
Abbildung 135: Prozessteil „Test des hybriden FAS Prototyps“ zur Durchführung der zweiten Evaluationsstudie 244
Abbildung 136: Testszenarien der zweiten Evaluationsstudie 249
Abbildung 137: (Links) Hybrider BCAS Prototyp mit dSpace Visualisierung, (Rechts) Hybrider BCAS Prototyp mit Unity3D Visualisierung 250
Abbildung 138: Durchschnittliche Bewertung der Beherrschbarkeits-Kriterien durch die Anwender in der 2. Evaluationsstudie 252
Abbildung 139: Exemplarische Testdaten des HPiL Tests (dSpace ASM) - BCAS Modus 2 254
Abbildung 140: Exemplarische Testdaten des HPiL Tests (Unity3D) - BCAS Modus 2 255
Abbildung 141: Exemplarische Testdaten des HPiL Tests (dSpace) - BCAS Modus 1 255

Abbildung 142: Beurteilung der Beanspruchungshöhe in der 2. Evaluationsstudie 257
Abbildung 143: Bewertung des Produkterlebnisses durch die Anwender in der 2. Evaluationsstudie 258
Abbildung 144: Bewertung der Anwender zum Vergleich der Testverfahren 259
Abbildung 145: Teilsystem-Prototypen des LKAS – (Links) Prototyp des mechatronischen Regelsystems, (Rechts) Prototyp des Touchscreens des LKAS 262
Abbildung 146: Erweiterter hybrider BCAS/LKAS Prototyp 264
Abbildung 147: Exemplarischer Vergleich der Varianten des BCAS im Testszenario 2 (links abbiegen) – (Links) Version A, (Rechts) Version B 265
Abbildung 148: Vergleich der BCAS Varianten A und B durch die Anwender 266
Abbildung 149: Exemplarischer Vergleich der Interaktion im Testszenario 4 (PKW kreuzt längs) – (Links) Single-FAS, (Rechts) Multi-FAS Konfiguration 266
Abbildung 150: Bewertung der Beherrschbarkeit und des durch den Fahrer wahrgenommenen Stress im Vergleich der Single-FAS und Multi-FAS Konfiguration 267
Abbildung 151: Minimum Drive Simulator für die Evaluation 268
Abbildung 152: Bewertung der Gestaltungsparameter des Minimum Drive Fahrsimulators zur Nutzbarkeit im HPiL Test 269
Abbildung 153: MMS Lösungselemente und Systemarchitektur des hybriden BCAS Prototyps, eingebunden im Minimum Drive Simulator 270
Abbildung 154: Verortung des Kapitels „8. Fazit und Ausblick“ in der Arbeit 277
Abbildung 155: Frontloading-Potential des Einsatzes der HPiL Methodik für den frühzeitigen Beherrschbarkeits-Test im automobilen Produktentwicklungsprozess 279
Abbildung 156: Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test der Beherrschbarkeit vor der Domänen-Entwicklung im erweiterten FAS Entwicklungsprozess 282
Abbildung 157: Frontloading-Potential des Einsatzes der HPiL Methodik für den Beherrschbarkeits-Test vor der Domänen-Entwicklung im automobilen Produktentwicklungsprozess 283
Abbildung 158: Hybrider Montage-Prototyp zur Montage eines Instrumententafel-Verkleidungsteils in Mensch-Roboter Kollaboration (nach Buchholz et al. 2018a, S. 245) 284

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modell-Verifikation/Validierung versus modellbasierte Verifikation/Validierung (Rabe et al. 2008, S. 14–15; Balci 1998, S. 336; Haubelt und Teich 2010, S. 10ff) 13
Tabelle 2: Level der Automatisierung von Fahrerassistenzsystemen (nach SAE J3016) 27
Tabelle 3: Übersicht über heutige FAS aus der Recherche 28
Tabelle 4: Sensoren heutiger Fahrerassistenzsysteme 32
Tabelle 5: Anzeigen heutiger Fahrerassistenzsysteme 36
Tabelle 6: Bedienelemente heutiger Fahrerassistenzsysteme 39
Tabelle 7: Bestandteile der Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software von FAS Subsystemen 46
Tabelle 8: XiL Testverfahren der FAS Entwicklung 76
Tabelle 9: Klassen der Beherrschbarkeit (nach ISO 26262-3, S. 10; Weitzel und Winner 2012, S. 4) 91
Tabelle 10: Kriterien-Gruppen des Fragenkatalogs Beherrschbarkeit von FAS (nach Response Consortium 2009, A24-A40) 92
Tabelle 11: Modelle, Prototypen und Testverfahren im Test des mechatronischen Regelsystems 96
Tabelle 12: Modelle, Prototypen und Testverfahren im Test der Mensch-Maschine Schnittstelle 100
Tabelle 13: Modelle, Prototypen und Testverfahren im Test des Fahrerassistenzsystems 103
Tabelle 14: Charakterisierung der an der Befragung teilnehmenden Probanden 115
Tabelle 15: Gründe für den Nicht-Einsatz von Fahrsimulatoren in frühen Entwicklungsphasen des automobilen Produktentwicklungsprozesses 117
Tabelle 16: Anforderungen an Fahrsimulatoren für Test von FAS (Hartfiel et al. 2018, S. 663) 146
Tabelle 17: Techniken der Standardisierung und Wiederverwendung (nach Königs 2013, S. 99–100) 165
Tabelle 18: Kategorisierung des zu entwickelnden BCAS im Anwendungsfall 190
Tabelle 19: MMS Lösungselemente der drei Projektteams 193
Tabelle 20: Beherrschbarkeits-Kriterien der Evaluation (nach Tabelle 10) 196
Tabelle 21: Detaillierte Bewertung der Gestaltungsparameter der drei Bewegungssystem-Konfigurationen des Functional Drive Simulators 202
Tabelle 22: Detaillierte Bewertung der Gestaltungsparameter der zwei Visualisierungs-Konfigurationen des Functional Drive Simulators 204
Tabelle 23: Zusammenfassung der Bewertung und Anwendungsfall-spezifische Einschränkungen zur Nutzung des FDS im Anwendungsfall 208
Tabelle 24: Charakterisierung der Probanden der 1. Evaluationsstudie 215
Tabelle 25: Gruppierung zur Klassifizierung der Beherrschbarkeits-Kriterien der Prüfspezifikation 217
Tabelle 26: Gruppe 1 – Beherrschbarkeits-Kriterien, testbar im MiL und HPiL Test 217

Tabelle 27: Gruppe 2 – Beherrschbarkeits-Kriterium, testbar im KS und HPiL Test 218
Tabelle 28: Gruppe 3 – Beherrschbarkeits-Kriterium, testbar nur im HPiL Test 218
Tabelle 29: Versuchsdesign der 1. Evaluationsstudie 219
Tabelle 30: Messmethoden und -werkzeuge zur Evaluation der Anforderungserfüllung in der 1. Evaluationsstudie 221
Tabelle 31: Dreistufiges Testvorgehen der Entwicklungsteams in der ersten Evaluationsstudie 230
Tabelle 32: Zuordnung Testmethoden, Testziele und Werkzeuge im Test des hybriden BCAS Prototyps im Beherrschbarkeits-Test durch dessen Entwicklungsteams (Gruppe 1 und 2) 230
Tabelle 33: Nachweis der Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppen 1 und 2 durch die Projektteams (nach Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017) 232
Tabelle 34: Nachweis der Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 3 durch die Projektteams (nach Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017). 233
Tabelle 35: Versuchsdesign der 2. Evaluationsstudie 246
Tabelle 36: Messmethoden und -werkzeuge zur Evaluation der Anforderungserfüllung in der 2. Evaluationsstudie 247
Tabelle 37: In der 2. Evaluationsstudie nachgewiesene Beherrschbarkeits-Kriterien des BCAS 253
Tabelle 38: Kategorisierung des BCAS und des LKAS im Anwendungsfall 261
Tabelle 39: Versuchsdesign „BCAS Varianten“ 263
Tabelle 40: Versuchsdesign „Multi-FAS Interaktion“ 264
Tabelle 41: Bewertung des erfolgreichen Belegs der Anforderungen an HPiL Test und HPiL Methodik in der Evaluation 272

Kapitel 1

Einleitung

And as he walked off with long strides, he said petulantly to the robot: "Why can't they program you to use a car so that I wouldn't have to walk?" He knew very well why that wasn't done. Any accident involving a robot-driven car would set off another antirobot riot.

"The Robots of Dawn" (Asimov 1983)

1 Einleitung

Bereits im Jahr 1983 thematisierte der Science-Fiction-Autor Isaac Asimov in seinem Werk „The Robots of Dawn“ die Möglichkeit des autonomen, durch Maschinen gesteuerten Fahrens. Er postuliert, dass Erfolg und Akzeptanz autonomer Fahrzeuge maßgeblich von der Wahrnehmung und Akzeptanz durch die Menschen abhängen wird, die diese neue Technologie anwenden und mit ihr interagieren sollen[1].

Obwohl die Umsetzung des vollständig autonom fahrenden, im Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeugs auch heute noch in der Zukunft liegt, werden autonome Fahrfunktionen bereits vielfältig eingesetzt: Sogenannte Fahrerassistenzsysteme (FAS) unterstützen den Benutzer bei bestimmten Teilen der Fahrzeugführungsaufgabe und übernehmen Aufgaben der Richtungs- oder Geschwindigkeitssteuerung in klar definierten Anwendungsfällen (Winner et al. 2012, S. 55; SAE J3016). Dabei sind die Benutzer heutiger FAS verpflichtet, diese permanent zu überwachen, um im Falle eines Funktionsfehlers jederzeit in der Lage zu sein, die vollständige Kontrolle über das Fahrzeug wieder übernehmen zu können (SAE J3016). Der zunehmende Einsatz von FAS hat in den vergangenen Jahrzehnten mit dazu beigetragen, die Verkehrsopferzahlen erheblich zu senken (Matawa und Vaculín 2016, S. 21). So verringerte sich die Anzahl an Unfällen mit Personenschäden während des Zeitraumes von 1991 bis 2017 um mehr als 20% auf 302.656 geschädigte Personen. Noch deutlicher fällt der Rückgang der Unfälle mit Todesfolge aus. Hier verzeichnet das Statistische Bundesamt sogar eine Abnahme um fast 72% auf 3.180 Opfer (Statistisches Bundesamt 2018, S. 38). Dabei ist gleichzeitig ein Anstieg des bundesdeutschen Fahrzeugbestandes von etwa 38 Millionen auf etwa 58 Millionen Fahrzeuge zu verzeichnen. Insbesondere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger oder Fahrradfahrer, die strukturell ungeschützt am Straßenverkehr partizipieren, sind besonders gefährdet. Neuartige FAS zum Schutz dieser Verkehrsteilnehmer bieten daher ein besonders hohes Potential für eine weitere Reduktion von Personenschäden (Mingkamp et al. 2017, S. 108). Dementsprechend sind Systeme solcher Art bei Automobilentwicklern und Zulieferern in den Fokus gerückt und die Zahl der am Markt verfügbaren Systeme und ihr Funktionsumfang steigt stetig (Winner et al. 2012, S. 4).

1.1 Motivation

Bei der Entwicklung des FAS müssen mögliche Fehler bei der Spezifikation, Herstellung und Integration dieser Systeme in das Fahrzeug betrachtet werden. Es müssen aber auch vorhersagbare Fehler, die während des Gebrauchs, aber auch möglichen Missbrauchs, durch den Nutzer auftreten können, beachtet werden (Response Consortium 2009). Insbesondere bei Unfällen mit Personenschäden bedarf es heute eines Nachweises der Einhaltung verpflichtender Entwicklungsstandards durch den Hersteller (Altinger et al. 2014, S. 5). Die Einführung hochautonomer FAS wird zu einer signifikanten Erhöhung dieses Nachweisdruckes führen: So werden Hersteller zukünftiger hochautonomer FAS, die in Teilen oder vollständig die Kontrolle über die Fahraufgabe

[1] *„Und als er mit langen Schritten davonlief, sagte er leichtsinnig zu dem Roboter: "Warum können sie dich nicht programmieren ein Auto zu fahren, so dass ich nicht laufen muss?". Er wusste sehr genau, warum das nicht getan wurde: Jeder Unfall eines Roboter-gesteuerten Autos würde zu einem weiteren Anti-Roboter-Aufstand in der Bevölkerung führen.“*

“ Aurora oder der Aufbruch zu den Sternen” (Asimov 1985)

übernehmen, erstmalig für Sach- und Personenschäden haftbar gemacht (Riener 2017, S. 198; Niederée und Vollrath 2005, S. 202).

Das Sicherheitskriterium der **Beherrschbarkeit** eines FAS bezeichnet dessen Fähigkeit, durch rechtzeitige Reaktion Verletzungen oder Schädigungen von den beteiligten Personen abzuwenden (ISO 26262-1, S. 4). Die Beherrschbarkeit bemisst sich an der Möglichkeit und Fähigkeit des Fahrers, die Kritikalität einer Situation unter Zuhilfenahme des FAS wahrzunehmen, sich für eine angemessene Gegenreaktion zu entscheiden und diese mit Hilfe des FAS erfolgreich durchzuführen (Response Consortium 2009, S. 13). Für die Beherrschbarkeit sind sowohl rein technische Fähigkeiten des FAS, wie beispielsweise eine rechtzeitige Bremsung vor Kollision, entscheidend. Darüber hinaus sind aber eben auch das Verständnis des FAS und dessen Systemgrenzen durch den Fahrer, dessen Akzeptanz der Arbeitsweise des FAS oder dessen Vertrauen in Warnungen des Systems wichtig. Die Beherrschbarkeit definiert damit das ganzheitliche Zusammenspiel zwischen dem Fahrer, dem FAS, dem Fahrzeug und der Fahrumgebung, in der die Fahrt stattfindet.

Bereits in den frühen Phasen der Entwicklung eines FAS werden die Grundlagen für dessen Beherrschbarkeit gelegt. Hier werden die einzuhaltenden Sicherheitsanforderungen festgelegt, die Systemreaktion definiert, sowie die Anzeigen und Bedienelemente zur Interaktion mit dem Benutzer konzipiert (ISO 26262-4, S. 4; Response Consortium 2009, S. 18). Bei verhältnismäßig geringen Kosten wirken sich Änderungen in dieser Phase signifikant auf die Kosten des gesamten Entwicklung aus (Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 8–22; Seiffert und Rainer 2008, S. 35). Daher ist ein möglichst frühzeitiger Nachweis der Beherrschbarkeit eines FAS in dessen Entwicklung anzustreben**.** Tests zur Erbringung derartiger Nachweise finden gegenwärtig jedoch erst zu einem späten Zeitpunkt in der Entwicklung statt. So werden FAS, die sowohl mit dem Fahrer interagieren, als auch in die Fahrzeugführung eingreifen, erst kurz vor Produktionsstart in prototypische Fahrzeuge integriert und durch menschliche Fahrer getestet (Hartfiel et al. 2018, S. 660). Änderungen sind zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung in der Regel sehr kosten- und zeitintensiv (Winner et al. 2012, S. 449; Zander-Nowicka 2008, S. 26).

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Für die Umsetzung niedriger Gesamtkosten des zukünftigen FAS Entwicklungsprozesses sowie dessen schnelle und effiziente Durchführung ist ein möglichst früher Test der Beherrschbarkeit des FAS erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher untersucht werden, wie FAS früher als heute üblich im FAS Entwicklungsprozess hinsichtlich ihrer Beherrschbarkeit getestet werden können.

Das Hauptziel der Arbeit ist die Erarbeitung eines neuartigen Testverfahrens, mit der ein Beherrschbarkeits-Test frühzeitig im industriellen FAS Entwicklungsprozess durchgeführt werden kann. Zur Erfüllung dieser Zielsetzung müssen folgende Unterziele erreicht werden:

[1] Der Begriff „Fahrerassistenzsystem“ muss erfasst und die technische Gestaltung derartiger Systeme analysiert werden.

[2] Der Begriff „Beherrschbarkeit“ eines FAS muss erfasst und analysiert werden.

[3] Das heutige Vorgehen zum Test der Beherrschbarkeit eines FAS muss beschrieben werden.

[4] Das heutige Vorgehen muss hinsichtlich der Problemstellung des heutigen, (zu) späten Tests auf Beherrschbarkeit analysiert und die damit einhergehenden Herausforderungen für den heutigen FAS Entwicklungsprozess aufgezeigt werden.
[5] Es müssen Potentiale eines früheren Beherrschbarkeits-Tests aufgezeigt werden.
[6] Es soll ein Testverfahren für den frühen Beherrschbarkeits-Test von FAS entwickelt werden.
[7] Es soll eine Methodik entwickelt werden, die eine Anwendung des entwickelten Testvorgehens im FAS Entwicklungsprozess ermöglicht.
[8] Das Testvorgehen sowie die Methodik zu dessen Anwendung im FAS Entwicklungsprozess müssen evaluiert werden, um so die Erfüllung der gesetzten Ziele zu belegen.

Das Vorgehen, dem in der Arbeit gefolgt wird, ist an dem von Blessing und Chakrabarti vorgeschlagenem Design Research Methodology (DRM) Framework angelehnt (Blessing und Chakrabarti 2009, S. 15):

Nach Beschreibung der zum Verständnis der Thematik notwendigen theoretischen Grundlagen und Begriffe wird im Rahmen des Standes der Technik das technische FAS, dessen industrieller Entwicklungsprozess sowie dessen Test hinsichtlich der Beherrschbarkeit beschrieben.

Es folgt die Analyse des Standes der Technik. In dieser werden die initialen Problemstellungen von Tests der Beherrschbarkeit quantifiziert und die daraus resultierenden Herausforderungen analysiert. Basierend auf dieser Analyse werden Potentiale eines früheren Tests aufgezeigt. Das Kapitel schließt mit der Ausleitung der **Forschungsfragen der Arbeit**.

Darauf folgend wird eine Lösung erarbeitet, bestehend aus einem in Kapitel 5 entwickelten Testverfahren und einer in Kapitel 6 entwickelten Methodik zur Anwendung des Testverfahrens im FAS Entwicklungsprozess. Die Kapitel schließen jeweils mit der Erstellung einer **Forschungshypothese zur Beantwortung der jeweiligen Forschungsfrage der Arbeit**.

Die Evaluation der Forschungshypothesen wird in einem relevanten Anwendungsfall in insgesamt drei Nutzerstudien durchgeführt. Im abschließenden Kapitel 8 erfolgt die Bewertung der Erfüllung der initialen Zielstellung sowie die Ableitung zukünftiger Verbesserungspotentiale. Die nachstehende **Abbildung 1** visualisiert das Vorgehen. Die Referenzierung dieser Abbildung zu Beginn jedes Kapitels bietet einen Leitfaden, mit welchem dem Vorgehen der Arbeit jederzeit gefolgt werden kann.

1. Einleitung & Motivation

Beschreibung der initialen Motivation und Problemstellung. Des Ziels, welches durch die Arbeit erreicht werden soll. Und des Vorgehens zur Erreichung dieses Ziels.

2. Grundlagen

Grundlagen zum Verständnis des Systems „Fahrerassistenzsystem“, dessen Entwicklung und dessen Interaktion mit dem Fahrer.

3. Stand der Technik

Beschreibung des technischen Systems „Fahrerassistenzsystem“ und dessen Interaktion mit Fahrer und Fahrumgebung. Beschreibung der spezifischen Entwicklungs- und Testprozesse für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Beschreibung des spezifischen Testkriteriums der Beherrschbarkeit. Sowie Beschreibung des Vorgehens zur Entwicklung und Test von Fahrerassistenzsystemen im industriellen Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess.

4. Analyse des Standes der Technik

Analyse des Standes der Technik hinsichtlich des Vorgehens zum Test der Beherrschbarkeit. Analyse der Potentiale zukünftiger, frühzeitiger Testverfahren der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen.

Das Kapitel schließt mit der Ausleitung der **Forschungsfragen F I. und F II.**

5. Neues Testverfahren zum frühen Beherrschbarkeits-Tests von Fahrerassistenzsystemen

Erarbeitung eines neuen Testverfahrens zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen.

Das Kapitel schließt mit der Ausleitung der **Forschungshypothese H I. zur Beantwortung der Forschungsfrage F I.**

6. Methodik des frühen Tests der Beherrschbarkeit im Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen

Erarbeitung einer Methodik für den Einsatz des in Kapitel 5 erarbeiteten Testverfahrens im industriellen Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess.

Das Kapitel schließt mit der Ausleitung der **Forschungshypothese H II. zur Beantwortung der Forschungsfrage F II.**

7. Evaluation der Forschungshypothesen

Definition eines relevanten Anwendungsfalles und Evaluation der Forschungshypothesen H I. und H II. im Rahmen von drei Evaluationsstudien.

8. Fazit und Ausblick

Analyse der Ergebnisse der Arbeit in Bezugnahme auf die Erfüllung der initialen Zeile sowie der in Kapitel 4 beschriebenen Potentiale. Beschreibung weiterer Potentiale des Ansatzes und zukünftiger Schritte.

Abbildung 1: Vorgehen Arbeit

Kapitel 2

Grundlagen

Where can you find another non-linear servo-mechanism weighing only 150 pounds, having great adaptability and can be produced so cheaply by completely unskilled labor?

A compact summary why human aircraft pilots are unique (Brady 1954)

2 Grundlagen

Das vorliegende Kapitel zielt darauf ab, eine Einordnung von Fahrerassistenzsystemen sowie deren Entwicklungsprozesse in den Kontext wissenschafts- und systemtheoretischer **Grundlagen** vorzunehmen. Diese Einordnung soll als Grundlage für das Verständnis der Begrifflichkeiten und Konzepte der nachfolgenden Kapitel der Arbeit dienen. **Abbildung 2** zeigt die Verortung des Kapitels in den Kontext der Arbeit.

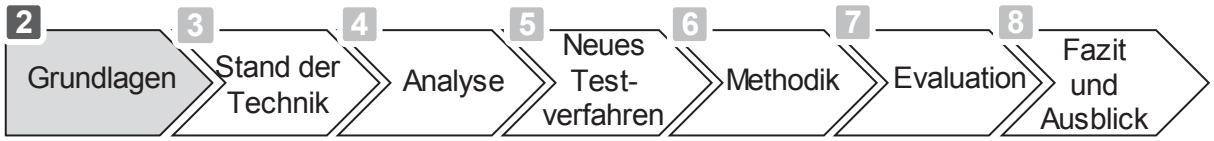


Abbildung 2: Verortung des Kapitels „2. Grundlagen“ in der Arbeit

2.1 Allgemeine Grundlagen

Die im Rahmen dieser Arbeit zu erarbeitenden Lösungen dienen der Unterstützung der Entwicklung des **Systems** „Fahrerassistenzsystem“. Der Begriff „System“ leitet sich aus dem lateinischen systēma, „dem aus mehreren Dingen bestehende Ganzen“ ab (Georges 1910) und beschreibt „eine abgegrenzte Anordnung von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen“ (VDI 3633, S. 19). In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff wie folgt verstanden:

Ein System ist eine „Ansammlung von Elementen, die gemeinsam ein Ziel verfolgen, welches von Einzelelementen nicht erreicht werden kann“ (Eigner et al. 2012, S. 43)

Elemente können Produkte (Hardware, Software oder Firmware), Prozesse, Menschen, Informationen, Techniken, Einrichtungen, Dienstleistungen oder andere unterstützende Einheiten sein (INCOSE 2015, S. 5). **Abbildung 3** zeigt ein System, das durch seine Systemgrenze gegenüber seiner Umwelt abgegrenzt ist. Mittels Schnittstellen tauscht es mit der Umwelt Materie, Information und Energie sowohl als Eingangsgröße (in das System herein) als auch als Ausgangsgröße (aus dem System heraus) aus (VDI 3633, S. 17).

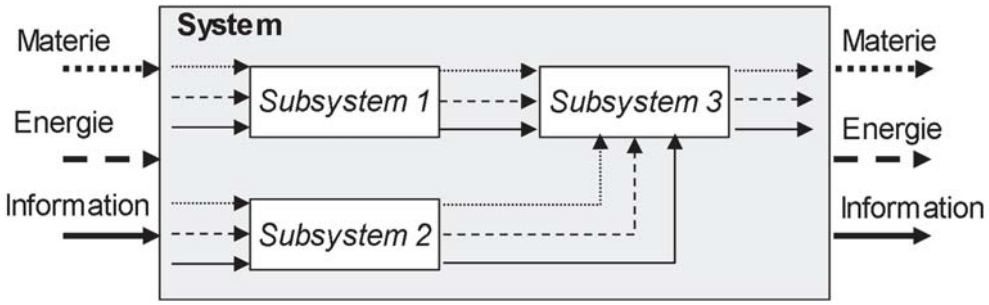


Abbildung 3: System und dessen Charakteristika (nach VDI 3633, S. 1)

Das System kann wiederum in Elemente aufgeteilt werden, die selbst ein System darstellen. Ein solches System innerhalb eines Systems wird als **Teilsystem** oder Subsystem bezeichnet (VDI 3633, S. 17). **Abbildung 3** zeigt die untereinander und mit der Systemumwelt Materie, Energie und Information austauschenden Teilsysteme. Es gelten folgende Definitionen (Feldhusen und Grote 2013, S. 241):

- **Materie**: Gas, Flüssigkeit, feste Körper, Staub, aber auch Rohprodukt, Material, Prüfgegenstand, Behandlungsobjekt, Endprodukt, Bauteil, geprüfter oder behandelter Gegenstand.

- **Energie**: mechanische, thermische, elektrische, chemische und optische Energie, aber auch Kraft, Strom und Wärme.
- **Information**: Messgröße, Anzeige, Steuerimpuls, Daten, Informationen.

Technische Systeme dienen einem technischen Prozess, in dem Materie, Energie und Signale geleitet und/oder verändert werden. In diesem Kontext ist der Begriff des „Flusses“ von Materie, Energie und Signale üblich, es wird zwischen Energieflüssen, Informationsflüssen und Materialflüssen unterschieden (Feldhusen und Grote 2013, S. 240). Da keine einheitlich anerkannte Definition der Begriffe der Ein- und Ausgangsgrößen besteht, sind auch die synonymen Begriffe Signalfluss (als Synonym für Informationsfluss) sowie Stofffluss (als Synonym für Materialfluss) üblich (Feldhusen und Grote 2013, S. 240).

Der Begriff **Prozess** beschreibt die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie und Information umgeformt, transportiert oder gespeichert werden können (VDI 3633, S. 13). Weitere gebräuchliche Definitionen des Begriffes Prozess sind: Eine „Struktur mit klar spezifiziertem In- und Output, deren Bestandteile Aufgaben sind, die durch logische Folgebeziehungen miteinander verknüpft werden“ (Fischermanns und Liebelt 2000, S. 21). Eine „logische Folge von Tätigkeiten, um ein Ziel zu erreichen“ (Eigner et al. 2014, S. 55) oder „Jede Tätigkeit oder jeder Satz von Tätigkeiten, die beziehungsweise der Ressourcen verwendet, um Eingaben in Ergebnisse zu verwandeln“ (DIN EN ISO 9000:2015-11). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dem Verständnis von Schäuffele/Zurawka gefolgt:

„Ein Prozess im Sinne eines Vorgehensmodells ist eine systematische, wiederkehrende Reihe logisch aufeinander folgender Prozessschritte“ (Schäuffele und Zurawka 2013, 145 ff).

Ein **Prozessschritt** ist eine in Folge von Tätigkeiten, die abgeschlossen ist und deren Ergebnis ein **Artefakt** ist (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 145). Ein solches Artefakt kann ein Endergebnis sein, aber auch von anderen Prozessschritten weiterverwendet werden (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 145).

Der Begriff des Prozesses ist eng mit dem Begriff der **Methode** verbunden:

„Die Methode ist eine Vorschrift, die vorgibt, wie planmäßig und unter Gebrauch definierter Prinzipien vorzugehen ist, um festgelegte Ziele zu erreichen“ (Schäuffele und Zurawka 2013, 146, 147; Goeken 2006, S. 52).

Für jeden Prozessschritt oder Reihe von Prozessschritten muss eine solche Vorschrift beziehungsweise Vorgehensweise vereinbart werden (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 146–147). Eigner verknüpft die Begriffe des Prozesses und der Methode und beschreibt diese als eine „Sammlung an Techniken, um die Tätigkeiten im Prozess umzusetzen“ (Eigner et al. 2014, S. 55). Prozessschritte, die alleine kein verwertbares Artefakt für nachfolgende Prozessschritte liefern, werden als **methodische Schritte** bezeichnet (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 147). Die Methode setzt sich damit aus methodischen Schritten zusammen.

Werkzeuge (Englisch: Tools) dienen der Unterstützung von Methoden (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 147).

„Der Begriff des Werkzeugs beschreibt eine Lösung, die, auf eine Methode angewandt, deren Umsetzung und deren Effizienz garantiert“ (Eigner et al. 2014, S. 55).

Durch den Einsatz von Werkzeugen kann die methodische Bearbeitung von Prozessschritten unterstützt und dadurch die Produktivität erhöht werden. Schäuffele und Zurawka heben besonders die Möglichkeit der Automatisierung dieser Unterstützung

durch Werkzeuge hervor (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 147). Diese kann insbesondere Schritte unterstützen, die eine hohe Präzision erfordern, die oft wiederholt werden müssen oder bei denen eine Überprüfung notwendig ist.

Es wird zwischen **physischen Werkzeugen** und **Software-** beziehungsweise **Informationstechnischen (IT) Werkzeugen** unterschieden. Das Software- Werkzeug dient der Unterstützung der Softwareentwicklung, das die computergestützte Anwendung einer Methode im Dialogbetrieb ermöglicht (Lackes und Siepermann 2019). Die Anwendung eines Software-Werkzeugs basiert auf der Nutzung informationstechnischer Lösungen zur Erstellung, Dokumentation und Optimierung von Artefakten (nach Eigner et al. 2014, S. 7). Der Begriff „physisch“ wird im Folgenden in seiner Bedeutung als „körperlich“ verwendet (duden.de 2017c).

Abbildung 4 zeigt die Zusammenhänge zwischen den Grundbegriffen Prozess, Prozessschritt, Artefakt, Methode und methodischer Schritt und damit das Verständnis dieser im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

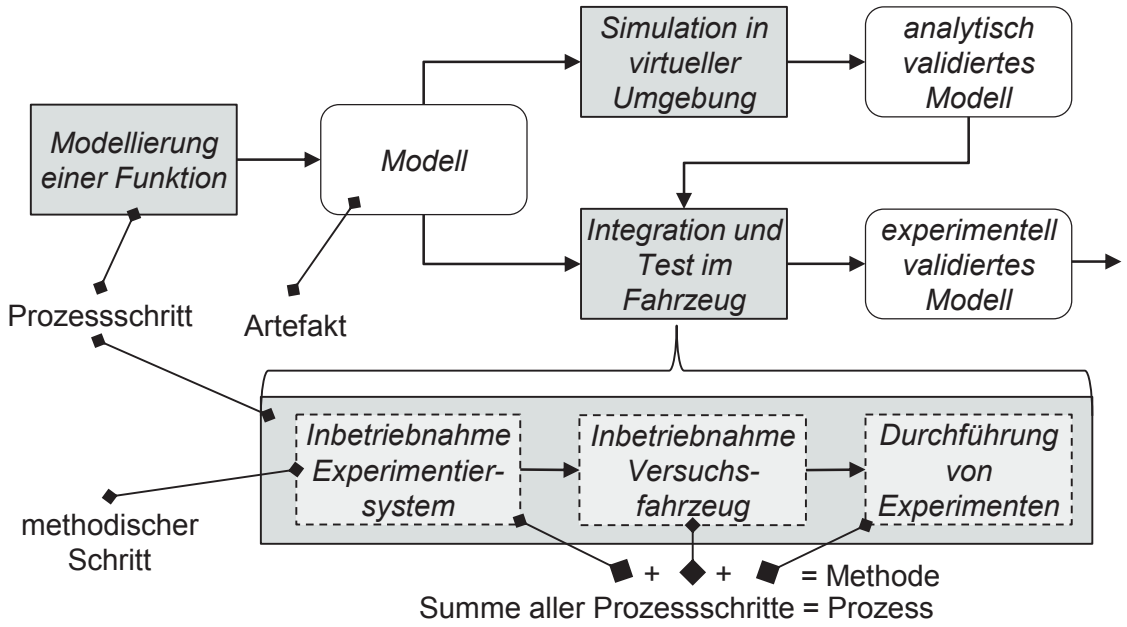


Abbildung 4: Zusammenhänge der Grundbegriffe Prozess, Methode und Artefakt im Verständnis der Arbeit (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 147)

Der gezeigte Prozess beschreibt eine systematische, wiederkehrende Reihe logisch aufeinander folgender, jeweils ein Artefakt liefernder Prozessschritte, die die Bereitstellung des Artefaktes „experimentell validiertes Modell“ zum Ziel. Die Methode dient der Beschreibung der Vorgehensweise im Prozess und in dessen Prozessschritten. Die Methode ist die Summe der einzelnen methodischen Schritte, die das konkrete Vorgehen innerhalb der Prozessschritte beschreiben. Im Beispiel ist dies am Prozessschritt „Integration und Test im Fahrzeug“ gezeigt. Zur Unterstützung der methodischen Schritte setzt die Methode Werkzeuge ein, die deren Umsetzung und Effizienz garantieren.

2.2 Grundlagen der Produktentstehung

Ein System entsteht in vielen kleinen Schritten, deren Inhalte genau festgelegt und deren Schnittstellen untereinander genau beschrieben sein müssen.

„Die Gesamtheit aller Prozessschritte, welche zur Entstehung eines System erforderlich sind, wird als System- beziehungsweise Produktentwicklungsprozess (PEP) bezeichnet“ (Feldhusen und Grote 2013, S. 11).

Der Begriff „**Produktentwicklungsprozess**“ wird oft synonym zu dem Begriff „Produktentstehungsprozess“ verwendet (Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 749; Eigner et al. 2014, S. 2). Das finale Artefakt des PEP, das **Produkt**, wird auch als Zielsystem bezeichnet (VDI 3633, S. 20).

Das prinzipielle Vorgehen im PEP kann auf elementarer Ebene durch das sogenannten TOTE-Modell beschrieben werden (Miller et al. 1960). Das Akronym TOTE beschreibt die Vorgänge der Handlungsregulation auf elementarster Ebene als iteratives Vorgehen aus den Elementen:

I. **T**est: Überprüfung ob ein existierender Zustand einem gewünschten Zustand entspricht.
II. **O**perate: Durchführung einer Handlung zur Zustandsänderung.
III. Überprüfung des Ergebnisses dieser Handlung mit einem weiteren **T**est.

Dieser „Regelkreis“ wird solange durchlaufen bis sich ein Erfolg einstellt und die Aufgabenstellung demnach verlassen werden kann (dem **E**xit) (nach Miller et al. 1960; Lindemann 2009, S. 40). Die nachfolgende **Abbildung 5** zeigt dieses elementare Vorgehen.

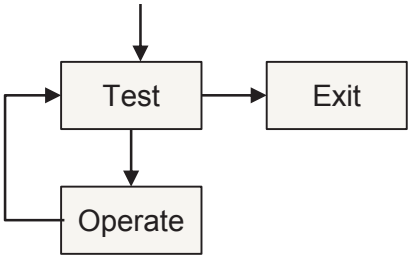


Abbildung 5: TOTE-Modell (Lindemann 2009, S. 40)

Die PEP beginnt der Erstellung eines Systems. Darauf folgt ein Test, in dem das System mit dem Zielsystem verglichen wird. Ergibt der Test ein negatives Ergebnis, wird das System einer Zustandsänderung unterworfen und das Ergebnis dieser wird anschließend wieder getestet. Endet der Test positiv, entspricht das System dem Zielsystem. Der Prozess der Produktentwicklung ist erfolgreich durchlaufen und kann mit dem Exit abgeschlossen werden.

Es wird im Folgenden zwischen der System-Erstellung (Kapitel 2.2.1) sowie dem System-Test (Kapitel 2.2.2) unterschieden. Weitere Grundlagen zum Verständnis der Begrifflichkeiten der Bewertung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen werden im Kapitel 2.2.4 erklärt.

Im Kontext des Produktentwicklungsprozesses ist der Begriff des **Systems Engineering (SE)** wichtig. Dieser, seit den 1960 Jahren entwickelte Ansatz, verfolgt das Ziel, komplexe technische Systeme in ihrer Gesamtheit zu verstehen, deren Komplexität zu beherrschen und diese letztendlich in hoher Qualität umzusetzen (Eigner et al. 2014, S. 45; Braess und Seiffert 2012, S. 646). Das International Council on Systems Engi-

neering (INCOSE) beschreibt Systems Engineering als „… an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems“ (INCOSE 2015, S. 11). Diese Beschreibung kann wie folgt zusammengefasst werden:

Systems Engineering (SE) versteht sich als ein interdisziplinärer Ansatz der erfolgreichen Entwicklung von Systemen.

Der Systems Engineering-Ansatz beschreibt ein iteratives Vorgehen des technischen Managements, der Beschaffung und Lieferung, des Systementwurfs, der Produkt-Umsetzung und der technischen Evaluation des zur entwickelnden Produktes (Eisner 2002, S. 5). Von Produkt- bis zu Komponentenlevel wird auf jeder Systemebene eine Reihe von Prozessschritten beschrieben, die schließlich zu einer bevorzugten Systemlösung führen. SE wird auch als „Kunst und Wissenschaft der Entwicklung eines lauffähigen Systems, das seine Anforderungen trotz oftmals widersprüchlicher Einschränkungen erfüllt“ beschrieben (NASA Systems Engineering Handbook 2007, S. 3). Entsprechend beschreibt SE sowohl den Ansatz selbst, die das Vorgehen beschreibende Prozesse sowie auch das Tätigkeitsfeld des SE, wobei sich Letzteres mit „dem Problem als Ganzes unter Berücksichtigung all seiner Facetten, der Variablen sowie der sozialen und technischen Aspekte“ beschäftigt (INCOSE 2015, S. 11).

2.2.1 Modell und Prototyp in der Produktentstehung

Der Begriff der Modellierung, aber auch der synonym verwendete Begriff des Modellaufbaus, beschreibt die Erstellung eines **Modells** (VDI 3633, S. 9). Die VDI 3633 definiert den Modellbegriff wie folgt:

„Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ (VDI 3633, S. 9).

Unter einem Modell wird ein „(vereinfachendes) Abbild einer (partiellen) Realität“, das mittels formaler Beschreibung einen geeigneten Ausschnitt des Betrachtungsgegenstandes beschreibt, verstanden (Bungartz et al. 2009, S. 3–5).

Das **Modell des Systems** unterschiedet sich vom **System** selbst hinsichtlich „der untersuchungsrelevanten Eigenschaften innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens“ (VDI 3633, S. 9). Das Modell (eines Systems) wird genutzt, um Aufgaben zu lösen, deren Durchführung am Original nicht möglich oder zu aufwendig wären (VDI 3633, S. 9). Modellierung kann sprachorientiert, also auf Basis einer Simulationssprache, grafikorientiert, auf Basis grafischer Symbole oder auch parameterorientiert, unter Verwendung von parametrisierbaren Modellen, erfolgen (VDI 3633, S. 9). Es wird zwischen **nicht experimentierbaren** und **experimentierbaren** Modellen hinsichtlich der Nutzbarkeit des Modells für Simulationen unterschieden (VDI 3633, S. 9). Ebenfalls wird hinsichtlich der **Ausführbarkeit** zwischen ausführbaren, mit einem eigenen Verhalten auf einen Input mit einem Output reagierenden, sowie nicht ausführbaren Modellen differenziert (nach Rabe et al. 2008, S. 78ff).

„Unter einem **Prototyp** werden alle Arten von Produktkonzepten verstanden, die genutzt werden, um die Funktionalität des zu entwickelnden Produkts zu demonstrieren“ (Feldhusen und Grote 2013, S. 334).

Spezifischer sind Prototypen „Modelle eines angestrebten Zielsystems, die ausführbar oder nicht ausführbar sein können, und dessen wesentlichen Eigenschaften darstellen“ (Hoffmann 2010, S. 75ff).

Prototypen dienen dazu, verschiedene Aufgaben in Entwicklungsprozessen zu unterstützen, teilweise werden bestimmte Aufgaben auch erst durch Prototypen ermöglicht.

Der Prototyp kann damit als **Unterklasse des Modells** verstanden werden, mit dem die Funktionalität des zu entwickelnden Produktes getestet werden kann.

Es kann zwischen **horizontalen und vertikalen Prototypen** unterschieden werden (Hoffmann 2010, S. 78; Kuhrmann 2012). Ein horizontaler Prototyp dient der ganzheitlichen Abbildung des Systems, ohne dessen Funktionen technisch korrekt abzubilden. Der vertikale Prototyp bildet nur einen bestimmten Aspekt des Systems ab und zeigt dessen Funktionalität in Gänze und technisch korrekt. Die Erstellung von Prototypen wird durch den Begriff **Prototyping** wie folgt beschrieben:

„Prototyping bezeichnet die Aktivitäten und Prozeduren um Prototypen für den Produktentwicklungsprozess zu bauen und zu nutzen“ (Filippi und Barattin 2012, S. 148).

Je nach eingesetztem Modellierungs- beziehungsweise Prototyping-Verfahren wird zwischen **physischem** und **virtuellem** Modell beziehungsweise Prototyp unterschieden. Neben dem Begriff des physischen Modells und Prototyps ist teilweise auch der des „realen“ Modells und Prototyps verwendet (Filippi und Barattin 2012, S. 150). Das virtuelle Modell wird durch die Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung rechnerunterstützt formalisiert erstellt und dokumentiert (Eigner et al. 2012, S. 12). Zwischen den rein physikalischen und den rein virtuellen Prototypen existieren Mischformen, die sogenannten gemischten oder **hybriden Prototypen** (Filippi und Barattin 2012, S. 150; Milgram und Kishino 1994, S. 1322).

Der Begriff der **modellbasierten Produktentwicklung** bezeichnet Produktentwicklungsprozesse, die mit Hilfe von Modellen durchgeführt werden. Analog bezeichnet der Begriff des **Modellbasierten Systems Engineering** (MBSE) einen multidisziplinären Ansatz basierend auf entwicklungsphasenspezifischen, digitalen Systemmodellen, die entlang des Produktentwicklungsprozesses integriert werden (Eigner et al. 2014, S. 45). Das International Council on Systems Engineering (INCOSE) beschreibt MBSE als formalisierte Anwendung von Modellierung von Systemanforderungen, -design, -analyse, -verifikation und -validierung von der Konzeptphase über die gesamte Entwicklung bis in späteren Lebenszyklusphasen (INCOSE 2015, S. 189).

Der Begriff **Framework** bezeichnet die Verbindung von abgegrenzten, eigenständigen funktionalen Systemelementen, die klar definierte Schnittstellen zu anderen funktionalen Systemelementen besitzen. Weiterhin beinhaltet ein Framework Basisbibliotheken oder andere vordefinierte Elemente, die die Zusammenstellung zum System unterstützen (nach Penndorf 2013, S. 13).

2.2.2 Tests in der Produktentstehung

An Modell und Prototyp werden mit verschiedenen Werkzeugen **Tests** (auch: **Prüfungen**) durchgeführt, um sicherzustellen, dass diese den festgelegten Anforderungen oder Spezifikationen genügen, sie ihren Zweck erfüllen und um etwaige Fehler zu finden (Lütze 2014, S. 55).

„Testen wird als der Prozess verstanden, der sich mit der Planung, der Vorbereitung und der Bewertung eines Produktes und dazugehöriger Arbeitsergebnisse befasst“ (Lütze 2014, S. 55).

Vom Entwicklungsbeginn bis zur Fertigstellung werden Modelle regelmäßig unterschiedlichen Tests (beziehungsweise Prüfungen) unterworfen (Balci 1998, S. 349). Der Test eines Modells dient der Ermittlung von Ungenauigkeiten und Fehlern im Modell sowie des Auffindens von Fehlern in dem durch das Modell abgebildeten System (Balci 1998, S. 335). In den folgenden Erklärungen wird zur besseren Übersichtlichkeit

nur von Modellen gesprochen. Analog gelten die Definitionen auch für Prototypen. Der Begriff der Prüfung wird im Folgenden äquivalent zum Begriff Test verwendet.

Es kann zwischen **informellen**, **statischen** und **dynamischen Tests** unterschieden werden. Informelle Tests beruhen auf subjektiven Einschätzungen zumeist von Entwurfs- und Konzeptmodellen durch Menschen (nach Balci 1998, S. 363–366; Projekt B-U-I 2010; Rabe et al. 2008, S. 97–109; Harvey et al. 2011, S. 568). Statische Tests prüfen Modelle auf Basis von Beurteilungen verschiedener Charakteristika (Balci 1998, S. 367–369). In dynamischen Tests werden maschinenausführbare Modelle hinsichtlich der Charakteristika korrektes Verhalten, Plausibilität, Funktion, Reichweite und Echtzeitverhalten geprüft (Balci 1998, S. 377ff; ISO 26262-6, S. 13ff). **Maschinenausführbare** Modelle, auch als Simulations- oder Computermodelle bezeichnet, werden durch Implementierung eines statischen Entwurfs mit einem Simulationswerkzeug erstellt (Rabe et al. 2008, S. 49). Sie sind durch eine Reaktion auf einen (computerbasierten) Input mit einem beobachtbaren Output gekennzeichnet, welcher auf das interne Verhalten schließen lässt (VDI 3633, S. 6).

Verifikation – oder auch Verifizierung – wird als „formaler Nachweis der Korrektheit (eines Artefaktes) verstanden“ (VDI 3633, S. 19). Der Begriff der **Validierung** beschreibt hingegen die „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung zwischen Modell und System“ (VDI 3633, S. 18). Zur Abgrenzung zwischen Verifikation und Validierung des Modells und Verifikation und Validierung des durch Modelle abgebildeten Systems, wird im Folgenden unterschieden zwischen:

- Der **Modell-Verifikation** und **Modell-Validierung** zur Überprüfung des Modells, sowie
- (modellbasierten) **Verifikation** und **Validierung** zur Überprüfung der Systementwicklung mit Hilfe von Modellen.

Tabelle 1 stellt diese vier Begriffe gegenüber. Im Kontext der Begriffe der (modellbasierten) Verifikation und Validierung ist der Begriff der **Absicherung** gebräuchlich (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 30; Seiffert und Rainer 2008, S. 35). Der Begriff wird als Oberbegriff für die Verifikation und Validierung in System-Entwicklungsprozessen verwendet (Seiffert und Rainer 2008, S. 344). Diesem Verständnis wird im Rahmen der Arbeit gefolgt, der Begriff der Absicherung wird daher als Oberbegriff für die (modellbasierte) Verifikation und Validierung zur Überprüfung der Systementwicklung verwendet. Ein abgesichertes System ist durch (modellbasierte) Tests erfolgreich validiert und verifiziert worden.

Tabelle 1: Modell-Verifikation/Validierung versus modellbasierte Verifikation/Validierung (Rabe et al. 2008, S. 14–15; Balci 1998, S. 336; Haubelt und Teich 2010, S. 10ff)

	Modell-Verifikation und Modell-Validierung	**modellbasierte Verifikation und Validierung = Absicherung**
Verifikation	Bildet das Modell das System wie beabsichtigt und ausreichend genau ab?	Ist das System entsprechend der Anforderungen und Spezifikationen korrekt entwickelt?
Validierung	Gibt das Modell das Verhalten des Systems hinreichend genau wieder?	Sind die der Anforderungen und Spezifikationen, nach der das System entwickelt wird, korrekt?

Für die Modell-Verifikation und -Validierung muss ein Modell den Nachweis seiner Korrektheit und Angemessenheit erbringen. Das Kriterium der **Korrektheit** bemisst sich an dem korrekten Inhalt und der korrekten Struktur des Modells sowie der zugehörigen, korrekten Dokumente, Daten und Informationen (Rabe et al. 2008, S. 23–24). Das Kriterium der **Angemessenheit** des Modells und der in dessen Test erreichbaren Ergebnisses wird durch die Kriterien Genauigkeit, Aktualität, Eignung, Plausibilität und Verständlichkeit beurteilt (Rabe et al. 2008, S. 23–24).

Der Begriff der **Simulation** beschreibt die „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um so zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633, S. 18). Die Simulation bezeichnet den Test mit und an einem Simulationsmodell (nach VDI 3633, S. 14). Ein Simulationsmodell zeichnet sich durch seine „Experimentierbarkeit“ aus, also seine Fähigkeit im Rahmen eines Experiments auf einen Input mit einem beobachtbaren Output zu reagieren (nach VDI 3633, S. 6; VDI 3633, S. 14). Nach dieser Definition kann der Modelltyp des experimentierbaren Prototyps als Simulationsmodell kategorisiert werden. Im Rahmen eines Simulationslaufes bildet das Simulationsmodell das Verhalten eines Systems über einen bestimmten Zeitraum nach. Dabei werden untersuchungsrelevante Zustandsgrößen erfasst und ausgewertet (VDI 3633, S. 14).

Simulationen werden auf **Simulatoren** durchgeführt (VDI 3633, S. 15). Der Begriff des Simulators wird synonym mit den Begriffen des Simulationswerkzeuges oder Simulationssystems verwendet und bezeichnet ein System, das einen Simulatorkern, eine Datenverwaltung, Bedienschnittstellen und gegebenenfalls weitere Schnittstelle beinhalten kann (VDI 3633, S. 15–16). Der Simulatorkern stellt die Modellelemente sowie die zur Erzeugung des korrekten Prozessablaufes im Modell benötigten Ereignisse bereit und operiert während des Simulationslaufes mit den Modelldaten. Ein Ereignis dient zur Steuerung des Programmflusses und bezeichnet eine „Begebenheit, die eine Zustandsänderung auslöst und keine Zeit verbraucht“ (VDI 3633, S. 6). Die Datenverwaltung sorgt für die Organisation der simulationsrelevanten Daten, während die Bedienschnittstelle als (Mensch-Maschine) Schnittstelle zwischen Simulator und Anwender dient.

Tests finden in **Testumgebungen** statt, die aus virtuellen und physischen Elementen zusammengesetzt sein können (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 183; Filippi und Barattin 2012, S. 149).

Die Testumgebung ist vom zu testenden System / dem Testobjekt, dessen Modell oder Prototyp durch dessen Systemgrenze abgegrenzt. Ein Simulator stellt somit eine Testumgebung zum Test von Simulationsmodellen dar. Aber auch ein Fahrzeug, ein Labor oder eine rein virtuelle Testumgebung auf einem PC können Testumgebungen sein (nach Schäuffele und Zurawka 2013, S. 185–186).

2.2.3 Methodik als übergeordneter Begriff

„Die Methodik ist eine Sammlung von einander zugehörigen Prozessen, Methoden und Werkzeugen, die zur Unterstützung einer spezifischen Disziplin eingesetzt werden“ (INCOSE 2015, S. 190).

Abbildung 6 zeigt die Zusammenhänge zwischen den Begriffen Methodik, Methode, und Werkzeug und das Verständnis dieser in der vorliegenden Arbeit.

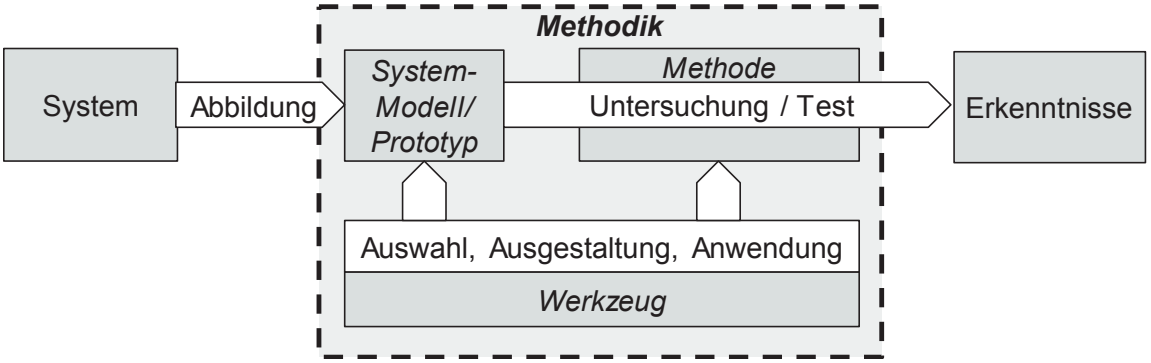


Abbildung 6: Zusammenhang der Begriffe Methodik, Modell, Werkzeug, Methode und Test (nach Klein 2016, S. 14; Lütze 2014, S. 55)

Es wird einer planmäßigen Verfahrensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels oder der Lösung einer theoretischen oder praktischen Aufgabenstellung unter Einschluss eines Systems aus Modellen, Methoden und Werkzeugen gefolgt (nach Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 145; Klein 2016, S. 14). Das System wird durch ein Modell abgebildet. Dieses Modell wird mit dem Ziel des Erkenntnisgewinns mit einer (Test-) Methode getestet. Die Methode wird in der Anwendung durch Werkzeuge unterstützt (Neuhausen 2001, S. 7). Werkzeuge unterstützen auch die Auswahl und Ausgestaltung des Modells.

2.2.4 Grundlagen der Bewertung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen

Die Begriffe **Effizienz** und **Effektivität** werden in der Bewertung von Produktentwicklungsprozessen sowie der eingesetzten Methoden und Werkzeuge verwendet (Balážová 2005, S. 1; Feldhusen und Grote 2013, S. 311). Der Begriff der Effektivität wird synonym zu den Begriffen Wirksamkeit oder nutzbarer Leistung verwendet und bezeichnet den Zielerreichungsgrad eines Prozesses, einer Methode oder eines Werkzeuges (Balážová 2005, S. 25). Die Effektivität bewertet, in welchem Umfang ein Ziel mit Hilfe eines Prozesses, einer Methode oder eines Werkzeuges erreicht wurde, ohne die Art und Weise der Zielerreichung zu betrachten (nach Thommen et al. 2019). Dagegen kann der Begriff der Effizienz als Wirkungsgrad oder Wirksamkeit der Zielerreichung des Prozesses, der Methode oder des Werkzeuges verstanden werden (Balážová 2005, S. 25). Die Effizienz bewertet in welcher Ausprägung ein Ziel erreicht wurde. Die Effizienz eines Prozesses, einer Methode oder eines Werkzeugs kann an Kriterien wie einer verbesserten Wirtschaftlichkeit, geringeren Kosten oder Ressourcen gemessen werden (nach Fees et al. 2019). Beispielsweise wird ein effektiver Prozess einen größeren Ergebnisumfang erreichen als ein weniger effektiver Prozess. Dagegen wird ein effizienter Prozess dasselbe Ergebnis zu geringen Kosten oder geringerem Aufwand erreichen als ein weniger effizienter Prozess.

Simultaneous Engineering und **Frontloading** sind zwei Ansätze zur Steigerung der Effizienz und Effektivität von Entwicklungsprozessen. Der Begriff des Simultaneous Engineering wird im Gegensatz zu einer rein sequentiellen Abfolge als weitgehend parallele oder sehr deutlich überlappende Abfolge von Prozessschritten der Entwicklung verstanden (nach Feldhusen und Grote 2013, S. 32; Schäuffele und Zurawka 2013, S. 25). Simultaneous Engineering zielt auf eine Verkürzung von Entwicklungszeiten, eine schnellere Produkterstellung, eine Kostenreduktion am Produkt und der Produktentwicklung sowie eine Qualitätsverbesserung ab (Feldhusen und Grote 2013,

S. 32). Neben dem Begriff des Simultaneous Engineering ist auch der Begriff des Concurrent, des „gleichzeitigen“ Engineering, gebräuchlich (Feldhusen und Grote 2013, S. 31). Der Begriff des Frontloading bezeichnet ein Konzept der Optimierung von Produktentwicklungsprozessen durch eine Verlagerung von Entwicklungstätigkeiten in frühe Phasen des Produktentwicklungsprozesses (Paulweber und Lebert 2014, S. 4). Die Verifikation und Validierung auf Basis von Simulationswerkzeugen ist ein Weg des Frontloadings von Änderungsprozessen von späten in frühe Phasen des Produktentwicklungsprozesse (Fricke et al. 2000, S. 174).

2.3 Grundlagen mechatronischer Systeme

„Der Begriff Mechatronik bezeichnet die ganzheitliche Sicht und Entwurfsmethodik durch das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung“ (VDI 2206, S. 14).

Das **mechatronische System** besteht aus einem Grundsystem sowie Sensoren, Aktoren und einer Informationsverarbeitung (VDI 2206, S. 14). Die **Steuerung** stellt das Element der Informationsverarbeitung zur Speicherung, Strukturierung, Veränderung und Ausgabe von Informationen dar (VDI 2206, S. 114). Der Begriff bezeichnet ein System, welches die elektrischen Signale von Sensoren empfängt, auswertet und die Ansteuersignale für Aktoren berechnet (Reif 2011, S. 198). Unter einem **Sensor** wird ein System zur Umwandlung einer Zustandsgröße eines technischen Prozesses, deren Qualität sich nicht als Signal eignet, in ein übertragbares, weiter verarbeitbares und registrierbares Signal, verstanden (VDI 2206, S. 116). **Aktoren** (auch: Aktuatoren) dienen der gezielten Beeinflussung von Zustandsgrößen in mechatronischen Systemen (VDI 2206, S. 113). Aktoren setzen stellinformationen-tragende Signale geringer Leistung in leistungsbehaftete Signale um, deren Energieform zur Prozessbeeinflussung notwendig ist (Reif 2011, S. 376).

Das Zusammenspiel zwischen Sensor, Steuerung und Aktor dient der Erfassung ausgewählten Zustandsgrößen eines Grundsystems und der Umgebung mit dem Zweck, das Grundsystem in gewünschter Weise zu beeinflussen sowie der Umsetzung dieser Beeinflussungen (VDI 2206, S. 15). Das Zusammenspiel wird durch den Begriff der **Regelung** beschrieben: Der „fortlaufenden Erfassung einer variablen Größe, den Vergleich mit einer Führungsgröße sowie die Angleichung an diese“ (IEC 2014). In diesem Verständnis stellt das Grundsystem die zu beeinflussende Strecke beziehungsweise Regelstrecke im **Regelkreis** dar. **Abbildung 7** zeigt das Zusammenspiel und Verorte den Begriff der Regelung.

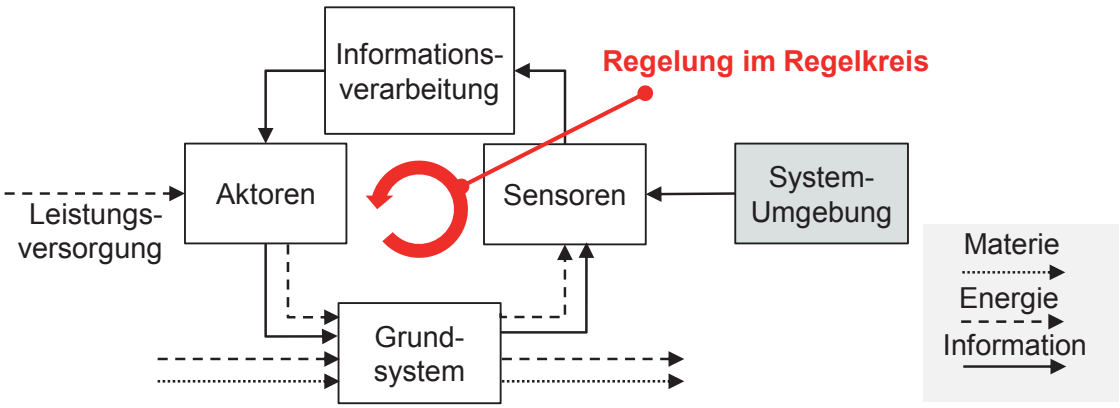


Abbildung 7: Grundstruktur eines mechatronischen Systems, Regelung und Regelkreis (VDI 2206, S. 14, IEC 2014)

Elektrotechnik kann in Elektrik und Elektronik untergliedert werden. Die **Elektrik** befasst sich mit der elektrischen Installation von Geräten sowie deren Verbindungselementen, während die **Elektronik** die mit elektronischen Bauelementen realisierten elektrischen Funktionen beschreibt (Eigner et al. 2014, S. 141ff). Oft werden beide Begriffe kombiniert als **Elektrik/Elektronik (E/E)** verwendet.

2.4 Grundlagen der Fahrzeugführung und Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Der Begriff der **Fahrzeugführung** bezeichnet das „dynamische Zusammenspiel zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung“ (Kraft 2011, S. 8; Negele 2007, S. 7). Der Fahrer nimmt relevante Führungsgrößen der Umwelt wahr, beispielsweise den Straßenverlauf oder die Verkehrssituation, und leitet daraus einen Soll-Kurs und eine Soll-Geschwindigkeit ab. Durch Bedieneingaben des Lenkens und der Geschwindigkeitssteuerung versucht der Fahrer, diesen Soll-Zustand in Abgleich mit dem Ist-Zustand, der durch den Ist-Kurs und die Ist-Geschwindigkeit gekennzeichnet ist, einzustellen (Negele 2007, S. 4). Störgrößen, wie beispielsweise Straßenschäden, werden über das System Fahrzeug als Zustandsgröße an den Fahrer weitergeleitet und beeinflussen dessen Wahrnehmung des Soll-Zustandes.

In der technischen Analogie agiert der Fahrer durch seine Bedieneingaben damit als Regler im „Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“ (nach Kraft 2011, S. 8). **Abbildung 8** zeigt diesen Regelkreis. Die Interaktion der aufgeführten Systeme wird entsprechend der zuvor eingeführten Konvention durch Energie-, Informations- beziehungsweise Materialflüsse beschrieben. Da die spezifischen Interaktionen erst in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben werden, sind in der Abbildung unspezifische Flüsse dargestellt. Ein solcher Fluss kann sowohl Energie-, Informations- als auch Materialfluss sein.

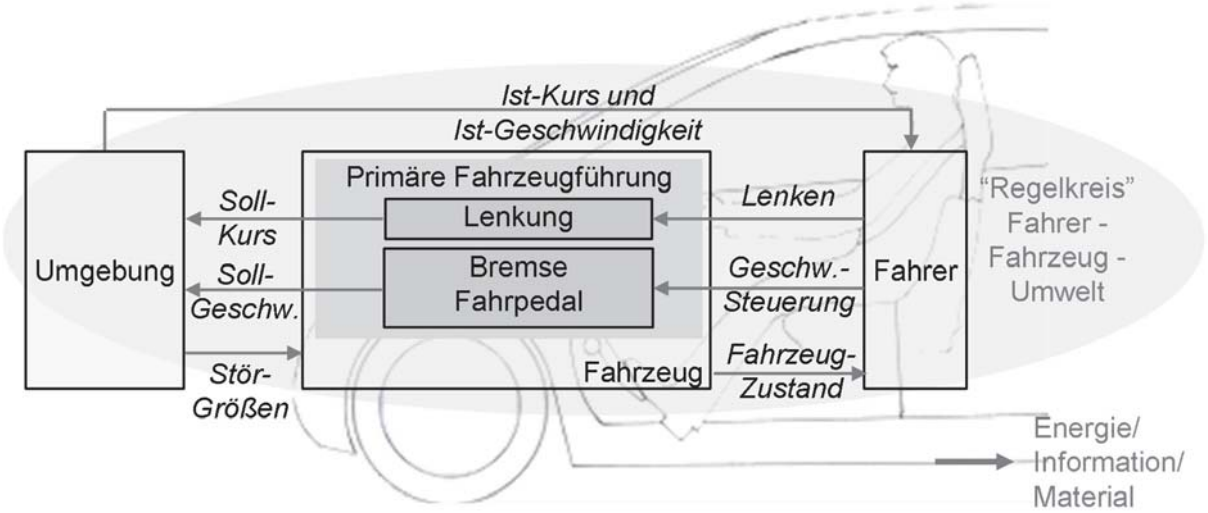


Abbildung 8: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt (Kraft 2011, S. 8)

Der in **Abbildung 8** dargestellte Begriff der primären Fahrzeugführung beschreibt die Aktivitäten, die für das Zustandekommen der Bewegung des Fahrzeugs verantwortlich sind (Negele 2007, S. 7). Dies sind die Navigation zur Wahl der Fahrtroute, die Bahnführung für die mentale Festlegung des Soll-Kurses und der Soll-Geschwindigkeit sowie die Stabilisierung durch die Regelung von Geschwindigkeit und Kurs über die Bremse, Fahrpedal und die Lenkung. Neben primären existieren auch sekundäre und tertiäre Aufgaben der Fahrzeugführung (Negele 2007, S. 7). Sekundäre Aufgaben wie

die Betätigung des Blinkerhebels oder der Kupplung, aber auch die der Nutzung quer- und längsdynamischer FAS, fallen Verkehrs- und Umweltbedingt an und stehen mit dem Fahrvorgang in Verbindung. Dagegen dienen tertiäre Aufgaben wie die Bedienung von Infotainment-Systemen oder die Klimaregelung dem Komfort, der Information oder der Unterhaltung während der Fahrt.

Für die Interaktion eines Fahrers mit dem Fahrzeug müssen die Elemente der Fahrzeugführung eine **Mensch-Maschine Schnittstellen (MMS)** beinhalten. Eine Mensch-Maschine Schnittstelle bezeichnet einen „Ort oder eine Aktion, bei der der Mensch mit einer Maschine in Kontakt tritt“ (Wiktionary 2017a) – eine **Mensch-Maschine Interaktion (MMI)**. Die MMS kann als das Element oder Sub-Element eines Systems verstanden werden, mit dem der Fahrer interagiert (Response Consortium 2009, S. 6). Im internationalen automobilen Entwicklungsprozess wird die MMS zumeist mit dem Begriff „HMI“ (Human Maschine Interface) bezeichnet (vergleiche Winner et al. 2012, S. 671; Braess und Seiffert 2012, S. 712; Wallentowitz und Reif 2006, S. 395). Der Begriff wird im weiteren Verlauf der Arbeit synonym verwendet. Im Kontext des Systems Fahrzeug wird unter dem Begriff Mensch-Maschine Schnittstelle damit folgendes verstanden:

„Die Mensch-Maschine Schnittstellen sind diejenigen Anzeigen und Bedienelemente des Fahrzeugs, mit denen der Fahrer interagiert“ (Negele 2007, IV).

Anzeigen werden als „Auslöser des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses“ verstanden (Winner et al. 2012, S. 21). Im Regelkreis stellen diese die Elemente der Kommunikation vom technischen System zum Menschen dar. **Bedienelemente** hingegen bezeichnen den ausführenden Teil, denjenigen, der nach Informationsaufnahme und -verarbeitung vom Fahrer „bedient“ wird (Winner et al. 2012, S. 21). Im Regelkreis bezeichnen Bedienelemente die Elemente zur Kommunikation vom Menschen zum technischen System. Im Rahmen der Fahrzeugführung muss der Fahrer durch die Anzeigen Informationen aufnehmen, diese bewerten, Entscheidungen treffen und passende Handlungen über Bedienelemente einleiten. Dies kann durch das in **Abbildung 9** dargestellte Modell des menschlichen Informationsbearbeiters beschrieben werden, das aus den Elementen Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung besteht (Bubb 2015, S. 68).

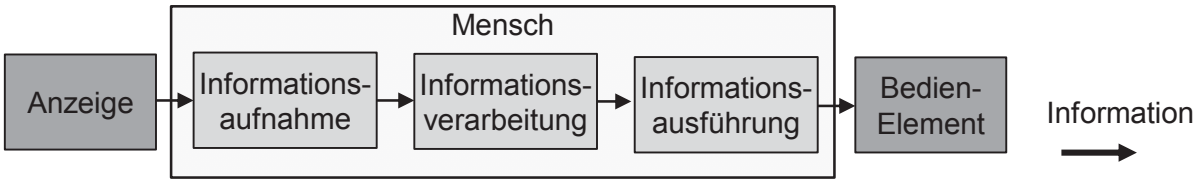


Abbildung 9: Modell des menschlichen Informationsbearbeiters im Fahrzeug (Bubb 2015, S. 69)

Der Begriff der Anzeige ist direkt mit der **menschlichen Sinneswahrnehmung** gekoppelt. Durch diese kann der Mensch visuelle, akustische, olfaktorische, gustatorische, haptische und kinästhetische Informationen aufnehmen (Bubb 2015, S. 68). Obwohl der Fahrer das Fahrzeug durchaus mit allen dieser sechs Sinneswahrnehmung wahrnimmt – so beschreibt beispielsweise Hehn (Hehn 2007, S. 45) eine Verbindung zwischen dem Duft eines Fahrzeuginnenraumes und der emotionalen Wahrnehmung des Fahrzeugs durch den Fahrer – werden für die eigentliche Fahrzeugführung nur die visuelle, akustische, haptische und kinästhetische Wahrnehmung als relevant angesehen (vergl. Negele 2007, S. 9; Bubb 2015, S. 68; Winner et al. 2012, S. 316).

Die **visuelle** oder auch optische **Wahrnehmung** des Menschen findet über das Auge statt. Der Sichtbereich des einzelnen Auges beträgt etwa 150°, durch Überlagerung beider Augen ist ein Sichtfeld bis zu 200° erreichbar (Reich et al. 2017, S. 434). Die Sehschärfe des Auges, die der Fähigkeit entspricht, Objekte zu unterscheiden, erreicht in einem Bereich der Augenmitte ein Maximum von bis zu 0,6 Bogenminuten. Dies entspricht einer Erkennung von Objekten von 1,5mm Größe in 5m Entfernung (Bubb 2015, S. 81ff). Die Sehschärfe nimmt mit zunehmenden Winkel von der Augenmitte hin ab und ist bereits im Bereich von 7,5° auf etwa 25% des Maximalwertes, reduziert (nach (Negele 2007, S. 10). Der Bereich von 15° um den Aug-Mittelpunkt wird auch als primäres oder foveales Sichtfeld des Menschen bezeichnet, der darüber hinausgehende Bereich als peripheres Sichtfeld (Winner et al. 2012, S. 6). Dieses statische periphere Sichtfeld kann durch Rotation des Kopfes auf bis zu 320° zu einem dynamischen peripheren Sichtfeld erweitert werden (Reich et al. 2017, S. 434). Die Sehschärfe hängt zusätzlich von der Helligkeit, in Grenzen auch von der Farbe des auf das Auge auftreffenden Lichtes ab (Reich et al. 2017, S. 435; Negele 2007, S. 11). Durch das Auge können Lichtreize mit Wellenlängen von 400nm bis 800nm wahrgenommen werden und es können bis zu 7 Millionen Farben differenziert werden (Bubb 2015, S. 87; Adler 2010, S. 25). Die Sehschärfe ist zusätzlich von der Sehwinkelgeschwindigkeit abhängig. Eine Darbietungszeit von mindestens 0,15s bis 0,25s ist erforderlich, damit das Auge ein Objekt erkennt (Bubb 2015, S. 90). Die Darbietungszeit steht in direktem Zusammenhang zu der Größe sowie der Geschwindigkeit des Objekts. Die visuelle Sinneswahrnehmung kann zusätzlich Entfernungen beziehungsweise Abstände wahrnehmen und bedient sich drei grundlegender Mechanismen (Negele 2007, S. 12). Zum einen dem Mechanismus der Tiefenwahrnehmung durch die Erfassung zweier leicht verschiedener Bilder in den beiden Augen. Dieser Mechanismus, der auch als Stereosehen bezeichnet wird, ist im Bereich von etwa 0,2m bis maximal 10m wirksam (Negele 2007, S. 11). Bei höheren Entfernungen ersetzt die Bewegungsparallaxe diesen Mechanismus. Die Bewegungsparallaxe beruht auf der Abbildung desselben Bildes kurz hintereinander an verschiedenen Punkten der Netzhaut (Negele 2007, S. 12). Für geringe Distanzen von etwa 0,05m bis maximal 5m Entfernung ist zusätzlich der Mechanismus der Tiefenwahrnehmungsschärfe durch Akkomodation, der Einstellung des Auges auf den Abstand durch Linsenkrümmung, wirksam (Negele 2007, S. 12).

Die **akustische Wahrnehmung** (auch: auditive Wahrnehmung) beruht auf der Wahrnehmung von Frequenzen und Amplituden von (Luft-) Schallschwingungen durch das Ohr (Bubb 2015, S. 91). Es können Frequenzen von 25Hz bis etwa 20.000Hz wahrgenommen werden. Der Bereich der menschlichen Sprache liegt im Bereich von etwa 60Hz bis 600Hz (nach Bubb 2015, S. 93; Negele 2007, S. 14). Die Wahrnehmung von Lautstärke- beziehungsweise Amplitudenänderung ist frequenzabhängig. Die höchste Sensitivität liegt im Bereich von etwa 1.000 Hz (Bubb 2015, S. 94). Das zeitliche Wahrnehmungsvermögen des Ohres ist durch eine Grenzzeit von etwa 0,18s charakterisiert (Bubb 2015, S. 95). Unterhalb dieser Darbietungszeit werden Töne oder Geräusche nicht voll wahrgenommen. Mit dem akustischen Sinn ist eine 360° Wahrnehmung möglich, für Frequenzen bis ca. 1.300Hz auch eine Richtungsorientierung, also eine Lokalisierung der Schallquelle (Bubb 2015, S. 95). Dieser Lokalisierungsmechanismus kann Schallquellen bis zu einem Abstand von 15° Abstand unterscheiden (Skluzacek 2012, S. 1).

Die **haptische Wahrnehmung** beruht auf der Wahrnehmung durch die Nutzung des taktilen sowie kinästhetischen Wahrnehmungskanals (Winner et al. 2012, S. 6). Die taktile Wahrnehmung, auch als „Hautsinn“ bezeichnet (Negele 2007, S. 15), beruht auf

der Wahrnehmung von Verformungen der Haut durch entsprechende Rezeptoren. Es können sowohl Druck, Berührung wie auch Vibration wahrgenommen werden (Winner et al. 2012, S. 6). Die **kinästhetische Wahrnehmung** beschreibt die Wahrnehmung von translatorischer und rotatorischer Beschleunigung durch das Vestibularorgan im Innenohr (Negele 2007, S. 14). Diese Wahrnehmungsform kann durch FAS nur indirekt als Anzeige eingesetzt werden, beispielsweise als Resultat eines Eingriffes eines FAS und eine damit einhergehende Querbeschleunigung des Fahrzeugs (Winner et al. 2012, S. 317). Der haptischen Wahrnehmung wird auch die Wahrnehmung der **Propriorezeption** zugeordnet (Bubb 2015, S. 81). Diese umfasst die Wahrnehmung der Lage der Extremitäten – den Armen, Händen, Beinen und Füßen – und dem Kopf im Raum durch Stellungsrezeptoren des Skeletts, sowie die Wahrnehmung von Kräften und Bewegungen über die Anspannung und Bewegung von Muskeln und Sehnen (Fröhlich 2014, S. 27).

Der Begriff des **Bedienelementes** ist direkt mit der Fähigkeit technischer Systeme gekoppelt, den Menschen wahrzunehmen. Diese Fähigkeit wird auch als **maschinelle Wahrnehmung** bezeichnet (nach Stiller 2005, S. 9). Folgende Eingaben durch den Menschen können maschinell wahrgenommen werden (Maurer und Stiller 2005, S. 125; Winner et al. 2012, S. 316): Lage und Bewegung der menschlichen Extremitäten Hand/Arm sowie Fuß/Bein, Sitz- und Kopfhaltung, Sprache und Geräusche, Lidschlag, Blickbewegung und Blickrichtung des Auges, sowie Mimik, Atem, Herz- und Hautfrequenz. Es wird zwischen Zustandsgrößen des Fahrers und einer **tatsächlichen Bedienabsicht** unterschieden. Als Letztere werden nur die folgenden Bedieneingaben verstanden (Maurer und Stiller 2005, S. 125; Winner et al. 2012, S. 316):

- Bedieneingaben der Extremitäten,
- Haltungsgrößen der Extremitäten sowie des Kopfes,
- die Blickbewegung und -richtung,
- die Mimik, sowie
- die Spracheingabe.

Die maschinelle Wahrnehmung kann dabei sowohl visuell, akustisch und haptisch erfolgen. Entsprechend können visuelle, akustische und haptische Bedienelementen unterschieden werden. Die Interaktion zwischen Anzeigen, Fahrer und Bedienelementen, lässt sich somit zu dem in **Abbildung 10** dargestelltem, komplexen Informationsaustausch zusammenfassen (nach Winner et al. 2012, S. 35).

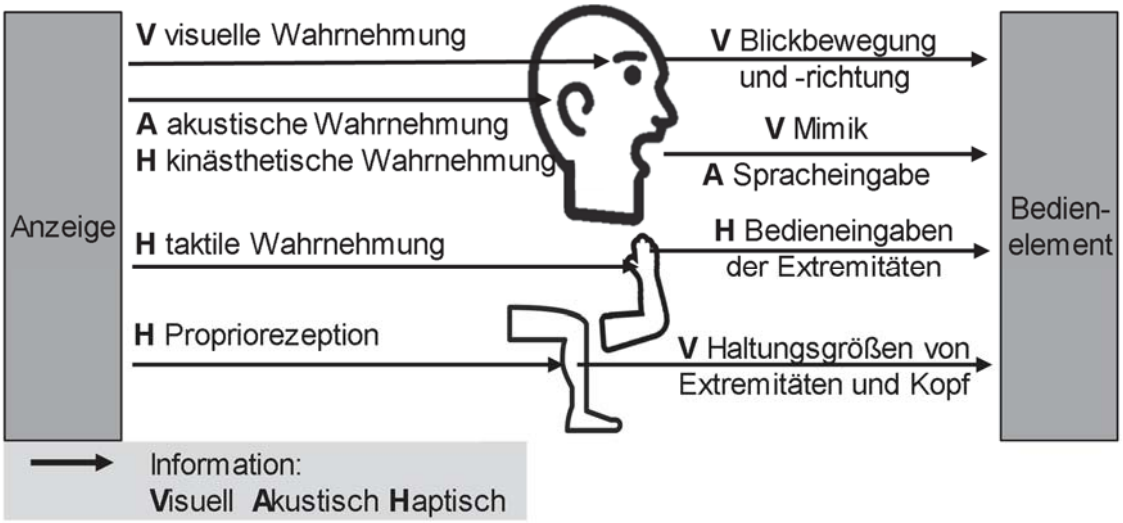


Abbildung 10: Mensch-Maschine Interaktion zwischen Anzeige, Fahrer und Bedienelement (nach Winner et al. 2012, S. 35)

Für ein detailliertes Verständnis der technischen Funktionsweise von Anzeigen und Bedienelementen wird auf das nachfolgende Kapitel 3.1.2 verwiesen.

Der Begriff der **Multimodalität** wird verwendet, wenn mehrere menschliche Sinneswahrnehmungen an einer Wahrnehmungsleistung beteiligt sind (Hagendorf 2011, S. 160). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieser Begriff auf die maschinelle Wahrnehmung erweitert und damit wie folgt verstanden:

Multimodalität liegt vor, wenn mehrere menschliche Sinneswahrnehmungen **oder** maschinelle Wahrnehmungen zur Übermittlung von Informationen gleichzeitig verwendet werden.

Die Berücksichtigung aller Sinne sowie deren realitätsgetreue Simulation werden mit dem Begriff der **Immersion** verknüpft. Immersion beschreibt den Umfang, zu dem eine Anzeige in der Lage ist, den Sinnen eines Nutzers eine Illusion der Realität zu Verfügung zu stellen (nach Slater und Wilbur 1997, S. 605). Die Fähigkeit, einer computerbasierten Anzeige Immersion zu erzeugen, hängt von vier Faktoren ab (Regenbrecht 2004, S. 31; Slater und Wilbur 1997, S. 605ff):

1. Der Anzahl der unterstützten Sinnesmodalitäten.
2. Dem Abbildungsumfang der unterstützten Sinnesmodalitäten.
3. Der Abbildungsqualität der unterstützten Sinnesmodalitäten.
4. Der Fähigkeit der computerbasierten Anzeige, die umgebende Realität auszuschließen.

Präsenz beschreibt den „Bewusstseinszustand und das subjektive Erleben eines Nutzers, sich in der realen anstelle der virtuellen Umgebung zu befinden“ (nach Regenbrecht 2004, S. 30; Reich 2017, S. 12). Es wird postuliert, dass ein höherer Grad an Präsenz in einer virtuellen Testumgebung die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass der Nutzer sich in dieser ähnlich verhält wie in einer realen, vergleichbaren Umgebung. Ein hohes Präsenzerleben ist die Grundlage dafür, einen Wissenstransfer von einer virtuellen in eine reale Umgebung vorzunehmen (Reich 2017, S. 13). Insbesondere im Bereich der Lernforschung zeigen Studien Zusammenhänge zwischen Verständnis und Präsenz in der Arbeit mit virtuellen Umgebungen auf (nach Roy und Schlemminger 2014, S. 193ff). Weiterhin kann gezeigt werden, dass eine Steigerung der Immersion einer Testumgebung, beispielsweise durch Hinzufügen einer Stereo-Fähigkeit einer Anzeige, das Präsenzerleben des Menschen in dieser steigert (nach Roy und Schlemminger 2014, S. 196–198; Reich 2017, S. 76; Ragan 2010, S. 537–538).

Kapitel 3

Stand der Technik

It is change, continuing change, inevitable change, that is the dominant factor in society today. No sensible decision can be made any longer without taking into account not only the world as it is, but the world as it will be.

(Asimov 1978)

3 Stand der Technik

Das folgende Kapitel dient der Beschreibung des **Standes der Technik** und untergliedert sich in vier Teilbereiche. Zunächst wird der Gegenstand dieser Arbeit, das technische Fahrerassistenzsystem (FAS), sowohl hinsichtlich dessen Stand der Technik als auch zukünftiger Entwicklungen beschrieben. Es folgen Erläuterungen zum Verständnis von FAS Entwicklungsprozessen sowie von dort durchgeführten Testverfahren. Anschließend erfolgt die detaillierte Beschreibung des Vorgehens zur Integration und Test von FAS im industriellen FAS Entwicklungsprozess. Ein wichtiger Bestandteil dieses Testvorgehens ist das Thema Beherrschbarkeit, auf das gesondert eingegangen wird. **Abbildung 11** zeigt die Verortung des Kapitels in den Kontext der Arbeit.

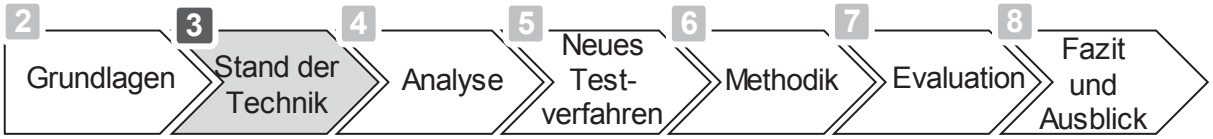


Abbildung 11: Verortung des Kapitels „3. Stand der Technik“ in der Arbeit

3.1 Das technische Fahrerassistenzsystem

Der Begriff **Fahrerassistenzsystem (FAS)** bezeichnet in seiner sprachlichen Bedeutung ein technisches System, das dem Fahrer eines Kraftfahrzeugs assistiert (Winner et al. 2012, S. 55). Das FAS unterstützt den Fahrer auf dessen Wunsch bei bestimmten Teilen der Fahrzeugführungsaufgabe und entlastet ihn von dedizierten Teilaufgaben. Dazu können bestimmte FAS dem Fahrer in kritischen Situationen durch einen Eingriff helfen, den Wunsch nach sicherer Bewältigung der Fahrt umzusetzen (Winner et al. 2012, S. 55). FAS dienen der Unterstützung des Fahrers durch Bereitstellung von Informationen, aber auch mittels direkter Eingriffe, beispielsweise in Bremse und Lenkung, mit dem Ziel einer Steigerung von Komfort und Sicherheit (Borgeest 2010, S. 335). Das FAS dient „der Unterstützung des Fahrers in allen Verkehrssituationen, mit dem Ziel, ihm ein entspanntes, stress- und unfallfreies Fahren zu ermöglichen“ (Braess und Seiffert 2012, S. 930). Der im Rahmen des Forschungsprojektes RESPONSE 3 erarbeitete „Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS“ fasst die Charakteristika, die ein FAS auszeichnen, wie folgt zusammen (Response Consortium 2009, S. 4): FAS **unterstützen** den Fahrer in seiner primären Fahraufgabe. FAS **informieren und warnen** den Fahrer, geben **Feedback** zu Handlungen, **verbessern den Komfort** und **reduzieren die Belastung** durch eine aktive Stabilisierung und Steuerung des Fahrzeugs. FAS **assistieren** dem Fahrer, gehen diesem also bei seinen Fahrtätigkeiten nach dessen Anweisungen zur Hand (nach duden.de 2017d). Die FAS übernehmen aber nie vollständige Kontrolle über die Fahraufgabe, die Verantwortung für diese verbleibt beim Fahrer.

In seiner Maximalausprägung – auch als Advanced Driver Assistant System (ADAS), also als „erweitertes Fahrerassistenzsystem“ bezeichnet – ist das FAS durch fünf charakteristische Eigenschaften gekennzeichnet (Response Consortium 2009, S. 4): Einer Unterstützung des Fahrers in seiner primären Fahraufgabe. Der Bereitstellung von aktiver lateraler und/oder longitudinaler Unterstützung mit oder ohne Warnung des Fahrers. Einer Erfassung und Evaluation der Fahrzeug-Umgebung. Einer Nutzung komplexer Signalverarbeitung, sowie einer direkten Interaktion zwischen Fahrer und System.

3.1.1 Stand der Technik von Fahrerassistenzsystemen

Wie zu erkennen ist, wird der Begriff „Fahrerassistenzsystem“ in verschiedenen Bedeutungen verwendet und umfasst einen großen Umfang an verschiedenen Systemen. Mit dem Ziel, das System FAS zu verstehen und in eine allgemein gültige Systemdarstellung zu bringen, wird im Rahmen der Arbeit eine Recherche bezüglich der Bezeichnungen, der Wirkweise sowie des technischen Systemaufbaus heutiger FAS durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden Fachbücher und Fachzeitschriften sowie die Online-Konfigurationsportale verschiedener Fahrzeughersteller ausgewertet (Audi Online Konfigurator 2017; BMW Online Konfigurator 2017; Volkswagen Online Konfigurator 2017; Mercedes Benz Online Konfigurator 2017; Opel Online Konfigurator 2017; Renault Online Konfigurator 2017; Toyota Online Konfigurator 2017; Volkswagen Online Konfigurator 2017; Response Consortium 2009; Winner et al. 2012; Schmitt et al. 2014; VanWashenova 2016).

Das Ergebnis dieser Recherche zeigt eine große Anzahl verschiedener Systeme. Um diese hinsichtlich ihrer Anwendung, ihres Zweckes oder auch ihrer Charakteristik zu unterscheiden, sind verschiedene Differenzierungen gebräuchlich. Zum einen **systemorientierte Differenzierungen**: Eine Kategorisierung findet anhand eines charakteristischen Systemelements, wie beispielsweise des Sensors oder des Aktors statt. Bei der Differenzierung nach dem wirkenden Aktor wird zwischen Aktoren der Richtungssteuerung sowie der Geschwindigkeitssteuerung unterschieden. FAS können in das Lenksystem, das Bremssystem oder die Motorsteuerung eingreifen (Winner et al. 2012, S. 392, S. 445). Eine Differenzierung hinsichtlich der Methode der Informationsbeschaffung liefern Braess und Seiffert (Braess und Seiffert 2012, S. 769):

1. FAS, die auf dem Fahrzeugzustand erfassenden Sensoren basieren,
2. FAS, die auf das Umfeld erkennenden Sensoren basieren und
3. vernetzte FAS, die auf Car2X Systemen basieren

Auf der anderen Seite unterscheiden **funktionsorientierte Differenzierungen** zwischen passiven/informierenden und aktiven/eingreifenden FAS (Seiffert und Rainer 2008, S. 21). Auch der Grad der Intervention dient als Kriterium und führt zu einer Unterteilung in informierende, warnende, assistierende, teilautonome und vollautonome FAS (Schmitt et al. 2014, S. 50). Institutionen wie die deutsche Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die US-Amerikanischen National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) sowie die Society of Automotive Engineers (SAE) differenzieren jeweils zwischen verschiedenen „Level der Automatisierung“. Die nachstehende **Tabelle 2** zeigt die fünf Level der Automatisierung nach Definitionen der SAE und beschreibt die Aufgabenteilung und die Aufteilung der Verantwortlichkeit zischen Fahrer und FAS (SAE J3016).

Weiterhin sind **gemischte Differenzierungs-Ansätze** gebräuchlich. So können FAS in fünf verschiedene Grundtypen differenziert werden (Braess und Seiffert 2012, S. 930): Erstens Fahrerinformationssysteme zur Information des Fahrers oder Navigation. Zweitens Car2X-Systeme zur Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug oder Fahrzeug zu Infrastruktur. Drittens FAS zur Fahrzeugstabilisierung, die den Fahrer in der primären Fahraufgabe unterstützen, indem sie das Fahrzeug aktiv beeinflussen. Viertens prädiktive Fahrerassistenzsysteme, die vorausschauend Objekte und Situationen im Umfeld des Fahrzeugs erkennen und Unfallvermeidende oder unfallmildernde Maßnahmen einleiten. Sowie fünftens FAS zur Erkennung des Fahrerzustands zur adaptiven Gestaltung von Warnungen und Eingriffen.

Tabelle 2: Level der Automatisierung von Fahrerassistenzsystemen (nach SAE J3016)

Level	Name	Beschreibung
0	Keine Automatisierung	Keine Intervention des FAS, nur Warnung. Der Fahrer hat immer die Kontrolle über das Fahrzeug.
1	Fahrer-Assistenz	Das FAS kann entweder Lenkung oder Geschwindigkeitssteuerung übernehmen. Der Fahrer muss das jeweils andere kontrollieren, überwacht permanent und kann jederzeit die volle Kontrolle übernehmen.
2	Partielle Automatisierung	Das FAS übernimmt Lenkung und Geschwindigkeitssteuerung in einem definierten Anwendungsfall. Der Fahrer überwacht permanent und kann jederzeit die volle Kontrolle übernehmen.
3	Bedingte Automatisierung	Das FAS übernimmt Lenkung und Geschwindigkeitssteuerung in einem definierten Anwendungsfall, überwacht permanent und informiert den Fahrer. Dieser kann nach kurzer Zeit die Kontrolle übernehmen.
4	Hohe Automatisierung	Das FAS übernimmt volle Fahraufgabe in einem definierten Anwendungsfall. Der Fahrer ist während des Anwendungsfalles nicht erforderlich.
5	Volle Automatisierung	Das FAS übernimmt voll Fahraufgabe für alle Anwendungsfälle. Der Fahrer ist nicht mehr erforderlich.

Die Ergebnisse der Recherche zeigen, dass die Mehrheit der heutigen FAS dem SAE Level 0 nach SAE J3016 zuzurechnen sind. Dahingegen existieren FAS der Automatisierungslevel 1 und 2 bisher nicht in großer Varianz. FAS der Automatisierungslevel 3 und höher existieren heute noch nicht am Markt. Aus diesem Grund wurde zur Darstellung der Ergebnisse der Recherche ein **vierstufiger, gemischter Kategorisierungs-Ansatz** gewählt:

[1] Funktionsorientierte Differenzierung über den Level der Automatisierung nach SAE J3016,
[2] Systemorientierte Differenzierung über das Systemelement der Informationsbeschaffung,
[3] Systemorientierte Differenzierung über das Systemelement des Eingriffes in die Fahraufgabe,
[4] Systemorientierte Differenzierung über das Systemelement der Anzeige.

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse aus der Recherche kategorisiert nach diesem Ansatz. Da die Namensgebung der Systeme oftmals herstellerspezifisch ist, orientiert sich die Kategorisierung an der untersuchten Literatur (Response Consortium 2009; Winner et al. 2012; Schmitt et al. 2014; VanWashenova 2016). Auch existieren verschiedene Ausprägungen und Varianten, bei denen nicht alle Systemelemente verbaut sind: Verschiedene Systemelemente sind entsprechend optional für das jeweilige FAS.

Tabelle 3: Übersicht über heutige FAS aus der Recherche

SAE Level	Bezeichnung Fahrerassistenzsystem	Informations-Beschaffung				Eingriff			Anzeige		
		Fahrzeug-Sensor	Umfeld-Sensor	Fahrer-Sensor	Car2X	In Bremssystem	In Lenksystem	In Motorsteuerung	Visuell	Akustisch	Haptisch
0	Fahrzeugzustands-Überwachung	x							x		
0	Fahrzeugdynamik-Anzeige	x							x		
0	Nachtsicht-Assistent		x						x		
0	Toter-Winkel Erkennung		x						x		
0	Sicherheitsabstand-Warner		x						x	x	
0	Verkehrszeichenerkennung		x						x	o	
0	Bremslichterkennung		x						x	o	
0	Fußgängererkennung		x						x	o	
0	Fahrrad-Erkennung		x						x	o	
0	Querverkehr-Erkennung / Kreuzungsassistent		x						x	o	
0	Parkhilfe/ Parkdistanzkontrolle		x						x	x	
0	Spurhalteassistent (warnend)		x								x
0	Spurwechselassistent (warnend)	x	x						x		o
0	Fahrerüberwachung		o	x					x		
0	Navigationssystem				o				x	x	
0	Elektronische Stabilitätskontrolle ESP	x				x		o	o		
0	Antiblockiersystem ABS	x				x			o		
0	Traktionskontrolle	x				o		o			
0	Berganfahr- und Bergabfahrassistent	x				x					
0	Tempomat	x						x	x		
0	Bremsassistent	x	x			x			o		
1	Kollisionsvermeidungssystem	x	x			x			o		
1	Adaptiver Geschwindigkeitsregler	x	x			x		x	o		
1	Spurhalteassistenz (Aktiv)	x	x				x				o
1	Spurwechselassistent (Aktiv)	x	x				x				o
2	Einpark-/Parkplatzassistent	x	x			x	x	x	x	x	
2	Ausparkassistent	x	x			x	x	x	x	o	
2	Stauassistent	x	x			x	x	x	x	o	

Legende: **x**: Erforderlich, **o**: Optional

Es ist erkennbar, dass „Eingriffe des Systems“ über das Bremssystem, die Lenkung oder die Motorsteuerung sowohl bei SAE Level 0 als auch bei SAE Level 1 und SAE Level 2 Systemen auftreten können. Dies kann wie folgt erklärt werden: Quer- und

längsdynamisch dienen der Erfüllung von Aufgaben der sekundären Fahrzeugführung (Negele 2007, S. 15). Die Fahrzeugstabilisierung (z. B. durch ESP, ABS, Traktionskontrolle), das Halten von Regelgrößen (z. B. Berganfahr- und Bergabfahrassistent, Tempomat) sowie die Vorbereitung weiterer Eingriffe (z. B. Aufbau eines Bremsdruckes bei dem Bremsassistenten) sind der primären Fahraufgabe sowie der Unterstützung dieser zuzurechnen. Diese Systeme sind trotz Eingriff keine Level 1 Systeme nach SAE-Definition. Bei SAE Level 1 und SAE Level 2 Systemen werden hingegen Lenkung, Bremse oder Motorsteuerung kontinuierlich auf Basis der gesammelten Informationen geregelt, die Eingriffe fallen im Kontext der Fahrzeugführung umgebungs- und situationsbedingt an.

Weiterhin ist erkennbar, dass heutige FAS zur Informationsbeschaffung primär auf Fahrzeug- und Umgebungs-Sensorik setzen, Sensoren zur Fahrerüberwachung oder Car2X-Kommunikation werden nur vereinzelt eingesetzt. So wird Car2X-Kommunikation derzeit nur für Navigationssysteme zur Bereitstellung aktuellen Kartenmaterials zur Routenfindung eingesetzt. Anstelle spezifischer Sensoren bedienen sich heutige Systeme zur Fahrerüberwachung oft indirekter Messverfahren über Fahrzeug- und Umfeld-Sensoren (Winner et al. 2012, S. 183).

3.1.2 Aufbau von Fahrerassistenzsystemen

Den Ausführungen folgend, ist das FAS als Subsystem in das Gesamtsystem Fahrzeug eingebettet und kann aus Kombinationen der folgenden fünf charakteristischen Systemelemente und Subsysteme bestehen:

I. Steuerung für die komplexe Signalverarbeitung.
II. Sensorik für die Erfassung und Evaluation des Fahrzeug-Umfeldes sowie des Fahrzeugs und dessen Verhalten.
III. Car2X-System für die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur.
IV. Aktorik für die aktive Unterstützung der lateralen oder longitudinalen Steuerung des Fahrzeugs.
V. Mensch-Maschine Schnittstellen (MMS),
    a. Anzeigen zur Kommunikation vom FAS zum Fahrer sowie
    b. Bedienelemente zur Kommunikation vom Fahrer zum FAS.

Das FAS tauscht über eingehende und ausgehende Flüsse Material, Information beziehungsweise Energie mit den umgebenden Systemen Fahrumgebung, Fahrzeug, Fahrer und Fremdfahrzeug/Infrastruktur aus.

Abbildung 12 zeigt die charakteristischen Systemelemente und Subsysteme sowie die in diese und umgebenden Systemen eingehenden und ausgehenden Flüsse.

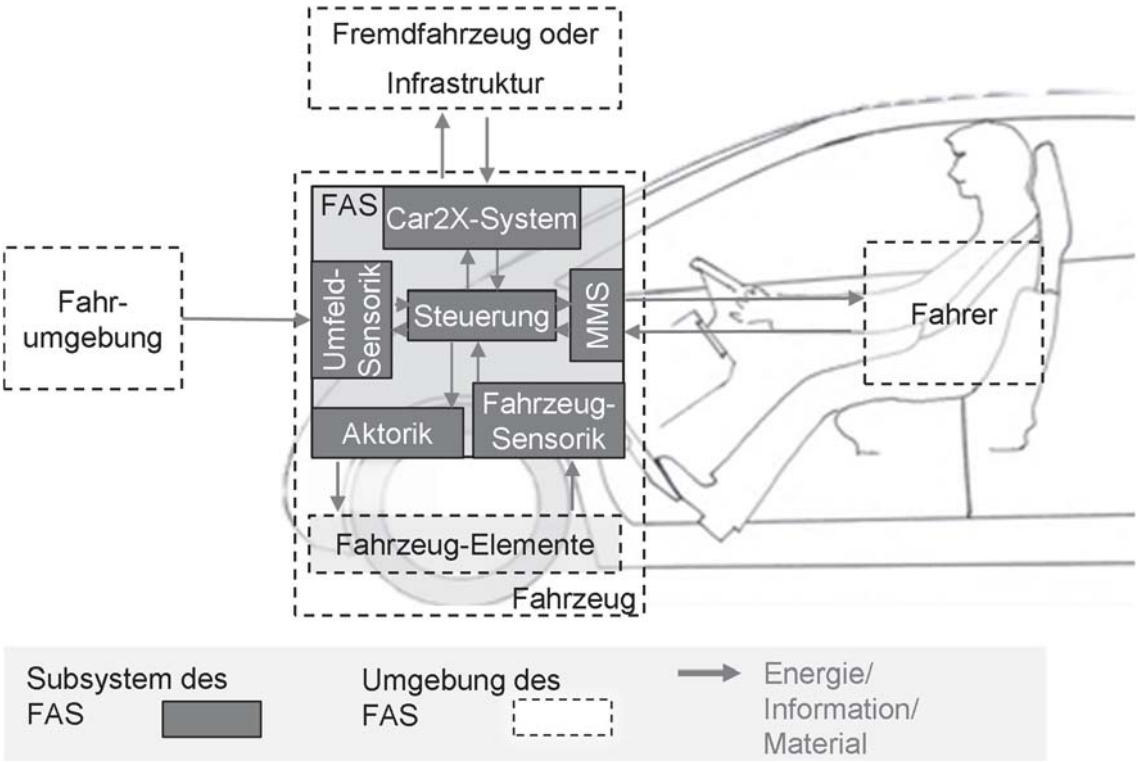


Abbildung 12: Allgemeine Systemdarstellung von Fahrerassistenzsystemen

Die folgenden Abschnitte dienen der Beschreibung der einzelnen charakteristischen Systemelemente und Subsysteme und deren technischen Gestaltung, um ein aussagekräftiges Verständnis des Systems „Fahrerassistenzsystem“ sowie der spezifischen Flüsse zu erlangen.

I. Steuerung von Fahrerassistenzsystemen

Eine Steuerung dient dem Empfang von digitalen elektrischen Signalen, der Interpretation dieser Signale mit einprogrammierten mathematischen Formeln und Kennfeldern und, wenn erforderlich, der Berechnung der Ansteuersignale für die Aktoren (Reif 2011, S. 197; Wiesinger 2017). Aus steuerungs- und regelungstechnischer Sicht ist es nachrangig, ob die Steuerungs- und Regelungsfunktion durch ein mechanisches, hydraulisches, elektrisches oder elektronisches System realisiert sind (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 39). Im Fahrzeugbau bietet jedoch die Realisierung von Steuerungs- und Regelungsfunktionen durch elektronische Steuergeräte in Kombination mit mechanischen, elektrischen oder hydraulischen Komponenten viele Vorteile: Dies können beispielsweise ein niedriges Gewicht, eine hohe Zuverlässigkeit oder geringere Kosten sein. Daher wird diese Realisierungsform zumeist bevorzugt (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 39). Das Steuerungsprogramm ist auf einem integrierten Speicher abgelegt und wird durch einen Mikrocontroller ausgeführt. Einem Mikrocontroller fehlen diverse Funktionen eines PC-Mikroprozessors (zum Beispiel für Multimedia-Anwendungen), dafür verfügt er über zusätzliche Funktionseinheiten, die er für Steuerungs-oder Regelungsaufgaben benötigt, zum Beispiel integrierte Analog-Digital-Wandler und pulsweitenmodulierte Ausgänge (Borgeest 2010, S. 114). Diese Bauteile bilden die Steuerungs-Hardware und sind in dem technischen Bauteil **Steuergerät** implementiert (Reif 2011, S. 197). **Abbildung 13** zeigt den Aufbau des FAS Subsystems „Steuerung“.

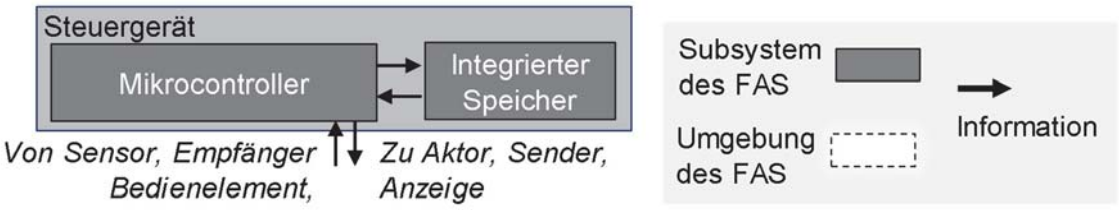


Abbildung 13: Aufbau des FAS Subsystems „Steuerung“

Ein Steuergerät besitzt Kommunikationsschnittstellen zu anderen Steuergeräten und zu externen Geräten (Borgeest 2010, S. 111). Die Informationen, die durch das Steuerungsprogramm verarbeitet werden, kommen von anderen Subsystemen des FAS, beispielsweise Sensoren, Empfängern von Car2X-Systemen oder Bedienelementen. Die verarbeiteten Informationen werden in Form von Ansteuerungssignalen an andere Subsysteme, beispielsweise Aktoren, Sendern von Car2X-Systemen oder Anzeigen, ausgegeben.

II. Sensoren von Fahrerassistenzsystemen

Sensoren werden nach bestimmten charakteristischen Merkmalen differenziert. Um die Bandbreite an verschiedenen Sensoren zu erfassen, ist zunächst die Differenzierung anhand des physikalischen Effekts, auf dem der Sensor basiert, gebräuchlich (Reif 2011, S. 250). Es wird zwischen resistiven, induktiven, kapazitiven, ladungserzeugenden, spannungserzeugenden, fotoelektrischen und faseroptischen Effekten sowie Wärmetönungseffekten und Wellenausbreitungseffekten unterschieden. Damit gekoppelt ist die Wirkweise des Sensors. Es wird beispielsweise zwischen Sensoren auf Basis des piezoelektrischen Effekts, Radarsensoren auf Basis von Mikrowellen, Lidarsensoren auf Basis von Ultraviolett-, Infrarot- oder Strahlen aus dem Bereich des sichtbaren Licht oder Kamerasysteme, die auf opto-elektrischen Effekten basieren, unterschieden (Winner et al. 2012, S. 110–189). Die gemessene Größe ist ein weiteres Differenzierungskriterium. So kann eine Kategorisierung in Positionssensoren mit Weg-/Winkelpositionen als direkte oder indirekte Messgrößen, Drehzahl- und Geschwindigkeitssensoren, Drucksensoren, Kraft- und Drehmomentsensoren, Durchflussmesser, Gassensoren und Konzentrationssonden, Temperatursensoren sowie Bildsensoren erfolgen (Reif 2011, S. 254–332). Damit gekoppelt sind Differenzierungen nach Einsatzgebiet des Sensors gebräuchlich, beispielsweise dem Einsatz für Einparkassistenz oder Geschwindigkeitsmessung (Winner et al. 2012, S. 98). Andere Ansätze differenzieren nach Aufgaben und Anwendung der Sensoren, beispielsweise in funktionelle Sensoren, Sensoren für Sicherheit und Sensoren für die Überwachung des Fahrzeugs (Reif 2011, S. 237). Auch können Sensoren an der Art ihres Ausgangssignals – und damit an dem für die Steuerung nutzbaren Signals – in diskrete oder analoge Sensoren unterteilt werden (Reif 2011, S. 238). Der für die Informationsbeschaffung und -auswertung in FAS jeweils eingesetzte Sensortyp richtet sich nach den Erfordernissen der spezifischen Anwendung, beispielsweise der Reichweite, der erforderliche Messgenauigkeit oder der Messqualität bei Nacht, aber auch nach Kriterien wie der Verbaubarkeit oder dem Preis des Sensors (Wisselmann et al. 2014, S. 2). **Tabelle 4** gibt einen Überblick über den Stand der Technik von Fahrzeug-Sensoren sowie Umfeld-Sensoren für FAS. Diese korreliert mit der jeweiligen Messgröße sowie dem Gegenstand und Ziel der Messung. Die abgebildeten mechatronischen Sensoren basieren auf der Interaktion mechanischer, elektrostatischer, elektromagnetischer oder akustischer Felder (Kaltenbacher 2015, S. 1). Die Übersicht baut auf den Ausführungen von Reif (Reif 2011) sowie Winner (Winner et al. 2012) auf.

Tabelle 4: Sensoren heutiger Fahrerassistenzsysteme

	Sensortyp	Messgröße(n)	Anwendung
Fahrzeug-Sensoren	Drehzahl-Sensor	Winkel pro Zeiteinheit	Raddrehzahl, Kurbel- und Nockenwellendrehzahl zur Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit, Drehwinkelsensor
	Schwingungs-Gyrometer	Drehrate um „sensitive Achse“	Erfassung von Winkelbewegungen um die verschiedenen Fahrzeugachsen z. B. zur Detektion der Bewegung um die Hochachse des Fahrzeugs
	Beschleunigungs-Sensor	Beschleunigung	Erfassung der Fahrzeug-Beschleunigung, Aufbau-Beschleunigungen
	Druck-Sensor	Membrandruck	Bremsdruck in Haupt- und Radzylinder
	Kraft-Sensor	Dehnung durch Krafteinfluss	Bremskrafterfassung bei elektrisch betätigten und elektronisch geregelten Bremssystemen
Umfeld-Sensoren	Ultraschall-Sensor	Laufzeit der Schallwelle	Distanzmessung für Ein-/ Ausparkassistent
	Radar-Sensor	Laufzeit Radarstrahlen	Distanz- und Relativgeschwindigkeitsmessung für adaptiven Geschwindigkeitsregler, Auffahrwarnung
	Lidar-Sensor	Laufzeit Ultraviolett- oder Infrarot-Licht	
	Bild-Sensor	Lichtverteilung oder Symmetrie von Objekten, Bewegung von Objekten	Erkennung von Objekten und deren Position, z. B. Fahrstreifen- und Verkehrszeichenerkennung
	PMD (Photonic Mixing Device) - Abstands-Sensor	Laufzeit Ultraschall, Mikrowelle, Lichtwelle und Korrelation mit 2D Bild	Erkennung von Objekten, deren Position und deren möglicher Trajektorie, z. B. für Fußgänger-/ Fahrrad-Erkennung

Steuerungen arbeiten digital, entsprechend wird für analoge und pulsförmige Eingangssignale von Sensoren und Schnittstellen eine Signalwandlung durch einen Signalwandler benötigt (Reif 2014, S. 101). Dazu ist gegebenenfalls eine Signalaufbereitung sowie eine Signalverstärkung erforderlich (Reif 2014, S. 98–99). Entsprechend können dem Subsystem Sensor die folgenden vier Bauelemente zugeordnet werden (Bieser 2007, S. 36): Messfühler, Signalaufbereitung, Signalwandler und Signalverarbeitung. Die zumeist elektronischen Bauelemente für diese Aufgaben werden unterschiedlich verbaut. So können alle vier Bauelemente zusammen in dem Bauteil Sensor verbaut sein. Die Bauelemente zur Signalaufbereitung, Signalwandler und Signalverarbeitung können aber auch in einem separaten Sensor-Steuergerät implementiert werden (Reif 2014, S. 101; Bieser 2007, S. 36). Dieser in **Abbildung 14** dargestellte Aufbau stellt den im Stand der Technik von FAS gebräuchlichsten Aufbau des FAS Subsystems „Sensor“ dar (nach Bieser 2007, S. 36).

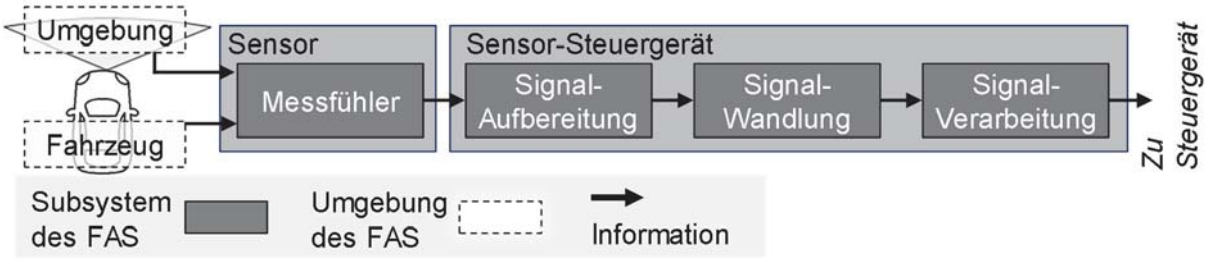


Abbildung 14: Aufbau des FAS Subsystems „Sensor“

In diesem Aufbau ist das Bauelement Messfühler zur Erfassung der Messgröße dem Bauteil **Sensor** zugeordnet. Das Bauteil **Sensor-Steuergerät** beinhaltet die Elemente Signalaufbereitung, Signalwandlung und Signalverarbeitung. Das verarbeitete Ausgangssignal geht an das Steuergerät.

III. Aktoren von Fahrerassistenzsystemen

Aktoren zeichnen sich durch einen mehrteiligen Aufbau aus. So verstärkt ein **Energiesteller** ein elektrisches Stellsignal (der Steuerung) mit Hilfe von Hilfsenergie, je nach Aktor-Typ elektrische, pneumatische oder hydraulischer Energie, zur einer für den Energiewandler, also den eigentlichen **Aktor**, nutzbaren Energie (Beitz und Grote 2001, I4). Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, können Aktoren von FAS nach Art ihres Eingriffs in Aktoren zum **Eingriff in das Lenksystem**, das **Bremssystem** oder die **Motorsteuerung** unterschieden werden. Aktoren basieren auf der Interaktion mechanischer, elektrostatischer, elektromagnetischer oder akustischer Felder (Kaltenbacher 2015, S. 1). Für den Lenkeingriff sind hydraulische sowie elektrisch wirkende Aktoren gebräuchlich (Winner et al. 2012, S. 287). Hydraulische Aktoren in Lenksystemen erzeugen einen Hydraulikdruck im Lenksystem und wirken auf das bestehende System zur Lenkkraftunterstützung, die hydraulische Servolenkung, ein. Auch für Bremssysteme werden hydraulische und elektrische Aktoren eingesetzt (Winner et al. 2012, S. 271). Beim hydraulischen Bremssystemen wirkt der Hydraulikdruck des Aktors im Bremssystem auf die bestehende Brems-Aktorik konventioneller Bremssysteme ein (Winner et al. 2012, S. 250). Elektrische Brems-Aktoren wirken direkt auf die Bremsscheibe ein, der Bremskolben wird nicht mehr benötigt (Winner et al. 2012, S. 275). Elektrische Brems-Aktoren sind auch für die Betätigung der Feststellbremse als Parkbremse im Einsatz und wirken auf das vorhandene Bremssystem ein (Winner et al. 2012, S. 280). Erste, in den 1970’er Jahren eingeführte FAS zur Geschwindigkeitssteuerung regelten diese über einen mechanischen Eingriff in die Stellung der Drosselklappe (Braess und Seiffert 2012, S. 216). Seit der flächendeckenden Einführung der Motorsteuerung über elektrische Fahrpedale, wird dieses fahrzeugeigene System auch für FAS zur Geschwindigkeitssteuerung eingesetzt (Winner et al. 2012, S. 479). **Abbildung 15** zeigt den Aufbau des FAS Subsystems „Aktor“.

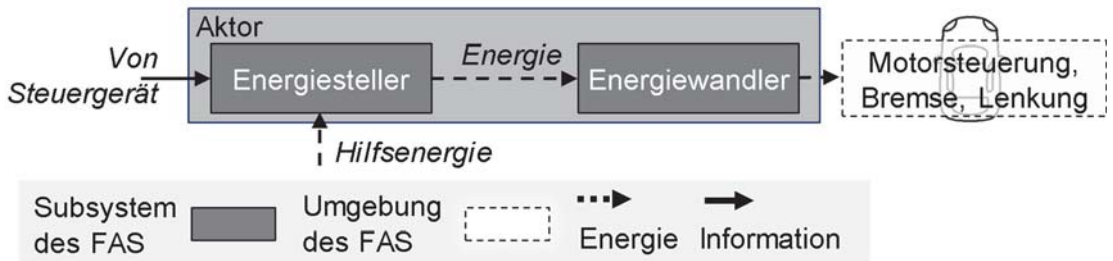


Abbildung 15: Aufbau des FAS Subsystems „Aktor“

IV. Car2X-Kommunikation von Fahrerassistenzsystemen

Mit dem Begriff Car2X wird eine Reihe von Anwendungen bezeichnet, die auf dem Datenaustausch von Fahrzeugen untereinander und mit der Umgebungs-Infrastruktur basieren (Hoffmann 2010, S. 56; Borgeest 2010, S. 330). Es wird zwischen Car2Car-Systemen zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Car2Infrastructure-Systemen zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur unterschieden (Leschke und Weinert 2016, S. 10). Car2x-Systeme werden historisch auch durch die Begriffe Telematik oder Verkehrstelematik bezeichnet (Borgeest 2010, S. 329). Die Kommunikation kann direkt zwischen den Kommunikationspartnern oder indirekt, über einen externen Zugriffspunkt wie beispielsweise der Basisstation eines Mobilfunknetzes, erfolgen (Leschke und Weinert 2016, S. 10; Broy 2010, S. 47). Auch der Empfang von Positionsdaten in Form satellitengestützter GPS-Daten kann der Car2X-Kommunikation zugerechnet werden (Borgeest 2010, S. 329). **Abbildung 16** zeigt den Systemaufbau des FAS Subsystems „Car2X-Kommunikation“.

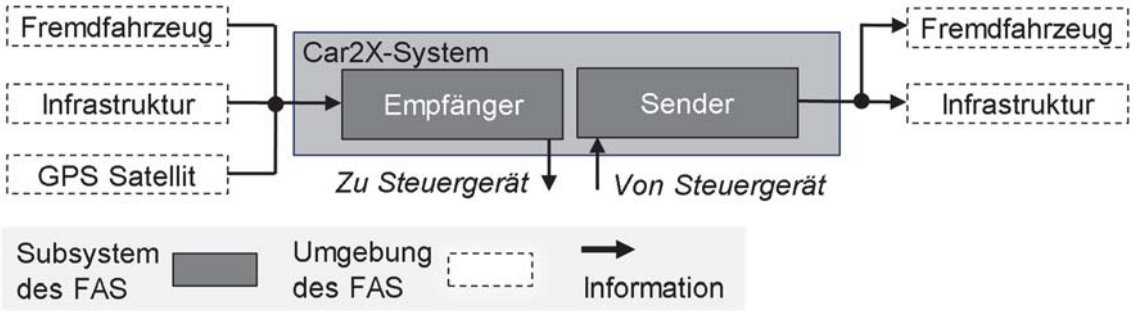


Abbildung 16: Aufbau des FAS Subsystems „Car2X- Kommunikation“

Durch einen **Empfänger** werden von den Kommunikationspartnern drahtlos gesendete Informationen aufgenommen, aufbereitet und gewandelt weitergegeben (Borgeest 2010, S. 330). Ausgehende Daten werden vom **Sender** gewandelt und drahtlos an die Kommunikationspartner gesendet. Car2X Systeme interagieren mit der Steuerung des FAS. Entsprechend verlaufen die Informationsflüsse zum und vom Steuergerät.

V. Mensch-Maschine Schnittstellen von Fahrerassistenzsystemen: Anzeigen

Zur Unterscheidung von Anzeigen existieren zwei grundlegende Ansätze. Entweder wird hinsichtlich der technischen Wirkweise der Anzeige unterschieden, oder hinsichtlich ihrer Wahrnehmung durch den Fahrer. Die technische Wirkweise unterscheidet FAS Anzeigen hinsichtlich der Darstellungsform der Signale (vergl. Winner et al. 2012, S. 317, 2012, S. 35; Bubb 2015, S. 273). Kriterien sind beispielsweise die technische Basis des Signals (z. B. analog vs. digital), die Art der übertragbaren Information (z. B. verbale vs. nonverbale Information) oder auch die Charakteristik der Schnittstelle, wie deren Form oder Dimensionalität (statische vs. bewegliche Skala) (Winner et al. 2012, S. 317; Bubb 2015, 275 ff). In der wahrnehmungsbasierten Unterscheidung ist die menschliche Wahrnehmung der Anzeige entscheidend. Für FAS Anzeigen sind dies die visuelle, akustische oder haptische Wahrnehmung der Anzeige durch den Fahrer (Winner et al. 2012, S. 317). Die nachfolgende Beschreibung folgt dem in der Literatur gängigeren Ansatz der wahrnehmungsbasierten Unterscheidung (vergl. Bubb 2015, S. 273; Negele 2007, S. 9; Winner et al. 2012, S. 273). Anzeigen werden im Folgenden unterteilt in visuelle, akustische und haptische Anzeigen. Technische Kriterien dienen der tiefergehenden Differenzierung.

Visuelle Anzeigen von FAS können in die vier Stufen der **digitalen, analogen, bildhaft situationsanalogen und kontaktanalogen Anzeigen** unterteilt werden (Bubb 2015, S. 276). Für digitale und analoge Anzeigen wird ein Kontinuum an Werten mit Bezug zur realen Welt in Segmente unterteilt (Bubb 2015, S. 276). Digitale Anzeigen zeigen nur den aktuellen Wert des Kontinuums an, in der Regel durch eine (Zustands-) Lampe oder eine Zahl. Beispiele für digitale Anzeigen sind die digitale, zahlenbasierte Geschwindigkeitsanzeige oder die Füllstands-Warnleuchte der Tankanzeige (nach Bubb 2015, S. 276–277). Analoge Anzeigen zeigen das Kontinuum zusammen mit einem Zeiger oder einem in der Länge oder Größe veränderlichen Element an. Dies können beispielsweise der zeigerbasierte Tachometer oder die eigentliche Füllstandanzeige des Tanks sein (nach Bubb 2015, S. 276–277). Bildhaft situationsanaloge Anzeigen zeigen ein stilisiertes Abbild der Umwelt, sind üblicherweise zweidimensional ausgeführt und werden in der Regel mittels Display dargestellt (Bubb 2015, 279, 280). Der vierte Typ der kontaktanalogen Anzeige ist durch die Anreicherungen eines reales Bildes der Umwelt mit künstlichen Informationen charakterisiert (Bubb 2015, S. 281). Auch diese Anzeigen basieren auf Displays, die ein mittels elektronischer Kamera aufgenommenes Bild anreichern. Auch sind sogenannten Head Up Displays gebräuchlich, mit denen Informationen auf eine transparente Fläche in das Sichtfeld des Nutzers projiziert werden (Bubb 2015, S. 413). Auf diesem Weg kann die durch die transparente Fläche sichtbare Umgebung mit künstlichen Informationen angereichert werden.

Akustische Anzeigen von FAS können in **verbale** sowie **nonverbale Anzeigen** aufgeteilt werden (nach Winner et al. 2012, S. 284; Bubb 2015, S. 284). Verbale Anzeigen transportieren die Information über Sprache, nonverbale Anzeigen transportieren die Information über die Frequenz des Tons beziehungsweise Frequenz-Zusammensetzung eines Geräusches (Bubb 2015, S. 284).

Bei der Kategorisierung von **haptischen Anzeigen von FAS** kann zwischen der **Oberflächenhaptik**, der taktilen Wahrnehmung der Oberflächenqualität, sowie der **Betätigungshaptik**, der haptischen Rückwirkung eines Mechanismus, unterschieden werden (Bubb 2015, S. 285). Bei der Oberflächenhaptik spielt neben der Oberfläche des Objektes, die eher für subjektive Wahrnehmungsaspekte eine Rolle spielt, auch dessen Form eine Rolle. Diese verfügt über einen Anzeigecharakter, da Informationen über Position und Lage von haptischen Bedienelementen vermittelt werden. Die Betätigungshaptik wird durch den Kraft-Weg-Verlauf eines Bedienelementes charakterisiert (Bubb 2015, S. 288). Es kann zwischen rotatorischen und translatorischen Bedienelementen unterschieden werden. Zu den genannten **passiven**, nur nach Betätigung durch den Menschen Rückmeldung gebenden Anzeigen, werden noch die **aktiven** haptischen Anzeigen ergänzt. Diese werden durch Bubb und Winner an den Beispielen der Vibration am Lenkrad oder Sitz, eines Lenkradmomentes oder der aktiv Feedback gebenden Pedale erwähnt, jedoch nicht separat kategorisiert (vergl. Bubb 2015, S. 6; Winner et al. 2012, S. 549). Im Rahmen der Beispiele werden analog zu den passiven Anzeigen auch taktile und haptische Wirkungen auf den Menschen beschrieben. Im Rahmen der Arbeit wird diesem Verständnis gefolgt, es werden die Anzeigestufen der aktiven Oberflächenhaptik sowie der aktiven Betätigungshaptik verwendet. Entsprechend wird die Wahrnehmung durch eine Veränderung der Oberfläche sowie einer aktiven Kraft- oder Momenten-Rückwirkung eines rotatorischen oder translatorischen Bedienelementes auf den Menschen erreicht.

Für die Darstellung bildhaft situationsanaloger und kontaktanaloger visueller Anzeigen sind neben dem Eingangssignal der Steuerung zusätzlich **digitale Anzeigeinhalte** erforderlich. Dies können beispielsweise Bilder, Videos oder Aufnahmen von Kamera-Sensoren sein. Ebenso erfordert die Darstellung komplexer, akustischer Anzeigen, die

Bereitstellung von digitale Audioinformationen, beispielsweise über verbale Ton-Aufnahmen. Und auch aktive haptische Anzeigen können auf komplexen digitalen Anzeigeinhalten basieren, beispielsweise komplexe Vibrationssignale am Lenkrad oder am Pedal.

Damit kann das FAS Subsystem „Anzeige“, in **Abbildung 17** dargestellt, wie folgt zusammengefasst werden:

Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen dienen der Wandlung von digitalen, elektrischen Signalen einer Steuerung in für den Menschen wahrnehmbare visuelle, akustische oder haptische Signale. Durch Bereitstellung vordefinierter digitaler Anzeigeinhalte können komplexe Anzeigesignale für die visuelle, akustische und haptische Anzeige erzeugt werden.

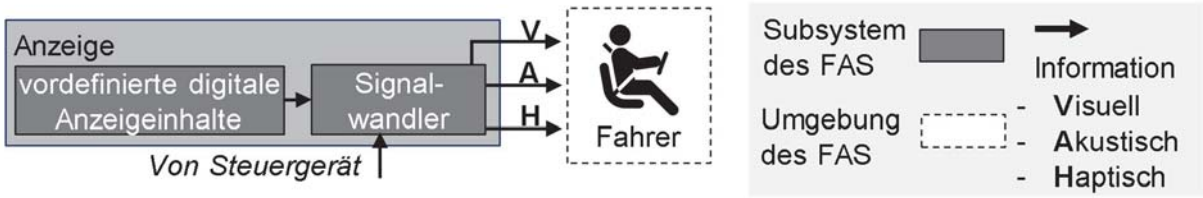


Abbildung 17: Aufbau des FAS Subsystems „Anzeige“

Eine Zusammenfassung über die verschiedenen Anzeigetypen, deren Anzeigestufen sowie deren Charakteristik und Darstellungsform, ist in **Tabelle 5** zu sehen. Dazu sind jeweils Anwendungsbeispiele für FAS gegeben. Diese beruhen auf einer Recherche in Fachbüchern (Winner et al. 2012; Bubb 2015) sowie Online-Konfigurationsportalen verschiedener Fahrzeughersteller (Audi Online Konfigurator 2017; BMW Online Konfigurator 2017; Volkswagen Online Konfigurator 2017; Mercedes Benz Online Konfigurator 2017; Opel Online Konfigurator 2017; Renault Online Konfigurator 2017; Toyota Online Konfigurator 2017; Volkswagen Online Konfigurator 2017).

Tabelle 5: Anzeigen heutiger Fahrerassistenzsysteme

Typ	Anzeige-Stufe	Charakteristik und Darstellungsform	Anwendungsbeispiele für Fahrerassistenzsysteme
Visuelle Anzeige	Digital	Darstellung eines Wertes eines mit der Umwelt verknüpften Kontinuums an Werten mittels Zahl oder Lichtanzeige	Warnlampen im Armaturenbrett und in der Instrumententafel, LEDs am Außenspiegel
	Analog	Darstellung des mit der Umwelt verknüpften Kontinuums an Werten mit einem in Winkelstellung oder Länge veränderlichen Element	Distanzanzeigen in Balkenform
	Bildhaft situations-analog	Darstellung eines stilisierten Abbildes der Umwelt mittels Displays	Abstandsanzeige von Einparkhilfe und Tempomat, Navigationsanzeige, Totwinkelwarnung im Außenspiegel
	Kontakt-Analog	Anreicherung des realen Bildes der Umwelt mit künstlichen Informationen, Darstellung mittels Displays	Bild-Anzeigen von Rückfahr-Assistenz, Head Up Display Überlagerungsanzeige des Nachtsichtassistenten

Typ	Anzeige-Stufe	Charakteristik und Darstellungsform	Anwendungsbeispiele für Fahrerassistenzsysteme
Akustische Anzeige	Nonverbal	Hinweis- beziehungsweise warnungsgebende Anzeige auf Basis von Tönen oder Geräuschen	Abstandsanzeige von Einparkhilfe
	Verbal	Detaillierte Informationen über Sprache gebende Anzeige	Navigationsanweisungen
Haptische Anzeige	Passive Oberflächen-Haptik	Anzeige der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Form durch Position und Lage von Bedienteilen	Lenkstockschalter, z. B. für Tempomat
	Passive Betätigungs-Haptik	Anzeige durch den Kraft-Weg Verlauf eines Bedienelementes mittels translatorischen oder rotatorischen Bedienelementen	Druckschalter für Zu-/ Abschaltung von FAS Funktionen
	Aktive Oberflächen-Haptik	Anzeige durch aktive Veränderung der Oberfläche sowie der Position und Lage von Bedienteilen	Vibration im Bremspedal durch ABS, Vibration im Lenkrad und Sitzfläche bei Spurhalteassistent
	Aktive Betätigungs-Haptik	Anzeige durch Kraft- oder Momenten-Rückwirkung durch aktive translatorische oder rotatorische Bedienelemente	Unterstützendes Lenkmoment bei Spurwechselassistent

VI. Mensch-Maschine Schnittstellen von Fahrerassistenzsystemen: Bedienelemente

Wie Anzeigen können auch Bedienelemente sowohl hinsichtlich ihrer technischen Wirkweise sowie ihrer Interaktion mit dem Fahrer unterschieden werden. Da unter dem Begriff Bedienelement in der Regel ein haptisches Bedienelement verstanden wird, orientieren sich die meisten technischen Ansätze auf diese „konventionell mechanisch“ zu betätigen Elemente (Bubb 2015, S. 291). Diese können nach der Wirkungsweise (digital oder analogwirkend), hinsichtlich der Bedienung (z. B. Finger- oder Fuß-Bedienung), der Bewegungsart oder auch der Dimensionalität, also der Anzahl der Freiheitsgrade des Bedienelements, klassifiziert werden. Auch ist die Einteilung nach der Anzahl der Bedienelemente pro Funktion, die Art der Rückmeldung (z. B. Kraft, Weg) oder die Art der Fahrzeugsteuerung in quer- und längsdynamisch wirkende Bedienelemente ist gebräuchlich (Winner et al. 2012, S. 316). Die menschzentrierte Unterscheidung differenziert dagegen nach der Art der Bedienung durch den Menschen zwischen visueller, akustischer oder haptischer Bedienung (vergl. Bubb 2015, S. 291). Es kann zwischen der direkten Eingabe (durch Hand/Arm oder Fuß/Bein), der Eingabe durch Bewegung, der Spracheingabe, der Eingaben durch Augenbewegung und Mimik/Gestik unterschieden werden (Winner et al. 2012, S. 316). Der Begriff „Mimik“ bezeichnet einen Wechsel im Ausdruck des Gesichts und in den Gebärden. Eine „Geste“ ist eine

„spontane oder bewusst eingesetzte Bewegung des Körpers, besonders der Hände und des Kopfes, die jemandes Worte begleitet oder ersetzt“ (duden.de 2017b, 2017a).

Da gängige technische Ansätze zur Klassifizierung wie beschrieben an der Berücksichtigung visueller und akustischer Bedienung scheitern, wird im Folgenden hinsichtlich Bedienabsicht des Fahrers unterschieden. Zur tiefergehenden Differenzierung dieser Bedienelement-Grundtypen werden technische Kriterien berücksichtigt.

Bedienelemente zur visuellen Erfassung einer Bedienabsicht können in Gesten erfassende, Augenbewegung erfassende sowie die Mimik erfassende Bedienelemente unterteilt werden (Winner et al. 2012, S. 316). Systeme zur Erfassung der Augenbewegungen erfassen und interpretieren die Blickbewegung und -richtung, gestenbasierte Bedienelemente die Haltungsgrößen der Extremitäten Hand/Arm, Fuß/Bein und des Kopfes des Fahrers. Die Informationen werden zumeist über Sensoren wie (Video-) Kameras und Infrarot-Sensorik erfasst und interpretiert (Bubb 2015, S. 273).

Bedienelemente zur akustischen Erfassung einer Bedienabsicht basieren auf Spracheingabe, also auf der Erfassung verbaler Eingabe von Befehlen durch die Nutzung von Schlüsselwörtern (vergl. Winner et al. 2012, S. 316; Bubb 2015, S. 300). Die Informationen werden über Sensoren wie Mikrofone erfasst (Bubb 2015, S. 273).

Bedienelemente zur haptischen Erfassung einer Bedienabsicht nutzen zum Steuern, Regeln, Schalten und Auslösen von Funktionen die Übertragung von Muskelkräften auf Maschinenteile (Bubb 2015, S. 291). Die Bedienelemente können nach den verschiedenen Kriterien Bedienung, Wirkungsweise, Bewegungsart, Dimensionalität, Arretierbarkeit und Integration kategorisiert werden und sind prinzipiell beliebig miteinander kombinierbar (nach Winner et al. 2012, S. 315–316; Bubb 2015, S. 284–285, 2015, S. 291–292). Die Bedienung unterscheidet nach der Extremität, die auf das Bedienelement einwirkt. Während die Wirkungsweise zwischen analoger und digitaler Codierung, also zwischen Bedienelementen, welche kontinuierlich veränderbare oder lediglich diskrete Zustände einnehmen können kategorisiert, differenziert das Kriterium der Bewegungsart nach der Art der Bewegung, also einer rotatorische oder translatorische Bewegung des Bedienelements. Die Dimensionalität beschreibt die Freiheitsgrade, in denen das Bedienelement bewegt werden kann, wobei diese durch eine Arretierbarkeit, also eine (zeitweise) Feststellung des Mechanismus, eingeschränkt werden kann. Integration beschreibt die Zusammenfassung von mehreren Bedienfunktionen in einem Bedienelement, indem entweder auf ein Bedienelement ein weiteres montiert wird oder Dimensionen eines mehrdimensionalen Bedienelementes unterschiedliche Funktionen zugeordnet sind.

Damit kann das FAS Subsystem „Bedienelement“, in **Abbildung 18** dargestellt, wie folgt zusammengefasst werden:

Bedienelemente von Fahrerassistenzsystemen dienen der Wandlung von visuell, akustisch oder haptisch erfasster Bedienabsicht des Menschen an das System in ein für das technische System verständliches digitales, elektrisches Signal.

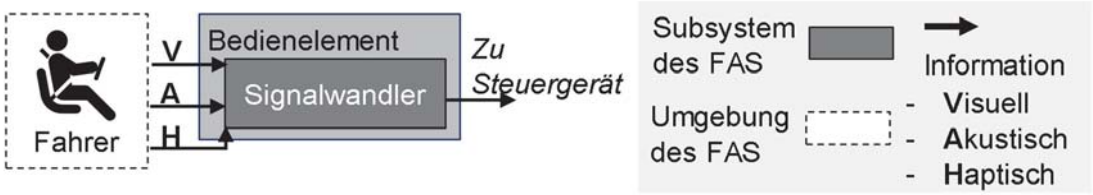


Abbildung 18: Aufbau des FAS Subsystems „Bedienelement“

Eine Zusammenfassung über die verschiedenen Bedienelemente, das für die Betätigung zuständige Handlungsorgan sowie deren Charakteristik und Darstellungsform ist in **Tabelle 6** dargestellt. Die Zusammenfassung beruht auf einer Recherche in Fachbüchern (Winner et al. 2012; Bubb 2015) sowie Online-Konfigurationsportale verschiedener Fahrzeughersteller (Audi Online Konfigurator 2017; BMW Online Konfigurator 2017; Volkswagen Online Konfigurator 2017; Mercedes Benz Online Konfigurator 2017; Opel Online Konfigurator 2017; Renault Online Konfigurator 2017; Toyota Online Konfigurator 2017; Volkswagen Online Konfigurator 2017).

Die Betätigung von FAS mit den Extremitäten Fuß oder Bein findet indirekt über die Pedalerie des Fahrzeugs, aber nicht über gesonderte Bedienelemente statt. So wird beispielsweise die Betätigung des Bremspedals für die Deaktivierung von Start/Stopp-FAS eingesetzt. Oder die Betätigung des Gaspedals für die Deaktivierung eines Tempomaten. Für die Betätigung von Bedienelementen durch Gewichtsverlagerung gibt es bisher keine praktische Anwendung im Fahrzeug. Für die direkte Bedienung von FAS hat die Hand/Arm-Eingabe eine übergeordnete Bedeutung (Winner et al. 2012, S. 316). Aufgrund dessen wird zwischen der analogen und digitalen Translations- und Rotationsbewegung von Hand und Arm unterschieden.

Der Touchscreen wird aufgrund seiner häufigsten technischen Umsetzung durch kapazitive oder induktive Erkennung der Berührung einer Oberfläche als haptisches Bedienelement klassifiziert (Meroth und Tolg 2008, S. 115). Die Bedienung kann neben dem eigentlichen digitalen Druck auf die Oberfläche auch durch eine sich analog in Rotation und Translation auf der Oberfläche bewegende Hand erfolgen.

Tabelle 6: Bedienelemente heutiger Fahrerassistenzsysteme

Typ	Handlungs-Organ	Charakteristik und Darstellungsform	Anwendungsbeispiele für Fahrerassistenzsysteme
Visuelle Bedienelemente	Gestik durch Extremitäten	Erfassung und Interpretation von Haltungsveränderungen der Extremitäten Hand/Arm und Fuß/Bein sowie Kopf	Navigations-Steuerung
	Augen-Bewegung	Erfassung der Blickbewegung und Blickrichtung des Auges	prototypische Anwendung für Fahrerüberwachung
	Mimik des Gesichts	Erfassung von Änderungen im Ausdruck des Gesichts und in den Gebärden	prototypische Anwendung für Fahrerüberwachung
Akustische Bedienelemente	Verbal	Erfassung verbaler Eingabe von digitalen Befehlen über die Nutzung von Schlüsselwörter	Navigations-Steuerung

Typ	Handlungs-Organ	Charakteristik und Darstellungsform	Anwendungsbeispiele für Fahrerassistenzsysteme
Haptische Bedienelemente	Analoge Translations-bewegung von Hand/Arm	Kontinuierlich veränderbar auf eine in Längsrichtung wirkende Muskelkraft reagierendes Bedienelement	Touchscreen-Bedienung, Kombinierter Dreh-Drucktaster zur zentralen Steuerung (u.a. Navigation)
	Digitale Translations-bewegung von Hand/Arm	In diskreten Zuständen auf eine in Längsrichtung wirkende Muskelkraft reagierendes Bedienelement	Touchscreen-Bedienung, Druckschalter und Drucktaster für Zu-/ Abschaltung von FAS Funktionen, Kombinierter Dreh-Drucktaster zur zentralen Steuerung (u.a. Navigation)
	Analoge Rotations-Bewegung von Hand/Arm	Kontinuierlich veränderbar auf eine drehend wirkenden Muskelkraft reagierendes Bedienelement	Touchscreen-Bedienung, Kombinierter Dreh-Drucktaster zur zentralen Steuerung (u.a. Navigation)
	Digitale Rotations-Bewegung von Hand/Arm	In diskreten Zuständen auf eine drehend wirkende Muskelkraft reagierendes Bedienelement	Touchscreen-Bedienung, Kombinierter Dreh-Drucktaster zur zentralen Steuerung (u.a. Navigation)

3.1.3 Trends in der Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen

Stetige Verbesserungen und die Erschließung neuer Anwendungsbereiche von FAS erfordern die Berücksichtigung neuer technischer Gestaltungsansätze. Dies gilt insbesondere für FAS der SAE Level 3 und höher, bei denen der Fahrer teilweise oder vollständig die Kontrolle an das FAS übergibt.

Ein wichtiger Trend in der Gestaltung von FAS ist die sogenannte **Sensorfusion,** auch als Informationsfusion bezeichnet (Maurer und Stiller 2005, S. 43; Vollmer 2016, S. 16)**.** Anstelle der Nutzung einzelner Sensoren als Informationsquelle basiert die Sensorfusion auf einer Zusammenführung von Sensorinformationen aus dezentralen und vernetzten Sensoren. Ziel ist es, das gesamte Fahrzeugumfeld zu registrieren, um so ein ganzheitliches Umfeld-Modell aufbauen zu können (Langenwalter 2016, S. 31; Vollmer 2016, S. 16). So können insbesondere auch voneinander unabhängig arbeitende FAS situationsabhängig die Vorteile verschiedener Sensortechnologien nutzen (Bosch AG 2015; Estl 2016, S. 38). Die Sensorfusion wird unterstützt durch die Einführung von **Funktionalen Rechenclustern** (Vollmer 2016, S. 16; Reif 2011, S. 153). Diese leistungsfähigen, domänenübergreifenden Sensor-Steuergeräte ersetzen multiple einzelne Steuergeräte zur zentralisierten Verarbeitung von Sensordaten (Giesler und Reichel 2016; Winner et al. 2012, S. 84). Diese werden dann, je nach Bedarf, mehreren FAS zur Verfügung gestellt. Für die Fusion der Sensor-Signale sind neben den in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Bauelementen Messfühler sowie Signalaufbereitung, -wandlung und -verarbeitung zusätzlich Bauelemente zur Signal-Assoziation sowie Filterung erforderlich (Maurer und Stiller 2005, S. 43–44). Dazu sind gegebenen-

falls Bauelemente zur Synchronisation zuvor asynchroner Sensordaten auf ein gemeinsames Koordinatensystem sowie eine gemeinsame Taktzeit erforderlich (Maurer und Stiller 2005, S. 43–44).

Abbildung 19 zeigt eine exemplarische Ausprägung einer Sensor-Fusions-Architektur mit einem funktionalen Rechencluster. Zwei Sensoren erfassen mit verschiedenen Aufnahmebereichen die Umgebung. Beide Sensoren werden in einem zentralisierten Sensor-Steuergerät, in dem die Bauelemente der Signal-Assoziation und der Filterung verbaut sind, ausgewertet (nach Maurer und Stiller 2005, S. 45–46). Die erzeugten Daten werden durch das Sensor-Steuergerät den verschiedenen FAS Steuergeräten (1 bis n) zur Verfügung gestellt.

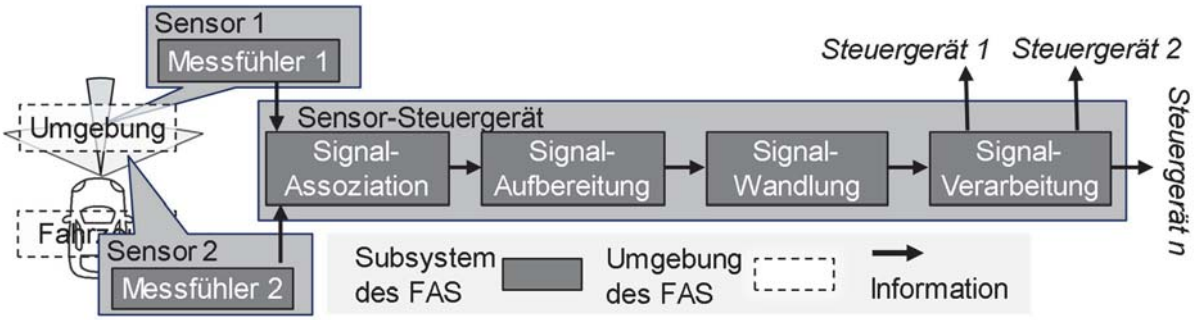


Abbildung 19: Exemplarische Sensor-Fusions-Architektur mit zentralisiertem Sensor-Steuergerät (nach Maurer und Stiller 2005, S. 12, 2005, S. 45)

Ein weiterer Trend ist die **Standardisierung von Elementen der Elektronik, Elektrik und Software.** Der **„AUTomotive Open System Architecture“ (AUTOSAR) Standard** ist durch eine Entwicklungspartnerschaft von am automobilen Entwicklungsprozess beteiligten Firmen mit dem Ziel definiert, einen offenen Standard für Elektrik-/Elektronikarchitekturen, insbesondere der Steuergeräte im Kraftfahrzeug, zu etablieren (nach AUTOSAR GbR 2017; Winner et al. 2012, S. 668; Deicke 2018, S. 9). Es werden Elemente von Steuergeräten wie Gehäuse, Stecker oder Softwarebestandteile standardisiert. Damit wird die Umsetzung modularerer Architekturen ermöglicht, beispielsweise über eine Kapselung funktionaler Software gegenüber der Hardware, mit dem Ziel einer einfacheren Übertragung von Software von einem Steuergerät in ein anderes Steuergerät (Reif 2011, S. 154). Durch Modularität, also der Zerlegung eines Systems in einzelne unabhängige Subsysteme mit klar definierten Schnittstellen, werden die unabhängige Subsystem-Entwicklung sowie die einfache Integration der Subsysteme in das Gesamtsystem ermöglicht (Picot und Baumann 2007, S. 222). Modularität ist insbesondere in Hinblick auf die steigende Variantenvielfalt und Variabilität automobiler Software wichtig, denn eine hohe Anzahl an verschiedenen Elementen mit vergleichsweise kurzen Lebenszyklen sorgt heute für zahlreihe Versionskonflikte und Schnittstellenprobleme bei der Software-Integration (Kasoju et al. 2013, S. 1238).

FAS werden zunehmend vernetzt. Heute sind innerhalb eines Fahrzeugs nur wenige Systeme, die um die Aufmerksamkeit des Fahrers konkurrieren, gleichzeitig aktiv. Hier wird zukünftig eine immer größere Anzahl von interagierenden Systemen eine Kooperation erfordern (Duan und Chen 2011, S. 239; Giesler und Reichel 2016, S. 22). Eine **fahrzeuginterne Vernetzung** der Systeme ist eine wichtige Grundlage für die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge (Giesler und Reichel 2016, S. 22). Zusätzlich findet durch Car2X Systeme eine Vernetzung mit der Fahrzeugumgebung, der internen Infrastruktur und Fremdfahrzeugen statt. Diese Form der **fahrzeugübergreifenden**

Vernetzung bietet Potentiale wie die Schaffung intelligenter kooperativer Transportsysteme. Diese sind in der Lage Daten auszutauschen, kooperierend auf unfallträchtige Situationen zu reagieren und diese sogar zu vermeiden (Jemaa et al. 2016, S. 77; Broy 2010, S. 48–49; Li et al. 2017, S. 88).

Ansätze zur Beherrschung der resultierenden Komplexität der Fahrer-Fahrzeug Interaktion sind beispielsweise die Beschränkung von Handlungsmöglichkeiten sowie die Assistenz des Fahrers durch **intelligente Sicherheits- und Assistenzsysteme** (Broy 2010, S. 86). Diese Systeme, die durch Abbildung neuronaler Prozesse durch neuronale Netze oder durch Anwendung von Machine Learning Algorithmen die Fähigkeit zur Situationsanpassung bekommen, müssen insbesondere in teilautonomer Anwendung in der Lage sein, für den Fahrer plausible Entscheidungen zu treffen (Broy 2010, S. 104; Vollmer 2016, S. 15). Neuronale Netze sind Systeme, die einige der im menschlichen Gehirn erkannten oder vermuteten Organisationsprinzipien nachbilden. Der Begriff wird zumeist im Kontext des künstlichen neuronalen Netzes, das von einem Computer simuliert wird, verwendet (Nauck 1996, S. 1–2). Bei Machine Learning handelt es sich um einen Oberbegriff, der eine Klasse von computerbasierten Prozessen bezeichnet, mit denen intelligente Systeme ihre Leistung über die Zeit verbessern (Langley 1986, S. 7). Zur Umsetzung dieser Systeme wird oft auf cloudbasierte Dienste zurückgegriffen (Vollmer 2016, S. 15).

Angesichts der insgesamt wachsenden Komplexität von Assistenz- und Entscheidungsfunktionen und der in vielen Szenarien geforderten Bedienbarkeit durch Personen mit fehlenden technischen Kenntnissen, kommt der Gestaltung der Mensch-Maschine Schnittstelle eine verstärkte Bedeutung zu (Broy 2010, S. 104). **Mehrstufige Warnsysteme**, die frühzeitig und in steigender Dringlichkeit warnen, helfen dem Fahrer rechtzeitig und angemessen auf kritische Situationen zu reagieren (Duan und Chen 2011, S. 240; Politis et al. 2013, S. 99). Dies wird unterstützt durch eine **Multimodalität von Warnungen**: So kann durch die Nutzung verschiedener Wahrnehmungskanäle eine weitere Verbesserung der Reaktionszeit und -angemessenheit erreicht werden (Politis et al. 2013, S. 99; Hampel 2016; Schalk und Gibbons 2013, S. 65; Brandenburg et al. 2017, S. 283). Auch können derartige Systeme zur Aufmerksamkeitssteuerung eingesetzt werden, beispielsweise durch geeignet platzierte Leuchtelemente, die die Aufmerksamkeit des Fahrers in die gewünschte Richtung lenken (Hampel 2016).

Durch verschiedene, in **Abbildung 20** exemplarisch dargestellte **Technologieinnovationen,** können diese Gestaltungsansätze weiter unterstützt werden. Neue **Head-Up Technologien** sind nicht nur in der Lage, Navigations- und Fahrzeugzustandsinformationen überlagernd in das Sichtfeld des Fahrers zu projizieren, sondern können die sichtbare Umgebung mit virtuellen Informationen zu einer komplexen Augmented Reality Darstellung anreichern (Hampel 2016). **Große zusätzliche Bildflächen** und **3D Displays** ermöglichen dazu neue Wiedergabekonzepte visueller Informationen an den Fahrer (Broy 2015; CESAsia2016 2016). Viele dieser Anzeigen werden zudem zukünftig eine Bedienbarkeit erhalten, beispielsweise indem **großflächige Touchscreens** verbaut werden (Atmel Cooperation 2014). Durch Integration von haptischem Feedback in Displays oder sogar durch Kopplung der **Hand-Freiraumgesten** können so neuartige, multimodale Bedienkonzepte umgesetzt werden (Automotive Technology 2017). Dazu kommen neuartige Bedienkonzepte, beispielsweise durch Augenbewegungen, Gestik der Extremitäten oder die Messung von Vitaldaten des Fahrers, beispielsweise Elektrokardiogramm, durch spezielle Sensoren (BMW 2015; Atmel Cooperation 2014; Delphi 2015; Strickland 2017).

Abbildung 20: Technologieinnovationen in der Gestaltung neuartiger Mensch-Maschine Schnittstellen (Bildquellen: Von links nach rechts - Diedrichs 2017; Automotive Technology 2017; Strickland 2017; Hampel 2016, S. 51; Atmel Cooperation 2014, S. 59)

Zunehmend wird auch **Konsumelektronik,** wie beispielsweise Mobiltelefone oder Multimediaeinheiten, in das Fahrzeugcockpit integriert (Pfleging et al. 2012; Ford Motor Company 2016). Die entsprechenden Funktionen insbesondere der Kommunikation werden zunehmend nicht mehr in der Gerätetechnik des Fahrzeugs implementiert, sondern durch austauschbare Software direkt im (Konsumelektronik-) Gerät bereitgestellt, zumeist über netzwerkbasierte Dienste (Braess und Seiffert 2012, S. 718). Es wird erwartet, dass die neuen Möglichkeiten der Kommunikationsübertragung und Darstellung von Informationen verschiedener Fahrzeugsysteme das Fahrerverhalten nachhaltig ändern wird (Holmes 2016). Darüber hinaus sind eine **zunehmende Individualisierung und Variantenvielfalt** der Systeme zu erwarten (Braess und Seiffert 2012, S. 480; Ford Motor Company 2016; Holmes 2016). Regional unterschiedliche Kundenanforderungen, die aus unterschiedlichen kulturellen (Fahr-) Verhaltensweisen und verschiedenen Umgebungseinflüssen resultieren können, werden zu FAS führen, deren Verhalten und deren Mensch-Maschine Schnittstelle auf jeweils lokale Gegebenheiten adaptiert sind (Duan und Chen 2011, S. 238). Es können stark unterschiedliche Systemausprägungen entstehen, die in der Zielregion angemessen und nützlich, in anderen Regionen aber nutzlos oder gar gefährlich sind (Lindgren 2008).

Ab einem Automatisierungsgrad von Level 3 nach SAE J3016 erfordern bedingt automatisierte oder hoch automatisierte FAS die **wechselseitige Übergabe zwischen Fahrer und System**, bei der der Fahrer nach kurzer Zeit die Kontrolle übernehmen kann. Bei diesen neuartigen Systemen, von denen eines exemplarisch in **Abbildung 20 (Links)** gezeigt ist, sind Fragestellungen der Mensch-Maschine Interaktion oft noch ungeklärt. So ist beispielsweise die Reaktion eines Fahrers auf den Verlust eines Teils seiner Fahr-Autonomie noch nicht hinreichend erforscht (Duan und Chen 2011, S. 239; Brandenburg et al. 2017, S. 280). Ebenso ist die Anpassungsfähigkeit von Fahrern auf neue Randbedingungen, die mit dem sinnvollen Einsatz autonomer Systeme einher

gehen, noch nicht vollständig analysiert (Dragutinovic 2005; Brandenburg et al. 2017, S. 280). Auch die Gestaltung von Übergabestrategien, bei der sich der Fahrer außerhalb der erlaubten Verhaltensweisen bewegt, er zum Beispiel in veränderter Sitzhaltung schläft, ist an dieser Stelle zu nennen (Duan und Chen 2011, S. 239; Brandenburg et al. 2017, S. 282). Die Absicherung derartiger Übergabeansätze bedarf einer realistischen Interaktion zwischen FAS und dem realen Fahrer mit seinem Kommunikationsverhalten (Hartfiel et al. 2018, S. 663; acatech 2017, S. 134).

3.1.4 Zusammenfassung der Struktur von Fahrerassistenzsystemen

Basierend auf den detaillierten Beschreibungen, kann die Darstellung des FAS aus Abbildung 12 zur nachfolgenden **Abbildung 21** erweitert werden.

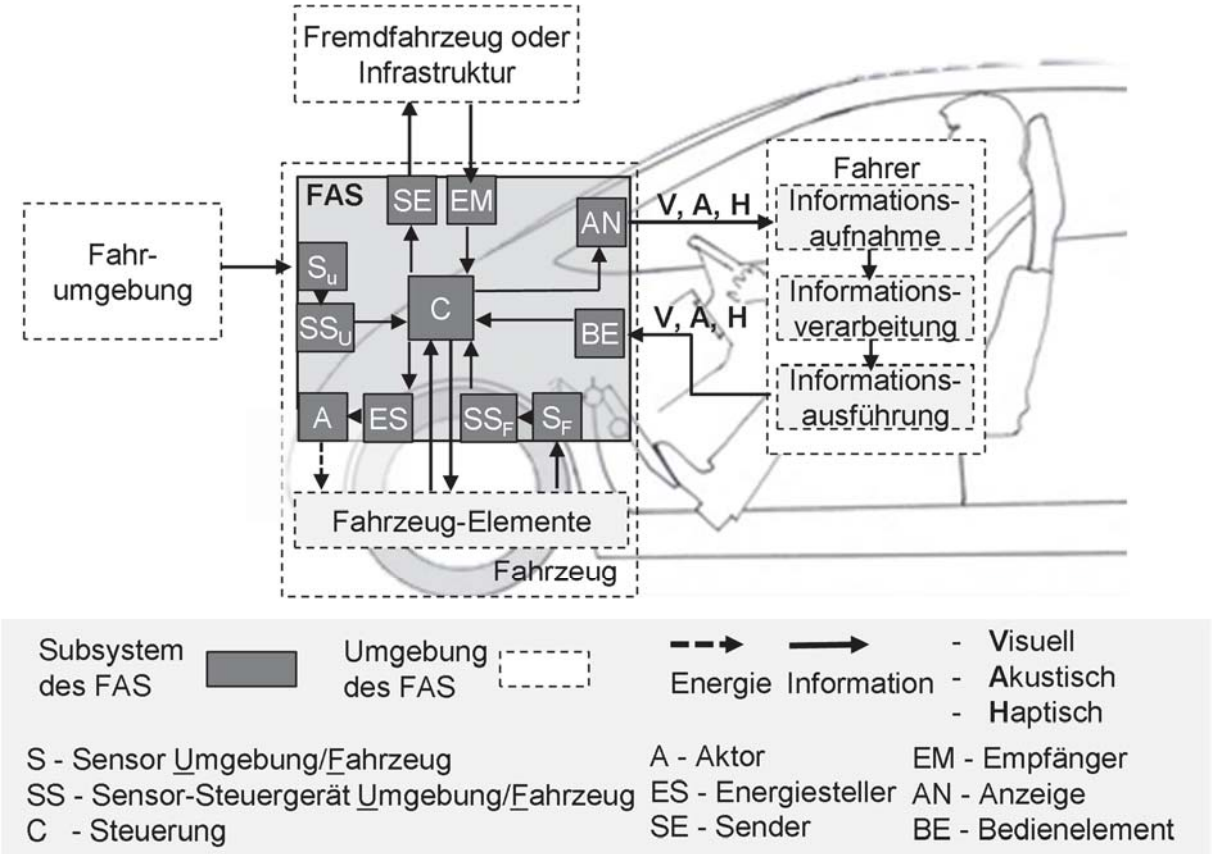


Abbildung 21: Technische Systemdarstellung von Fahrerassistenzsystemen

Die dargestellten Systemelemente und Subsysteme werden wie folgt beschrieben:

I. **Steuerung C** für die komplexe Signalverarbeitung.
II. Sensorik für die Erfassung und Evaluation der Fahrzeug-Umgebung mit **Umfeld-Sensor S_U** und **Sensor-Steuergerät SS_U.** Sowie des Fahrzeugs und dessen Verhalten mit **Fahrzeug-Sensor S_F** und **Sensor-Steuergerät SS_F**.
III. Car2X-Kommunikation, **Sender SE** und **Empfänger EM** für die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen beziehungsweise der Infrastruktur.
IV. Aktorik - **Energiesteller ES** und **Aktor A** für die aktive Unterstützung der lateralen oder longitudinalen Steuerung des Fahrzeugs.
V. Mensch-Maschine Schnittstellen, **Anzeigen AN** zur visuellen, akustischen und haptischen Kommunikation vom FAS zum Fahrer, sowie **Bedienelemente BE** zur visuellen, akustischen und haptischen Kommunikation vom Fahrer zum FAS.

Die Sensorik, die Aktorik, die Elemente der Car2X-Kommunikation sowie auch die Mensch-Maschine Schnittstelle können sowohl dem FAS als auch dem übergeordneten System Fahrzeug zugehörig sein. FAS können beispielsweise auf Fahrzeug-Sensoren wie dem Drehzahlsensor, Fahrzeug-Aktorik wie dem Bremssystem oder bestehenden Mensch-Maschine Schnittstellen wie beispielsweise einem im Lenkrad integrierten Vibrationsmotor zurückgreifen. Alle diese Systeme stellen Subsysteme und Elemente des Systems Fahrzeug dar und sind durch den Block „**Fahrzeug-Elemente**“ beschrieben. Das FAS tauscht über eingehende und ausgehende Flüsse Information, mit den umgebenden Systemen „**Fahrumgebung**“, „**Fahrer**“ und „**Fremdfahrzeug oder Infrastruktur**“ sowie mit Subsystemen des übergeordneten Systems „**Fahrzeug**“ aus. Dazu wird das Fahrzeug über den Aktor durch elektrische, pneumatische oder hydraulische Energie, die auf die Geschwindigkeitssteuerung, die Lenkung und die Bremse einwirken, beeinflusst. Diese Einwirkung entspricht einem Energiefluss.

Einem FAS können **mehrere Sensoren, Aktoren, Anzeigen und Bedienelemente** zugehörig sein. Sensoren können beispielsweise über die Gestaltungstrends der Sensor-Fusion und der funktionalen Rechencluster integriert werden. Auch ein Einwirken eines FAS auf mehrere Aktoren ist, wie in Tabelle 3 gezeigt, in heutigen FAS üblich. Die beschriebenen Gestaltungstrends der Multimodalität und Mehrstufigkeit von Warnungen zeigen dazu, dass auch Anzeigen und Bedienelemente mehrfach vorhanden sein können. Auch Integrationslösungen aus Anzeige und Bedienelement sind üblich, beispielsweise Touchscreens.

Abbildung 22 zeigt exemplarisch die Systemdarstellung eines FAS mit multiplen Teilsysteme: Das **Parklenkassistenzsystem der Firma VW**, welches mehrere Sensoren zur Erfassung des Umfelds sowie multimodale Anzeigen beinhaltet.

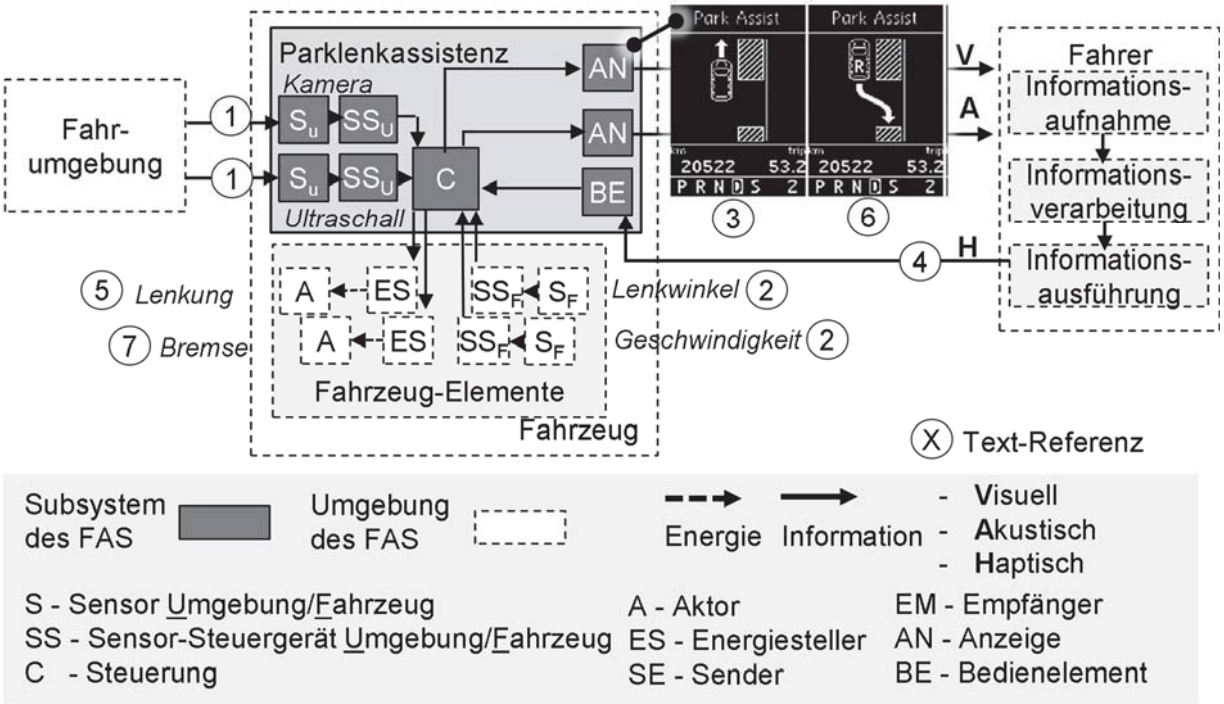


Abbildung 22: Exemplarische Systemdarstellung eines FAS mit multiplen Teilsystemen: VW Parklenkassistenzsystem (nach Bubb 2015, S. 551ff; Volkswagen Service 2002)

Das Parklenkassistenzsystem greift auf mehrere Sensoren und Aktoren des Fahrzeugs zurück. Über systemeigene *Ultraschallsensoren* und *Kameras* (1) wird die Fahrzeugumgebung, über fahrzeugeigene Sensoren (2) die Geschwindigkeit und den Lenkwinkel des Fahrzeugs erfasst (Bubb 2015, S. 551ff; Volkswagen Service 2002). Durch vordefinierte digitale Anzeigeninhalte, die mit einer *visuellen Anzeige* (3) dargestellt werden, wird dem Fahrer das eigene Fahrzeug in Relation zu potentiellen Längs-Parklücken in einer Top-Ansicht dargestellt. Durch Betätigung eines *mechanischen Tasters* (4) aktiviert der Fahrer die autonome Fahrfunktion. Das FAS übernimmt ab diesem Moment die Kontrolle über die Lenkung des Fahrzeugs und nutzt dazu *fahrzeugeigene Lenk-Aktoren* (5). Der Fahrer steuert die Geschwindigkeit des Einparkvorgangs über *Gas- und Bremsbetätigung* und behält damit weiterhin die Kontrolle über die Fahrsituation. Über eine *visuelle* sowie eine ergänzende *akustische Anzeige* (6) wird der Fahrer über den verbleibenden Abstand zu den Enden der Parklücke hingewiesen. Wird ein kritischer Abstand unterschritten, greift das FAS durch die Betätigung der *fahrzeugeigenen Bremse* (7) ein und bremst das Fahrzeug vor der Kollision ab. Das VW Parklenkassistenzsystem ist der SAE Level 2 zuzuordnen: Es übernimmt Lenkung und Geschwindigkeitssteuerung in dem definierten Anwendungsfall „Längs-Einparken“. Dabei überwacht der Fahrer permanent und kann jederzeit die volle Kontrolle übernehmen.

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, sind FAS aus Systemelementen der Mechanik, der Elektronik und Elektrik sowie der Software aufgebaut. Diesen Domänen lassen in die in **Tabelle 7** beschriebenen Subsysteme zuordnen. Die Differenzierung zwischen Elektrik und Elektronik erfolgt anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Definition: Elektrik befasst sich mit der elektrischen Installation von Geräten sowie deren Verbindungselementen, während die Elektronik die mit elektronischen Bauelementen realisierten elektrischen Funktionen beschreibt.

Tabelle 7: Bestandteile der Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software von FAS Subsystemen

System-Element	Mechanik	Elektrik	Elektronik	Software
Steuerung	Gehäuse des Steuergerätes	Elektrische Verkabelung zu umgebenden System-Elementen und dem Fahrzeug, Energieversorgung	Mikrocontroller, Integrierter Speicher	Steuerungs-Software
Sensorik	Position, Gestalt und Lage von Messfühlern, Gehäuse von Sensor-Steuergerät		Messfühler, Bauelemente zur Signal-aufbereitung, -wandlung und -verarbeitung	Software zur Aufnahme, Aufbereitung und Wandlung des Signals
Aktorik	Position, Gestalt und Lage von Energiesteller und -wandler		Elektronik-Bauelemente für Energiesteller	Software zur Energiestellung

System-Element	Mechanik	Elektrik	Elektronik	Software
Car2X System	Gehäuse	Elektrische Verkabelung zu umgebenden System-Elementen und dem Fahrzeug, Energieversorgung	Elektronik-Bauelemente des Empfängers und Senders	Software zur Aufnahme, Aufbereitung und Wandlung des Signals
Anzeige	Position, Gestalt und Lage von Lampen, Bild-schirmen, Touchscreens, Lautsprecher		Lampen, Bildschirme, Touchscreens, Lautsprecher, Elektronik-Bauelemente	Software zur Wandlung des Signals und Ansteuerung der Mechanik
Bedien-Element	Position, Gestalt und Lage von Schaltern, Taster, Touchscreens		Elektronik-Bauelemente für Signal-Erfassung, Schalter und Tastern	Software zur Signal-wandlung, Software zur Signal-Interpretation

Exemplarisch sind in **Abbildung 23** die Bestandteile der Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software der Systemelemente des VW Parklenkassistenzsystems dargestellt.

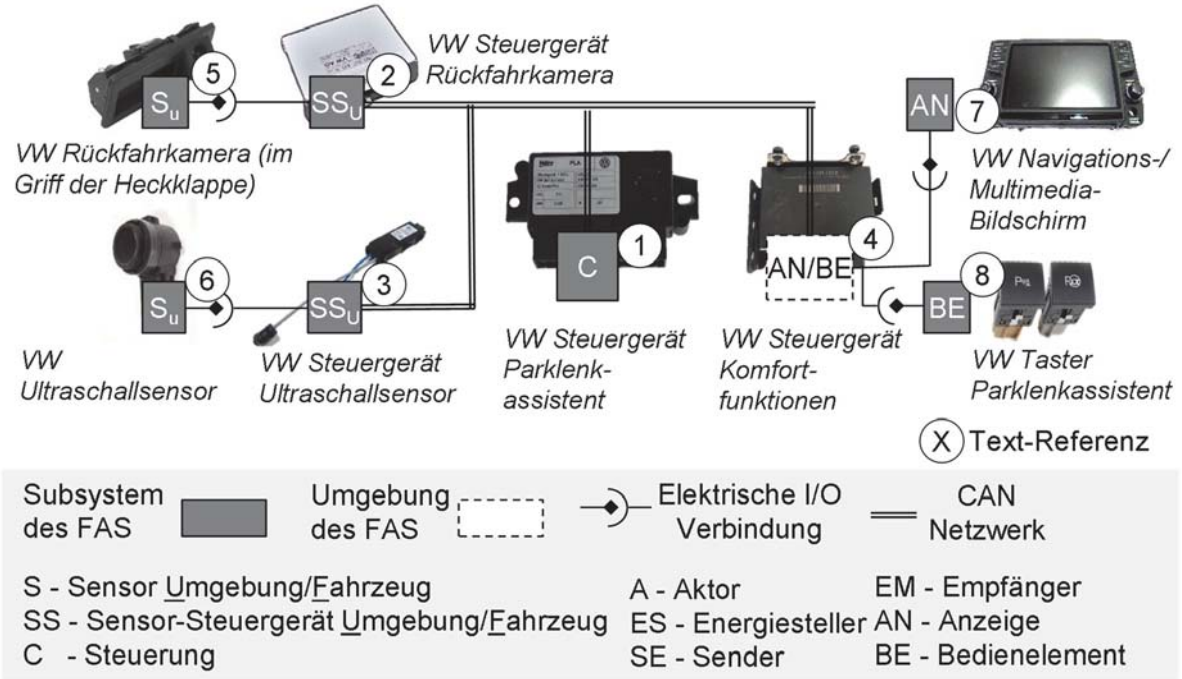


Abbildung 23: Exemplarischer Aufbau eines FAS: VW Parklenkassistenzsystem (nach Volkswagen Service 2002; Bildquellen: Ebay 2019)

Den Kern des Systems bildet das Elektronik-Element *Steuergerät Parklenkassistenz-system* (1). Dieses ist mittels CAN-Bus elektrisch mit weiteren elektronischen System-elementen verbunden: Den Sensor-Steuergeräten der *Rückfahrkamera* (2) und des

Ultraschallsensors (3) sowie dem *zentralen Steuergerät für Komfortfunktionen* (4), welches selbst nicht zum FAS gehört. Auf allen vier Steuergeräten ist Software des FAS implementiert. Auf dem *Steuergerät Parklenkassistenzsystem* ist das eigentliche Steuerungsprogramm zum Empfang der digitalen elektrischen Signale, derer Interpretation mit einprogrammierten mathematischen Formeln und Kennfeldern und, wenn erforderlich, zur Berechnung der Ansteuersignale für die Aktoren implementiert. Auf den Sensor-Steuergeräten ist jeweils Software zur Aufnahme, Aufbereitung und Wandlung der aufgenommenen Sensorsignale implementiert. Auf dem *Steuergerät für Komfortfunktionen* ist die Software für die bildhaft situationsanaloge visuelle Anzeige sowie die Software zur Auswertung der haptischen Bedieneingaben auf die Taster implementiert. An die Sensor-Steuergeräte sind mit elektrischen Input/Output-Verbindungen jeweils die Messfühler *Kamera* (5) beziehungsweise *Ultraschallsensor* (6) angebunden. An das *Steuergerät für Komfortfunktionen* ist der *Navigations-Bildschirm* (7), auf dem die vordefinierten visuellen Anzeigeinhalte dargestellt werden, angebunden. Des Weiteren sind hier die *Taster* (8) zur Bedieneingabe mit elektrischen Input/Output-Verbindungen angebunden.

3.1.5 Die Regelkreise der Fahrerassistenzsystem-Interaktion

Den Ausführungen in Kapitel 2 zum Systembegriff folgend, kann das FAS als ein System beschrieben werden, das in **zwei Regelkreisen** agiert. Diese zwei Regelkreise werden im Rahmen der Arbeit wie folgt definiert: Der **Regelkreis der Mechatronik** entspricht der in Abbildung 7 eingeführten Notation eines mechatronischen Systems. Das FAS beinhaltet Sensoren zur Erfassung des Grundsystems Fahrzeug sowie der Umgebung, eine Steuerung zur Informationsverarbeitung sowie einer Aktorik zur Beeinflussung des Grundsystems Fahrzeug. Das Car2X-System stellt in diesem Kontext eine erweiterte Möglichkeit zur Erfassung der Umgebung über den Empfänger sowie deren Beeinflussung über den Sender dar. Entsprechend der in Abbildung 8 eingeführten Notation nimmt der Fahrer die Informationen über die Anzeigen des FAS auf, verarbeitet diese und gibt Steuerungssignale über Bedienelemente an das FAS zurück. Diese Bedieneingaben werden von der Steuerung des FAS interpretiert und verarbeitet. In der Analogie des Regelkreises entspricht der Fahrer damit dem Grundsystem, von dem durch Eingaben in Bedienelemente Informationen aufgenommen werden. Durch die Steuerung werden diese Informationen verarbeitet. Eine Beeinflussung des Grundsystems Fahrer wird durch die Ausgabe von Anzeige-Informationen vorgenommen. Dieser Regelkreis wird im Folgenden als **Regelkreis der Fahrer-FAS-Interaktion** bezeichnet.

Abbildung 24 zeigt diese Regelkreise projiziert über die zuvor eingeführte technische Systemdarstellung:

Auf der linken Seite ist der **Regelkreis der Mechatronik** gezeigt. Dieser beschreibt die Interaktion zwischen der FAS Steuerung und dem Fahrzeug, der Fahrumgebung, Fremdfahrzeugen sowie der Infrastruktur über die Sensoren, die Aktoren und die Car2X Kommunikation des FAS.

Auf der rechten Seite ist der **Regelkreis der Fahrer-Fahrerassistenzsystem-Interaktion** gezeigt. Dieser beschreibt die Interaktion zwischen der FAS Steuerung und dem Fahrer über die Anzeigen und Bedienelemente des FAS.

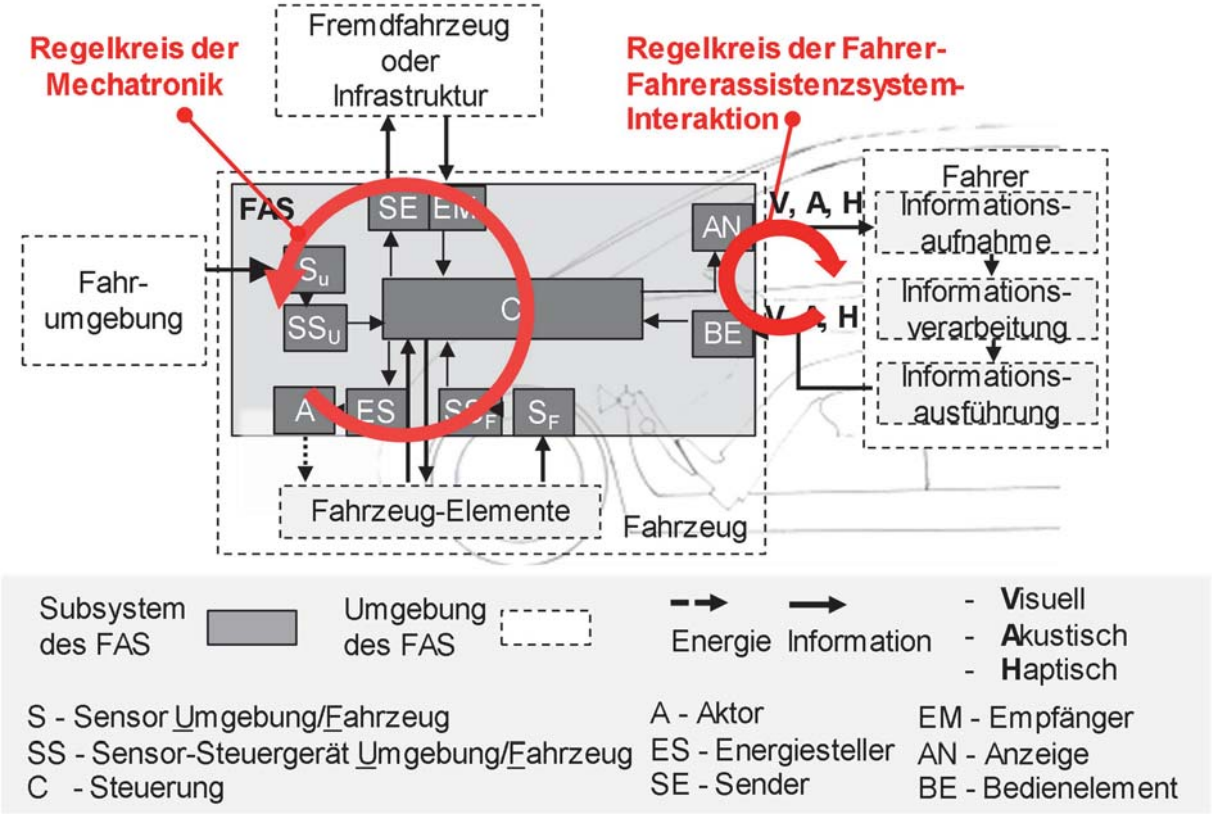


Abbildung 24: Die zwei Regelkreise der Fahrerassistenzsystem-Interaktion

Das nachfolgende Kapitel 3.2 beschreibt die zum Verständnis der Entwicklung von FAS erforderlichen Grundlagen.

3.2 Grundlagen des Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozesses

Die Entwicklung von FAS wird im Rahmen komplexer Entwicklungsprozesse durchgeführt. Der grundlegende Aufbau sowie die charakteristischen Eigenschaften dieser Entwicklungsprozesse werden im folgenden Kapitel betrachtet. Im Speziellen liegt der Fokus hierbei auf einem Ansatz, auf dem die Mehrheit der heutigen FAS Entwicklungsprozesse aufbauen: Dem V-Modell (nach Wisselmann et al. 2014, S. 7; Wehner et al. 2014, S. 381; Schäuffele und Zurawka 2013, S. 19). Wie in der Zielsetzung in Kapitel 1.2 dargelegt, liegt der Fokus der Arbeit auf dem Test von FAS. Kapitel 3.2.3 erläutert die Grundlagen zum Verständnis des Testbegriffes sowie dessen Verortung im V-Modell.

3.2.1 Aufbau und Charakteristika automobiler Produktentwicklungsprozesse

Die Integration von FAS erfordert eine enge Abstimmung der Entwicklung mit anderen Elementen des Fahrzeugs, insbesondere mit den sicherheitskritischen Lenk- und Bremssystemen. Dadurch ist insbesondere die Entwicklung von FAS, die aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, eng mit der Entwicklung des Fahrzeugs, in das diese integriert werden, verknüpft. Im Folgenden wird daher zunächst der **automobile Produktentwicklungsprozess** betrachtet.

Auf den Begriff des Produktentwicklungsprozesses lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Sichtweisen finden: Die **erste Sicht** unterschiedet zwischen den drei Prozessschritten Initialphase, Konzeptentwicklung und Serienentwicklung (nach Weber 2009, S. 8). Meilensteine dienen der Segmentierung der Prozessschritte des Produktentwicklungsprozesses. Der Meilenstein „Start of Production“ (SOP) markiert das Ende des Produktentwicklungsprozesses der ersten Sicht, es beginnt die (Serien-) Herstellung des Produktes. Die **zweite Sicht** unterschiedet zwischen den Prozessschritten Konzept, Entwurf und Ausarbeitung (Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 163). Differenziert werden können diese durch einen fünfstufigen Prozess aus den Stufen Produktdefinition, Konzept, Entwicklung, Produktionsvorbereitung und Herstellung beschrieben werden (Stark et al. 2011, S. 21). Der Prozess schließt mit dem Meilenstein „End of Production“ (EOP), beinhaltet also auch den SOP sowie die Fertigung und Montage des Fahrzeugs (nach Weber 2009, S. 9). Obwohl sich die Benennungen und Detailinhalte der Prozessschritte unterscheiden, sind beide Sichten ineinander übertragbar. **Abbildung 25** zeigt eine solche Übertragung am Beispiel des fünfstufigen allgemeinen PEP nach Stark et al..

Da der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der – möglichst frühzeitigen – Absicherung von Systemen im Rahmen der Entwicklung liegt, wird im Rahmen der Arbeit der ersten Sicht gefolgt:

Der allgemeine PEP im Verständnis der Arbeit schließt mit dem Meilenstein „Start of Production“ (SOP).

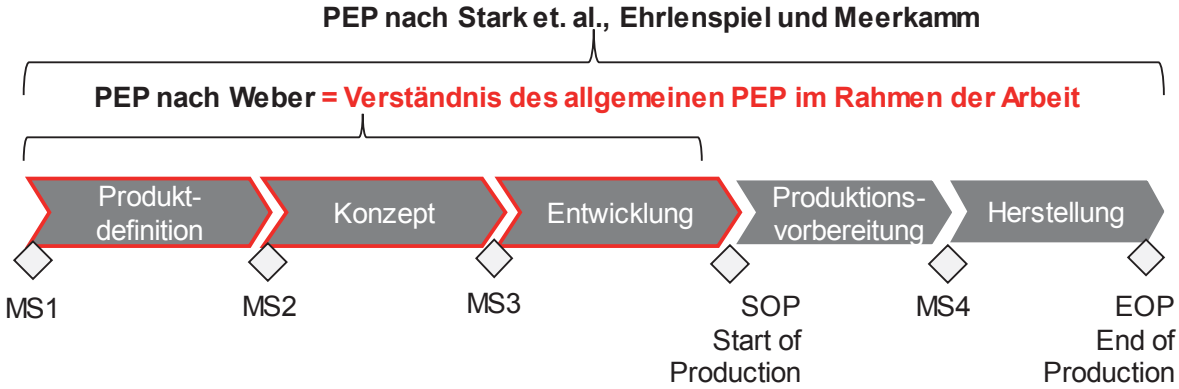


Abbildung 25: Verständnis des allgemeinen Produktentwicklungsprozesses im Rahmen der Arbeit (PEP aus Stark et al. 2011, S. 21)

Trotz der grundsätzlichen Vergleichbarkeit unterscheiden sich die zumeist firmenspezifischen automobilen Produktentwicklungsprozesse zum Teil stark voneinander (nach Stark et al. 2011, S. 20; Weber 2009, S. 7). Die **unternehmensspezifische Detailausprägung des Produktentwicklungsprozesses ist eines der Kern-Know-How Felder der Automobilhersteller**: Entsprechend werden diese Prozesse streng vertraulich behandelt und nur ausschnittsweise oder in geringem Detailgrad publiziert (Weber 2009, S. 7). Die verfügbaren Publikationen, die den automobilen Produktentwicklungsprozess oder die in diesem eingesetzten Methoden und Werkzeuge thematisieren, stammen zumeist von den Herstellern selbst und fokussieren sich auf Spezialthemen oder beschreiben die Erfüllung aktueller Trends durch neue Produkte von Zulieferern (Altinger et al. 2014, S. 2). Obwohl sich Produktentwicklungsprozesse in ihrer Ausgestaltung unterscheiden, ähneln sie sich in ihrem grundsätzlichen Aufbau und können auf vergleichbare Prozessschritte herunter gebrochen werden (nach Stark et al. 2011, S. 20; Weber 2009, S. 7). Im Folgenden werden diese Prozessschritte beschrieben.

Im automobilen Entwicklungsprozess dient der erste Prozessschritt „**Produktdefinition“** der Festlegung der geometrischen und funktionalen Details, die die wesentlichen Eigenschaftspotentiale des Produkts bestimmen. Hierzu zählen beispielsweise die Crashperformance, der Verbrauch oder der Fahrkomfort (Braess und Seiffert 2012, S. 902; Kleinhans et al. 2015, S. 13). Dazu wird deren Umsetzbarkeit, sowohl technisch als auch finanziell, beurteilt (Weber 2009, S. 29ff). Zur Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit werden erste virtuelle Modelle eingesetzt, zumeist um geometrische Aspekte wie Karosseriestyling, Ergonomie oder Packaging und deren Zusammenwirkung evaluieren zu können (Weber 2009, S. 30). Der zweite Prozessschritt „**Konzept**“ dient der konzeptionellen Weiterentwicklung und Absicherung neuer Lösungen bis zu dem Punkt, an dem die Erfüllung der gestellten Anforderungen sichergestellt werden kann (nach Weber 2009, S. 33; Lütze 2014, S. 42). In dieser Phase werden primär virtuelle Modelle und Prototypen entwickelt und mit Simulationen getestet. Auch physische Prototypen wie beispielsweise Tonmodelle oder Testfahrzeuge werden eingesetzt (Weber 2009, S. 34–35). Im letzten Prozessschritt „**Entwicklung**“ werden alle Komponenten und Systeme des Gesamtfahrzeugs zur Serienreife gebracht. Im Zuge dessen werden zunächst virtuelle Modelle und Prototypen, später physische Prototypen der Komponenten erstellt und getestet (Braess und Seiffert 2012, S. 902ff). Diese Komponenten werden kontinuierlich ausdetailliert und zu Systemen und abschließend zum Produkt integriert (Weber 2009, S. 37ff). In heutigen automobilen Produktentwicklungsprozessen findet in dieser Phase die Zusammenarbeit mit verschiedenen Zulieferern statt (Lütze 2014, S. 43). Diese Zusammenarbeit ist dadurch gekennzeichnet, dass der Automobilhersteller als Auftraggeber Anforderungsdokumente und Spezifikationen erstellt und der auftragnehmende Zulieferer auf dieser Basis Komponenten und Partialsysteme entwickelt (Lütze 2014, S. 43).

Der Verband der Automobilindustrie (VDA) beschreibt darüber hinaus einige in automobilen Entwicklungsprozessen übliche Notationen und Konventionen (Kleinhans et al. 2015, S. 13): So wird üblicherweise der Meilenstein SOP als „Nullpunkt“ der Entwicklung gesetzt. Alle Aktivitäten werden entsprechend an diesem Meilenstein in der Notation „X Monate vor SOP“ datiert. Typische weitere Meilensteine sind das Produktkonzept (PK) sowie der Konzeptentscheid (KE). Das Produktkonzept ist das Ergebnis des Prozessschrittes „Produktdefinition“ und wird etwa 48 Monate vor SOP verortet. Der Konzeptentscheid ist das Ergebnis des Prozessschrittes „Konzept“ und wird etwa 36 Monate vor SOP verortet. Nach den Konventionen des VDA ist der Prozessschritt „Produktdefinition“ kein Teil des automobilen Produktentwicklungsprozesses, sondern der vorgelagerten Forschung und Vorentwicklung zugehörig. Der insgesamt über 4 Jahre angelegte automobile Produktentwicklungsprozess ist damit aus dem über 12 Monate durchgeführten Prozessschritt „Konzept“ sowie dem über 36 Monate durchgeführten Prozessschritt „Entwicklung“ zusammengesetzt. Eine weitere Segmentierung des Prozessschrittes „Entwicklung“ ist daher zielführend und in verschiedenen automobilen Entwicklungsprozessen üblich (vergleiche Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff; Beutner et al. 2013, S. 20ff). Im Folgenden soll die Segmentierung des automobile Entwicklungsprozesses der Firma Porsche gefolgt werden: Der Prozessschritt „Entwicklung“ wird in die Teil-Prozessschritte „Konzeptabsicherung“, „Serienentwicklung“, „Serienvorbereitung“ sowie „Serien-Hochlauf“ segmentiert (Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff).

Entsprechend dieser Konventionen verortet **Abbildung 26** den automobilen Produktentwicklungsprozess im zuvor beschriebenen allgemeinen Produktentwicklungsprozess und zeigt dessen wichtigste Meilensteine.

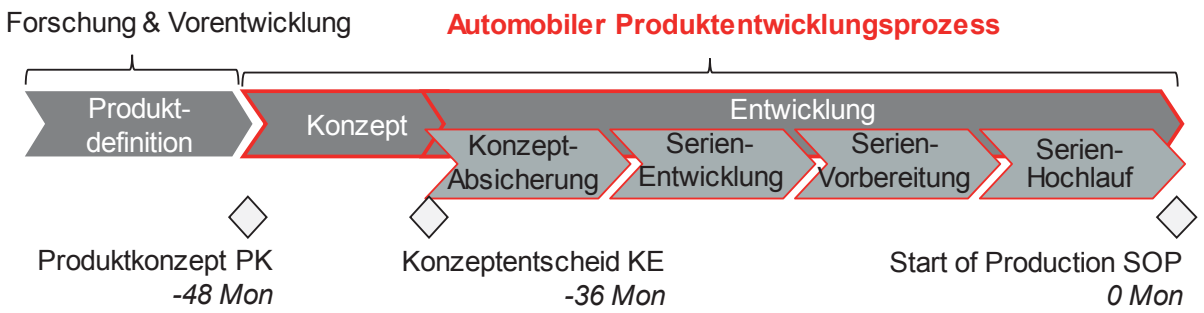


Abbildung 26: Verortung des automobilen Produktentwicklungsprozesses und dessen wichtigsten Meilensteine im allgemeinen Produktentwicklungsprozess (nach Kleinhans et al. 2015, S. 13; Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff)

Eine Besonderheit automobiler Produktentwicklungsprozesse ist die **Unterteilung des Produktes „**Fahrzeug“ in **Systeme und Teilsysteme**. Den übergeordneten Phasen des automobilen Produktentwicklungsprozesses sind die Partial-Entwicklungsprozesse der einzelnen Fachbereiche der System- und Teilsystementwicklung untergeordnet (Braess und Seiffert 2012, S. 902; Reif 2011, S. 154). Auch hier findet eine Segmentierung der Prozessschritte durch Meilensteine statt. Diese Meilensteine sind in der Regel mit Entwicklungs-Artefakten, wie beispielsweise Anforderungsdokumenten, Spezifikationen oder virtuellen und physischen Prototypen verknüpft. Mit Hilfe der Meilensteine können die Partial-Entwicklungsprozesse verschiedener Fachabteilungen untereinander synchronisiert werden (Braess und Seiffert 2012, S. 902). In der Entwicklung des mechatronischen Produktes „Auto“ ist die Unterteilung in Domänen-Entwicklungsprozesse gängig (nach Rudert und Trumpfheller 2015; Rude und Nalbant 2017; Bender 2005; Kleinhans et al. 2015). Der Entwicklungsprozess „Mechanik“ dient der Entwicklung der Elemente der *Domäne Maschinenbau*. Der Entwicklungsprozess „Elektrik/Elektronik“ der Entwicklung der Elemente der *Domäne Elektrik/Elektronik*. Sowie der Entwicklungsprozess „Software“ für die Entwicklung der Elemente der *Domäne Informationstechnik*.

Im Domänen-Entwicklungsprozess **„Mechanik“** werden nach der initialen *Konzepterstellung*, in der keine Tests stattfinden, im Prozessschritt *Aufbau digitaler Prototypen* erstmals Prototypen mit digitalen Werkzeugen konstruiert und getestet (Braess und Seiffert 2012, S. 893; Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff). Ab Beginn der Serienproduktion des Fahrzeugs folgt dann der Aufbau und Test von Hardware-Prototypen, den sogenannten *Baustufen*. Zeitgleich mit Abschluss des Design-Entwicklungsprozesses schließt dieser Prozessschritt ab, es beginnt die *Konstruktion, Aufbau und Test der Serienteile.*

Der Domänen-Entwicklungsprozess **„Elektrik/Elektronik“** startet mit dem Prozessschritt *Analyse und Design* (nach Bender 2005, S. 44; Rude und Nalbant 2017). Nach diesem Prozessschritt werden im computerbasierten *Entwurf des Elektronik-Layouts* erstmals Prototypen getestet. Noch während der Konzeptabsicherung des automobilen Entwicklungsprozesses schließt sich der Prozessschritt des *Prototyping* an, in dem physische Prototypen hergestellt und getestet werden (nach Bender 2005, S. 44; Rude und Nalbant 2017). Anschließend beginnt die *Prä-Produktionsphase* der Serienteile.

Der Domänen-Entwicklungsprozess **„Software“** startet mit der *Analyse und Design*. Nach diesem Schritt werden bereits nach kurzer Zeit erste Analysen mittels sogenannten *Rapid-Control-Prototyping (RCP)* Verfahren durchgeführt (nach Bender

2005, S. 44; Rude und Nalbant 2017). Anschließend erfolgt die Implementierung und der Test in den Prozessschritten *Grob- und Feindesign* bis zum Abschluss der Serienentwicklung (nach Bender 2005, S. 44; Rude und Nalbant 2017). Im Gegensatz zu anderen Teilsystem-Entwicklungsprozessen ist die Software-Entwicklung durch eine bis zum SOP dauernde Entwicklung bis zur *Serienreife* gekennzeichnet: Tests und Änderungen werden bis zum SOP durchgeführt (Deloitte 2017).

Zusätzlich zu diesen drei Domänen-Entwicklungsprozessen dient der Entwicklungsprozess **„Design“** dem Aufbau und dem Test verschiedener Konzeptvarianten für gestalterische Elemente des Fahrzeugs, beispielsweise der Karosserie (Response Consortium 2009, S. 12; Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff). Aber auch Elemente der Mensch-Maschine Interaktion, in denen Aspekte wie die Gebrauchstauglichkeit, Nützlichkeit oder die subjektiven Wahrnehmung, Gefühle und Bedürfnisse des Fahrers während der Nutzung berücksichtigt werden müssen, werden hier in verschiedenen Varianten aufgebaut, getestet und miteinander verglichen (Preim und Dachselt 2015, S. 4). In diesem Prozess werden beispielsweise digitale Anzeigeinhalte definiert oder auch die Form und Gestaltung von Anzeigen und Bedienelementen. Der Entwicklungsprozess startet mit dem *Konzeptentwurf*. Gefolgt von dem *Varianten-Aufbau und Vergleich*, in dem erstmalig vergleichende Tests durchgeführt werden. Es folgt die *Modellierung* bis zum Ende der Konzeptabsicherung des automobilen Entwicklungsprozesses. Anschließend findet die *Detaillierung* der Entwürfe statt (Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff).

Der Prozess **„Fahrzeugtest“** dient dem gemeinsamen, integrierten Test der Entwicklungsartefakte aus den Entwicklungsprozessen des Designs, der Mechanik, der Elektrik/Elektronik sowie der Software in Fahrzeugen. Erstmals werden derartige Tests während der Konzeptabsicherung des automobilen Entwicklungsprozesses durchgeführt. Es werden sogenannte Aggregateträger (AGT) aufgebaut und getestet (Rudert und Trumpfheller 2015, S. 10ff). Diese Aggregateträger sind noch keine vollwertigen Fahrzeuge, sondern modular aufgebaute Testträger, mit denen zumeist Tests zur Antriebs- und Fahrwerksabstimmung auf Mess- und Prüfgelände durchgeführt werden (Braess und Seiffert 2012, S. 922). Eine erstmalige Integration der *Baustufen* aus der Mechanik-Entwicklung findet im Prozessschritt Baustufe statt. Hier wird der erste komplette Prototyp des Produktes „Fahrzeug“ aufgebaut. Nach Abschluss der Serienentwicklung werden *Vorserien-Freigabe-Fahrzeuge (VFF)* aufgebaut, gefolgt von der *Produktionsvorbereitungsserie (PVS)* sowie der *Null-Serie (0S)* (Braess und Seiffert 2012, S. 922). Die **Fahrzeug-Prototypen VFF, PVS und 0S dienen dem Test von Fahrzeug-Gesamtfunktionen**, wie beispielsweise **Fahrerassistenzsystemen** (Braess und Seiffert 2012, S. 922). Der Prozessschritt „Testfahrzeug VFF“ dient dem erstmaligen Aufbau eines Testfahrzeuges, in der Regel aus prototypischen Teilen die in Prototypen-Werkstätten montiert werden. Der Prozessschritt „PVS“ dient der Prüfung der Herstellbarkeit des Fahrzeugs, es kommen Serienteile zum Einsatz die mit Versuchswerkzeugen montiert werden (Schmitt 2015, S. 9). Das folgende Testfahrzeug 0S dient der Prüfung der Serienproduktion. Es werden ausschließlich spätere Serienwerkzeuge verwendet, die Zulieferer fertigen bereits unter Serienbedingungen (Schmitt 2015, S. 9–10). Der Testprozess schließt mit dem Aufbau und Test von Seriennahen Fahrzeug-Prototypen im Prozessschritt der *Serienreife*.

Abbildung 27 zeigt die resultierende ganzheitliche Darstellung des automobilen Produktentwicklungsprozesses mit zugehörigen Meilensteinen und Prozessschritten. Wie beschrieben, ist der in hellgrau dargestellte Prozessschritt „Produktdefinition“ diesem Prozess vorgelagert, aber nicht zugehörig.

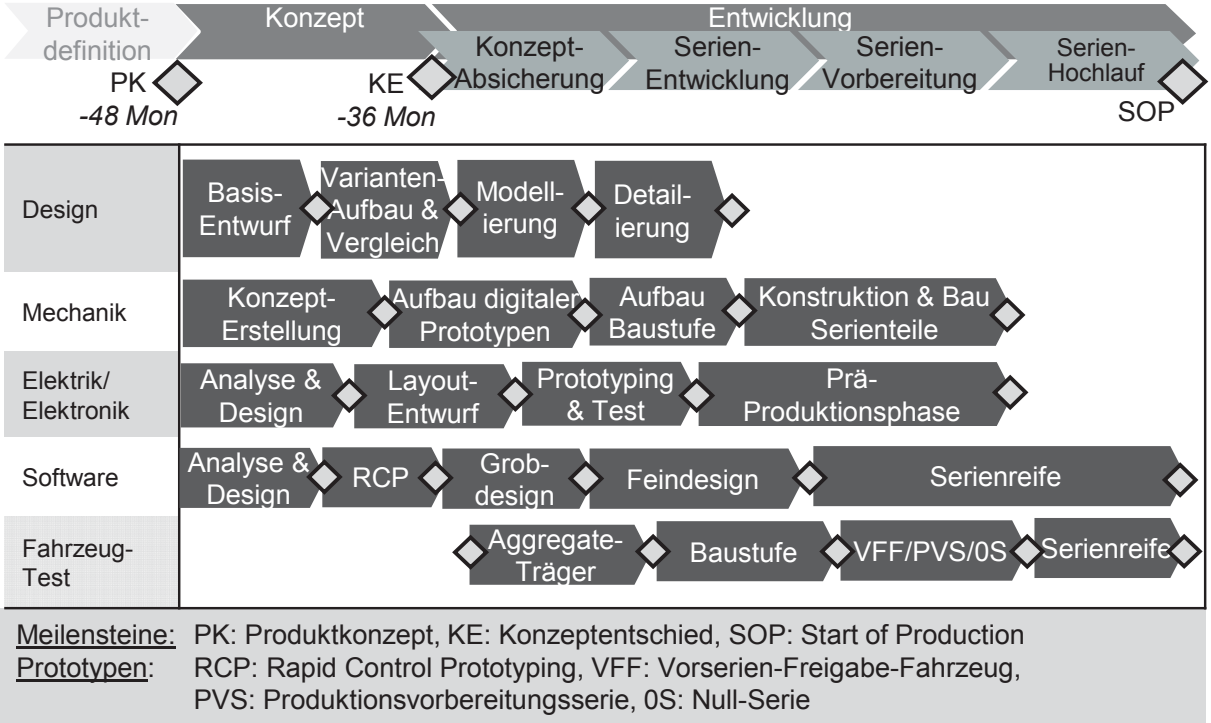


Abbildung 27: Der automobile Produktentwicklungsprozess mit typischen Meilensteinen und Prozessschritten (nach Rudert und Trumpfheller 2015; Rude und Nalbant 2017; Bender 2005; Kleinhans et al. 2015; Schmitt 2015)

Neben diesen Produktentwicklungsprozessen haben sich verschiedene **Vorgehensmodelle** etabliert, die den beschriebenen Prozessphasen verschiedene Entwicklungsaktivitäten zuordnen. Die Vorgehensmodelle nach VDI 2221 sowie das V-Modell stellen die bekanntesten dieser Vorgehensmodelle der Automobilentwicklung dar (Stark et al. 2011, S. 20). Wie zuvor beschrieben ist in der Entwicklung von FAS insbesondere das V-Modell relevant. Das nachfolgende Kapitel beschreibt dieses Vorgehensmodell.

3.2.2 Das V-Modell zur Entwicklung mechatronischer Systeme

Das V-Modell, welches seit Ende der neunziger Jahre den Standard in der Softwareentwicklung darstellt, beschreibt eine V-Förmige Sicht auf die Entwicklung (nach Feldhusen und Grote 2013, S. 18; Eigner et al. 2014, S. 35). Erstmals beschrieben wurde das V-Modell im Kontext der Verifikation und Validierung im Software-Entwicklungsprozess (Boehm 1979, S. 711ff). Das V-Modell stellt aus Software-Sicht ein Dokumenten- und Produktmodell dar, welches die Dokumente und Teil-Produkte der Softwareentwicklung sowie deren Zusammenhänge beschreibt (Eigner et al. 2014, S. 35–36).

Das abgeleitete V- Modell nach VDI 2206 stellt das bekannteste V-Modell dar (Eigner et al. 2014, S. 43). Dieses setzt sich aus dem Problemlösungszyklus auf der Mikroebene, dem V-Modell auf der Makroebene sowie vordefinierten Prozessbausteinen für wiederkehrende Arbeitsschritte zusammen (VDI 2206, S. 26). Der Mikrozyklus der Handlungsorganisation beschreibt einen Prozess zur Planung und Durchführung effektiven eines Problemlösungsverhaltens. Dieser besteht aus den Phasen „Situationsanalyse“, „Analyse und Synthese“, „Analyse und Bewertung“, „Entscheidung“ sowie „Planung des weiteren Vorgehens“. Der Makrozyklus beschreibt ein generisches Vorgehen des Entwurfs mechatronischer Systeme (VDI 2206, S. 29) und wird durch **Abbildung 28 (Links)** beschrieben.

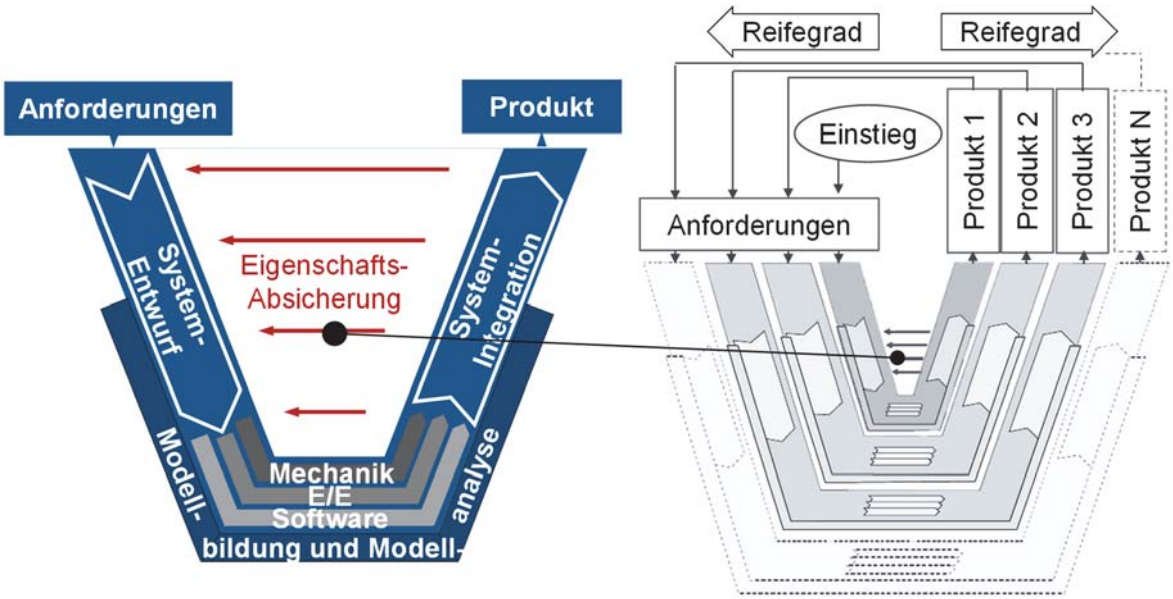


Abbildung 28: Makrozyklus des V-Modells nach VDI 2006 und inkrementelles Vorgehen mit zunehmender Produktreife (nach VDI 2206, S. 29–31)

Der Makrozyklus kann wie folgt aufgeschlüsselt werden:

1. Der Prozess wird durch einen konkreten Entwicklungsauftrag gestartet. Durch **Anforderungen** wird die Aufgabenstellung präzise spezifiziert. Dazu beschreiben die Anforderungen das Zielsystem und bilden so den Maßstab, an denen das Produkt des Makrozyklus zu bewerten ist (VDI 2206, S. 29). Eine Anforderung definiert eine Aussage sowie deren Bedingungen über die geforderte oder gewünschte Eigenschaft an das Zielsystem (nach Eigner et al. 2014, S. 57; Beitz und Grote 2001, F10). Es kann zwischen funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen unterschieden werden (Weit e.V. 2017, S. 113; Feldhusen und Grote 2013, S. 137; Eigner et al. 2014, S. 57). Funktionale Anforderungen beschreiben „die Fähigkeiten eines Systems, die ein Anwender erwartet, um mit Hilfe des Systems ein Problem zu lösen“. Nicht-funktionale Anforderungen beschreiben nicht-fachliche Anforderungen an das System, die jedoch entscheidend zur Anwendbarkeit des Systems beitragen. Sie definieren beispielsweise Qualitätsanforderungen, Sicherheitsanforderungen oder Performanceanforderungen (VDI 2206, S. 29)
2. Es folgt die Phase des **Systementwurfs**, welche zum Ziel hat, ein domänenübergreifendes Lösungskonzepts zu spezifizieren, welches die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beschreibt (VDI 2206, S. 30). Das Gesamtsystem wird Schritt für Schritt bis auf Modulebene dekomponiert, in Teilfunktionen zerlegt und spezifiziert (Weit e.V. 2017, S. 43; VDI 2206, S. 30). Diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien und Lösungselemente zugeordnet und die Funktionserfüllung wird im Systemzusammenhang mit ersten Systemsimulationen geprüft (Reif 2011, S. 166). Entsprechend der Darstellung im Modell wird diese stufenweise Zerlegung auch als Top-Down Ansatz bezeichnet (Bieser 2007, S. 52; Reif 2011, S. 166)
3. Auf Basis dieses gemeinsam entwickelten Lösungskonzepts erfolgt die weitere Ausgestaltung im **domänenspezifischen Entwurf** (VDI 2206, S. 30). Es werden die eigentlichen Hardware- (HW) und Software- (SW) Elemente entwi-

ckelt, welche „domänen-spezifisch“ ausschließlich aus Elementen der Mechanik, Elektrik/Elektronik (E/E) oder Software bestehen (Weit e.V. 2017, S. 106–110)

4. In einem Bottom-Up-Ansatz werden die Prototypen der aus der Entwicklung der einzelnen Domänen in der Phase der **Systemintegration** zum Gesamtsystem integriert. Ziel ist die Untersuchung des Zusammenwirkens der Domänen-Prototypen (nach Weit e.V. 2017, S. 44; VDI 2206, S. 30; Bieser 2007, S. 52).
5. Der Entwurfsfortschritt der Systeme, Subsysteme und Elemente muss fortlaufend mit dem spezifizierten Lösungskonzept und den Anforderungen abgeglichen werden (VDI 2206, S. 30). Im Rahmen der **Eigenschaftsabsicherung** werden dazu die Verifikations- und Validierungstests, vom Komponententest bis hin zum Systemtest, durchgeführt (nach Reif 2011, S. 166; VDI 2206, S. 38). Mit Hilfe der Bewertung können verschiedene Lösungsvarianten untereinander verglichen werden oder im Vergleich zum Zielsystem als Grad der Annäherung an dieses eingeschätzt werden.
6. Die Phasen des Systementwurfs, des domänenspezifischen Entwurfs und der Systemintegration werden flankiert durch die **Modellbildung und -analyse**. In dieser werden Eigenschaften des Systems mit Hilfe von Modellen abgebildet und rechnerunterstützten Simulationswerkzeugen untersucht (VDI 2206, S. 30)
7. Der Makrozyklus schließt mit dem Ergebnis **Produkt**, welches das Zielsystem des jeweiligen Makrozyklus beschreibt (VDI 2206, S. 38).

Dieses Zielsystem des jeweiligen Makrozyklus muss nicht ausschließlich das fertige, real existierende Zielsystem sein: Ein komplexes mechatronisches Erzeugnis entsteht in der Regel nicht innerhalb eines einzelnen Makrozyklus (VDI 2206, S. 30). Daher definiert die VDI 2206 ein iteratives Vorgehen, bei dem der Makrozyklus mehrfach durchlaufen wird. **Abbildung 28 (Rechts)** zeigt dieses Prinzip, das auch als **inkrementelles Vorgehen** bezeichnet wird (Weit e.V. 2017, S. 44). Das durchlaufen des ersten, inneren Makrozyklus hat als Ergebnis Produkt 1, welches einem ersten Prototyp des zu entwickelnden Systems entspricht. Sollte dieser Prototyp nicht die Anforderungen an das Zielsystem erfüllen, muss in einem nächsten Iterationsschritt entsprechend ein „reiferes“ Nachfolge-Produkt 2 erzeugt werden. Die Makrozyklen werden solange durchlaufen, bis das abschließende Produkt N die Anforderungen an das Zielsystem erfüllt (nach VDI 2206, S. 31).

Bereits die VDI 2206 beschreibt den Bedarf einer fallweisen Ausprägung dieses generisches Vorgehens (VDI 2206, S. 29). Daher existieren vielfältige vom V-Modell abgeleitete und für spezifische Anforderungen ausdetaillierte Vorgehensmodelle (Eigner et al. 2014, S. 43–44). Diese unterscheiden sich hinsichtlich verschiedener Aspekte vom V-Modell der VDI 2206.

Das **Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklungs-Modell (MVPE Modell)** ergänzt das V-Modell der VDI 2206 um eine rechnerunterstützte, formale Modellbildung und Dokumentation entlang aller entwicklungsrelevanten Phasen des Produktlebenszyklus (Eigner et al. 2014, S. 86ff). Zielsetzung ist die Weitergabe des Modells in die jeweils nächste Entwicklungsphase sowie der Weiterverwendung der Modelle für Simulation, Validierung und Verifikation. Zu diesem Zweck sind im MVPE-Modell folgende zusätzliche „Sichten“ ergänzt:

- Modellbildung und Spezifikation zur Beschreibung des Systems mit den qualitativen Modellen für Anforderungs-, Funktions- oder Systemstrukturen.

- Modellbildung und erste Simulation zur Erstellung und Simulation quantitativer Modelle die mehrere Domänen mit einbeziehen, beispielsweise multi-physikalische Simulationsmodelle.
- Disziplinspezifische Modellbildung zur Erstellung und Simulation der disziplinspezifischen Modelle der Partialdomänen Mechanik, Elektrik/Elektronik (E/E) und Software.
- Virtuelle Tests, Hybride Tests und Physische Tests zum Test virtueller, hybrider und physischer Modelle und Prototypen.

Das **V-Modell XT** (e**X**treme **T**ailoring) des Vereins Weit e.V. wurde von der Bundesrepublik Deutschland zur Erweiterung bisheriger Modelle hinsichtlich verschiedener Qualitätskriterien beauftragt (Weit e.V. 2017, S. 5ff). Diese sind beispielsweise die Anpassung an aktuelle Vorschriften und Normen, die Anpassbarkeit (Tailoring) an konkrete Projekte, die Anwendbarkeit im Projekt, der Skalierbarkeit auf unterschiedliche Projektgrößen sowie die Änderung und Erweiterbarkeit des Modells (BMI 2018). Gegenüber dem V-Modell der VDI 2206 sind die folgenden Anpassungen vorgenommen:

- Das V-Modell XT definiert Rollen und ihre Verantwortung und Mitwirkung bei der Erstellung der Projektergebnisse. **Eine Rolle ist „die Beschreibung einer Menge von Aufgaben und Verantwortlichkeiten im Rahmen eines Projekts und einer Organisation“** (Weit e.V. 2017, S. 453). Eine Person kann mehrere Rollen besetzen, es kann aber auch eine Rolle durch mehrere Personen besetzt werden. Innerhalb eines Projektes ist die Rolle verantwortlich für Produkte des Projektes und führt Aktivitäten zu deren Fertigstellung durch.
- Die **Aktivitäten**, die zur Erstellung der Ergebnisse führen, werden detailliert beschrieben.

Das **W-Modell** nach Anderl ergänzt zwei wesentliche Unterschiede gegenüber dem V-Modell der VDI 2206 (Anderl, R., Nattermann, R. und Rollmann 2012):

- Die Nutzung neuartige Ansätze der **Integration** rein virtueller Modelle der Domänenentwicklung **zu interdisziplinären, domänenüberreifenden virtuellen Partialsystem-Modellen**. Erst nach Analyse und Simulation dieser virtuellen Modelle auf Partialsystem-Ebene findet die domänenspezifische Detailentwicklung auf Komponentenebene im rechten Teil des W statt.
- Nutzung eines speziellen **Datenmanagements**, das eine zentrale Verwaltung der Datensätze aller Fachdisziplinen, eine Steuerung aller Entwicklungsarbeiten sowie eine disziplinspezifische Analyse und disziplinübergreifende Synchronisation der Datensätze ermöglicht.

Eine weitere Ausprägung des V-Modells ist das **MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin** (Sünnetcioglu et al. 2015; Buchholz et al. 2018b), dargestellt in **Abbildung 29**. Wie das MVPE Modell ergänzt dieses Prozessmodell eine **rechnerunterstützte, formale Modellbildung und Dokumentation** entlang aller entwicklungsrelevanten Phasen des Produktlebenszyklus. Dazu sind sowohl in Spezifikation und Entwurf als auch in der Integration Prozessschritte und zugehörige Modelle und Prototypen definiert. Die Besonderheit des Prozessmodelles liegt darin, dass die drei Ebenen **Produkt, System und Subsystem** (1) ausschlaggebend für Entwicklungsaktivitäten sind (Sünnetcioglu et al. 2015, 48). Es wird ein iteratives Vorgehen, ähnlich dem inkrementellen Vorgehen der VDI 2206, beschrieben. Die Prozessschritte der Spezifikations- und Entwurfsseite werden zunächst für das Produkt durchlaufen.

Anschließend wird das Produkt in Systeme, final in Teilsysteme unterteilt und die Modelle so iterativ verfeinert. Erst dann werden die Anforderungen, Funktionen und das Systemmodell partitioniert und an die Domänenentwicklung (2) übergeben.

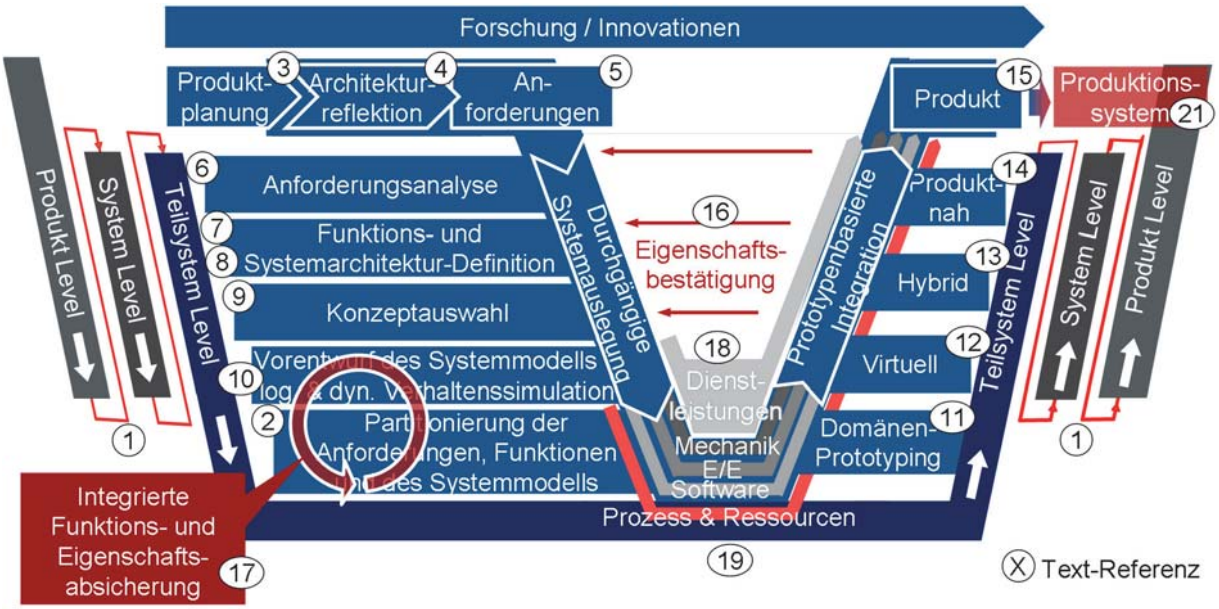


Abbildung 29: MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin (Buchholz et al. 2018b, S. 125)

Eine weitere Besonderheit des MBSE Prozessmodelles des Fraunhofer IPK und der TU Berlin ist die Ergänzung und Konkretisierung der Prozessschritte vor Beginn der durchgängigen Systementwicklung. So startet der in **Abbildung 29** dargestellte Prozess mit der zumeist strategisch durchgeführten, initialen Produktplanung (3) (Sünnetcioglu et al. 2014, S. 135). Auf diesen Schritt folgt der Prozessschritt der Reflexion der vorhandenen Architektur (4) zur Erfassung bestehender Architektur-Elemente, beispielsweise von Systemelementen eines Baukastens, auf dem das Produkt basiert. Anschließend erfolgt die Erstellung von High-Level Anforderungen (5), die das Produkt aus Kundenperspektive beschreiben (Sünnetcioglu et al. 2014, S. 135). Die Anforderungen entstammen üblicherweise aus internen Informationsquellen, beispielsweise Produktideen basierend auf eigenen Innovationen, sowie externen Informationsquellen, beispielsweise Marktanalysen. In dem darauf folgenden Schritt der Anforderungsanalyse (6) werden diese Anforderungen dann in technisch nutzbare Anforderungen konkretisiert: Es wird ein Lastenheft generiert (nach Sünnetcioglu et al. 2014, S. 135; Buchholz et al. 2018b, S. 122). Anschließend findet die durchgängige Systemauslegung analog dem V-Modell der VDI 2206 statt. Dabei werden Funktions- (7) und Systemmodelle (8) zur Beschreibung der Funktions- beziehungsweise Systemarchitektur erzeugt (Buchholz et al. 2018b, S. 122). Es folgt die Erstellung eines Konzeptmodelles (9) sowie die Erstellung funktionaler System-Modelle (10) für die erste domänenübergreifende Simulation des System-Verhaltens (Buchholz et al. 2018b, S. 122). Dieser Schritt entspricht der Sicht der Modellbildung und ersten Simulation quantitativer Modelle des zuvor beschriebenen MVPE-Modells.

Es folgt die Partitionierung und Übergabe der Anforderungen, Funktionen und des Systemmodells an die Domänenentwicklung (2). Die Domänenentwicklung schließt mit dem virtuellen Domänen-Prototyping (11), also der Erstellung und dem Test der Domänen-Prototypen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software. Diese werden in einer **prototypenbasierten Integration** zum Teilsystem integriert und getestet. Dies

geschieht vom integrierten virtuellen Prototyping (12) über das hybride Prototyping (13) hin zum produktnahen Prototyping (14) des Subsystems. Der Terminus „Produktnah“ bezeichnet Prototypen, die in einem dem fertigen Produkt nahen Zustand der Entwicklung sind (Buchholz et al. 2018b, S. 125). Dies kann – je nach Entwicklungsdomäne – beispielsweise ein seriennahes mechanisches Bauteil, eine seriennahe elektronische Steuerungsplatine oder eine seriennahe Software sein. Die Prototypen werden anschließend auf Systemlevel integriert und durchlaufen die Prozesskette des Prototyping erneut (Buchholz et al. 2018b, S. 125). Im Rahmen des iterativen Vorgehens werden Erkenntnisse aus den Tests zurück an die Domänen gespielt, die Prototypen werden mit Hilfe der Domänen-Werkzeuge entlang der Prozesskette zu steigender Reife weiterentwickelt. Der Integrationsprozess schließt mit dem Prozessschritt „Produkt“ (15), der die Fertigstellung des Produktes und damit das Ende der prototypenbasierten Integration darstellt (Buchholz et al. 2018b, S. 126).

Neben der **Eigenschaftsabsicherung** (16) analog VDI 2206 findet bereits auf der Spezifikations- und Entwurfsseite eine **integrierte Funktions- und Eigenschaftsabsicherung** (17) statt. Analog zum MVPE-Modell können hier erste Simulationen quantitativer, domänenübergreifender Modelle durchgeführt werden, beispielsweise im Rahmen der dynamischen Verhaltenssimulation mit multi-physikalischen Simulationsmodellen. Dazu sieht das Modell eine Erweiterung des domänenspezifischen Entwurfs um die **Dienstleistung** (18) vor. Die Dienstleistungen werden gleichzeitig und im Einklang mit dem Produkt entwickelt (Sünnetcioglu et al. 2015, 49). Auch die Produktionsplanung wird im Modell berücksichtigt: Neben der Planung von **(Produktions-) Prozess und Ressourcen** (19), die parallel mit der Domänenentwicklung beginnt, ist der abschließende Übergang von der Produktentwicklung in die Produktionsplanung (20) dargestellt.

3.2.3 Die Eigenschaftsabsicherung im V-Modell

Wie beschrieben befasst sich die Eigenschaftsabsicherung in V-Modell basierten Entwicklungsprozessen mit der fortlaufenden Überprüfung des Entwurfsfortschrittes in den Phasen der Systemintegration anhand der Anforderungen und Spezifikationen, die im Systementwurf definiert sind.

In den Prüfschritten der Eigenschaftsabsicherung finden Tests statt, in denen überprüft wird ob die Systemelemente ihren Spezifikationen entsprechen und das benötigte Verhalten zeigen (Weit e.V. 2017, S. 43).

In der Beschreibung von Tests durch Testprozesse existiert kein einheitlicher Standard. Verschiedene Autoren verorten die Schritte der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Tests in verschiedenen Prozessschritten. So kann der Testprozess durch die fünf Prozessschritte der Planung, Analyse und Design, Realisierung und Durchführung, Auswertung und Bericht sowie Abschluss beschrieben werden (Lütze 2014, S. 47). Auch eine Aufteilung in die vier Prozessschritte Testplanung, Testanalyse und -entwurf, Testaufbau sowie Testdurchführung und -auswertung ist möglich (Kasoju et al. 2013, S. 1243). Im Rahmen der Arbeit soll der fünfstufige Prozess nach Zander-Nowicka eingesetzt werden. Dieser in **Abbildung 30** dargestellte Prozess besteht aus den Prozessschritten Testplanung, Testspezifikation, Testdurchführung, Testaufnahmen sowie Testauswertung und -abschluss (Zander-Nowicka 2008, S. 22).

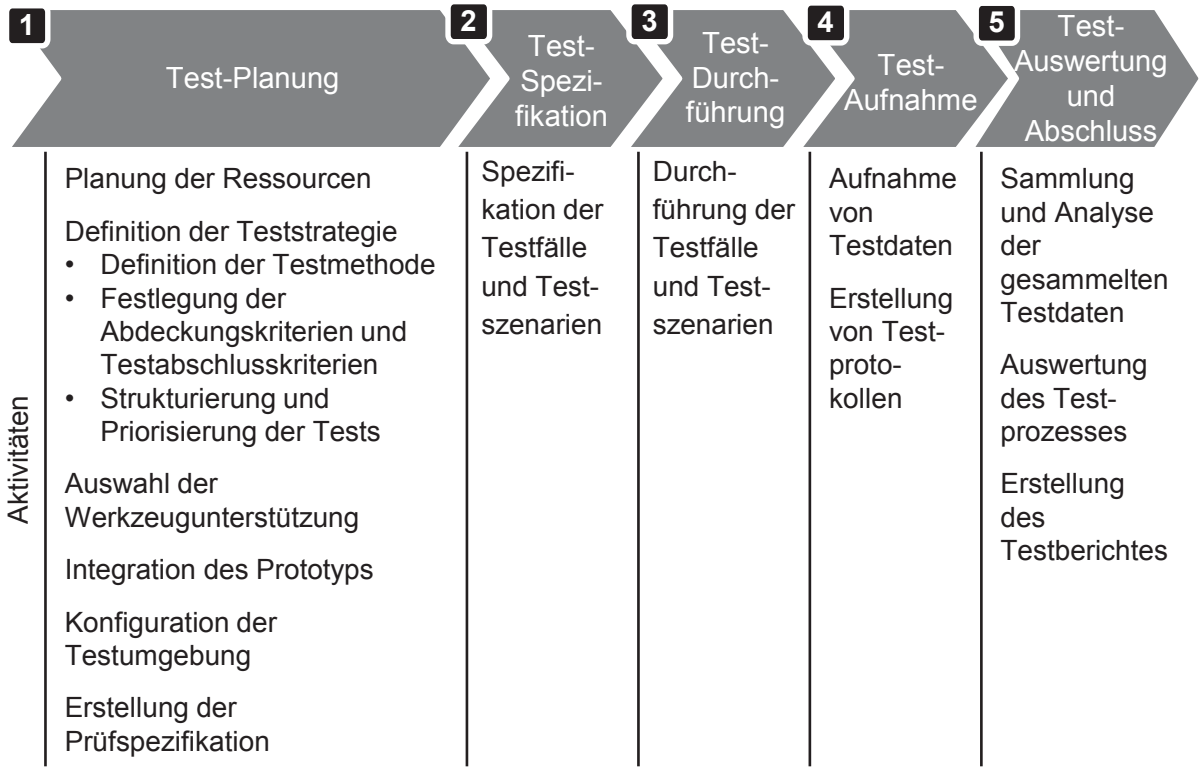


Abbildung 30: Prozessschritte und Aktivitäten im Testprozess (nach Zander-Nowicka 2008, S. 22ff; Weit e.V. 2017, S. 322–335)

Den Prozessschritten sind verschiedene Tätigkeiten zugeordnet, die von der Definition einer Teststrategie nebst Auswahl der geeigneten Werkzeuge und Testumgebungen, der Integration der Prototypen zu testbaren Systemen über die Datenaufnahme bis hin zur Erstellung eines Testberichtes reichen (Zander-Nowicka 2008, S. 22; Kasoju et al. 2013, S. 1243). Wie in **Abbildung 30** erkennbar, ist die Vorbereitung des Tests in den Prozessschritten der Testplanung und Testspezifikation im Vergleich wesentlich umfangreicher beschrieben als dessen Durchführung und Auswertung. Verschiedene Autoren heben die Wichtigkeit dieser initialen Prozessschritte hervor: In der Testvorbereitung werden Aspekte wie die fristgerechte Lieferung der Teile der Prototypen, der Integration der Prototypen, der Verfügbarkeit der Testumgebung oder die Zusammensetzung der Testgruppen bestimmt (Pilorget 2012, S. 22). Fehler in dieser Phase können zudem in der späteren Test-Durchführung oft nicht mehr korrigiert werden (Harlander 2015, S. 58). Im Folgenden werden die im Zusammenhang für die jeweiligen Prozessschritte wichtigsten Begriffe erläutert.

Prozessschritt 1: Testplanung

Der Begriff der **Ressource** bezeichnet alle für ein Projekt erforderlichen Eingangsgrößen und Rahmenbedingungen (DIN 69901-5). Der Begriff wird als Oberbegriff sowohl für Mitarbeiter und deren Rollen als auch für Sach- oder Finanzmittel verwendet (Angermeier 2012). Im Kontext des Tests bezeichnet die Ressource die am Test beteiligten Mitarbeiter-Rollen sowie das erforderliche Material, wie die Testwerkzeuge und die Testumgebung. Die **Testmethode** beschreibt die Vorschrift, die vorgibt, wie planmäßig und unter Gebrauch definierter Prinzipien im Test vorzugehen ist, um dessen festgelegte Ziele zu erreichen. Zur Festlegung der Testmethoden gehören die Festlegung des zu testenden System und der Testumgebung, der Testbedingungen sowie der zugehörigen Messverfahren, Abdeckungskriterien und Testabschlusskriterien (Braess

und Seiffert 2012, S. 921–922). Die **Abdeckungskriterien und Testabschlusskriterien** sind von einer „Komponente oder einem System zu erfüllen, um durch den Benutzer, Kunden oder eine bevollmächtigte Instanz abgenommen zu werden“ (ISTQB AISBL, German Testing Board e.V. 2018). Sie ergeben sich entweder direkt aus dem Lastenheft oder den Spezifikationen des Systems. Oder sie ergeben sich als empirisch-wissenschaftlich abgeleitete Größen komplexer Verhaltensweisen oder stark subjektiver Effekte (Braess und Seiffert 2012, S. 922). Die Auswahl der Messverfahren ist mit den Kriterien gekoppelt: So können Messungen mit direkten, am Messinstrument ablesbaren, oder indirekten, weitere Auswertungsschritte erfordernde Messverfahren erhoben werden (DIN 1319-1:1995-01). **Testbedingungen** beschreiben die Informationen, die für die Erreichung bestimmter Testziele relevant sind (ISTQB AISBL, German Testing Board e.V. 2018). In der Regel sind dies Rand- und Umgebungsbedingungen des Tests, beispielsweise Witterungsbedingungen (Braess und Seiffert 2012, S. 922). Das Dokument **„Prüfspezifikation“** (auch: Testspezifikation) dient der Rolle Prüfer als Vorgabe und Anleitung bei der Prüfung. In der Prüfspezifikation wird definiert, welche Abdeckungskriterien und Testabschlusskriterien in welcher Prüfung und mit welcher Integrationsstufe nachzuweisen sind, um die Anforderungen des zu prüfenden Systems, Teilsystems oder Elements zu erfüllen (Weit e.V. 2017, S. 87ff)

Prozessschritt 2: Test-Spezifikation

Auf Basis der in der „Prüfspezifikation“ spezifizierten Testbedingungen werden **Testfälle** beziehungsweise **Testszenarien** entwickelt (Pilorget 2012, S. 14; ISTQB AISBL, German Testing Board e.V. 2018). Diese dienen der Erbringung des Nachweises, dass Abdeckungskriterien und Testabschlusskriterien erfüllt sind und beinhalten eine Beschreibung aller dazu erforderlichen Vorbedingungen, Eingaben, Aktionen sowie den erwarteten Ergebnissen und Nachbedingungen. Die Definition der Testszenarien ist maßgeblich für die Qualität des Tests: Im Idealfall sind die Testfälle direkt mit einem oder mehreren Abdeckungskriterien und Testabschlusskriterien verknüpft (nach Pilorget 2012, S. 36). Der Begriff des Tests kann als Menge von einem oder mehreren Testfällen verstanden werden (ISTQB AISBL, German Testing Board e.V. 2018). Valide Testfälle entsprechen den Grundsätzen der Vollständigkeit, Nachvollziehbarkeit sowie Wiederholbarkeit (Pilorget 2012, S. 14): Eine **Vollständigkeit** ist gegeben, wenn jede Anforderung durch mindestens einen Testfall hinsichtlich der korrekten und unkorrekten Verarbeitung überprüft wird. Der Testfall ist **nachvollziehbar**, wenn er durch einen „neutralen“ Prüfer durchgeführt werden kann: Alle Daten und Informationen sind verständlich für eine Testdurchführung. Eine **Wiederholbarkeit** des Testfalles erfordert eine klare Ausgangslage mit definierten Testdaten.

Prozessschritt 3, 4 und 5: Testdurchführung und Testauswertung

Die Testdurchführung dient der Durchführung der Testszenarien sowie der Durchführung von Messungen während des Tests, während Testprotokolle und weitere Messdaten im nachfolgenden Prozessschritt der Testaufnahme erstellt werden (Zander-Nowicka 2008, S. 22). Der finale Prozessschritt „Testauswertung und -abschluss“ dient der Sammlung, Zusammenfassung und Analyse der gesammelten Testdaten, der Auswertung des Testprozesses sowie der Erstellung des abschließenden Dokuments „**Prüfbericht“** (Zander-Nowicka 2008, S. 23; Weit e.V. 2017, S. 90). Der Prüfbericht (auch: Testbericht) enthält die Aufzeichnungen über den Verlauf der Prüfung, die Gegenüberstellung von Ist- und Soll-Ergebnissen, sowie die Analyse der identifizierten Ist-/Soll-Abweichungen (Weit e.V. 2017, S. 90). Zudem sind teilweise auch Lösungsvorschläge beinhaltet.

Rollen im Test

Den Prozessschritten der Entwicklung sowie der Integration und Test sind verantwortliche Rollen zugeordnet. Die im Rahmen der Arbeit relevanten Rollen sind Entwickler, Systemintegrator, Prüfer und Anwender. Die Rolle **Entwickler** verantwortet die Realisierung der Hardware- sowie Software-Komponenten und Teilsysteme (Weit e.V. 2017, S. 229–230). Die Rolle ist beteiligt bei der Implementierung und schrittweisen Integration zum Teilsystem und System. Die Rolle **Systemintegrator** integriert die Systemelemente und Teilsysteme zum System (Weit e.V. 2017, S. 243). Der Systemintegrator verantwortet die Prozessschritte der prototypenbasierten Integration. Dies beinhaltet den Prototypenbau der Integration und eine Mitwirkung bei der Erstellung der Dokumente „Prüfspezifikation“ sowie „Testbericht“. Dazu verantwortet der Systemintegrator die Bereitstellung der Testumgebung. Die Rolle des **Prüfers** verantwortet die Prozessschritte des Testprozesses. Der Prüfer verantwortet die Erstellung des Dokuments „Prüfspezifikation“, beschreibt und erstellt die Testfälle, führt den Test durch und dokumentiert dessen Ergebnisse im „Testbericht“ (Pilorget 2012, S. 24; Weit e.V. 2017, S. 239). Die Testdurchführung beinhaltet gegebenenfalls die Simulation von fehlenden Teilen einer Systemimplementierung durch manuelle Bedieneingaben. Dieses Vorgehen wird als Wizard-of-Oz-Methode bezeichnet und im nachfolgenden Kapitel 3.3.4 detaillierter ausgeführt. Der Prüfer ist in der Regel ein Mitglied des Projektteams, meist ein sachkundiger Entwickler oder eine mit der Thematik des Prüfgegenstandes vertraute Person. Er darf jedoch nicht der Ersteller des Testobjektes sein (Weit e.V. 2017, S. 239; ISO 26262-1). Neben diesen Rollen, die üblicherweise von Beteiligten eines spezifischen Entwicklungsprojektes eingenommen werden, ist die Rolle des **Anwenders** des zu entwickelnden Systems maßgeblich (Weit e.V. 2017, S. 224–225). In der Entwicklung des FAS entspricht diese Rolle dem Nutzer des FAS, dem Fahrer.

Verortung des Testprozesses im V-Modell

Entsprechend dieser Vorgaben kann eine Verortung des Testprozesses und dessen Rollen in das MBSE-Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin vorgenommen werden. Die Prozessschritte „Test-Planung“ und „Test-Spezifikation“ dienen der Integration der aus der Domänen-Entwicklung stammenden Prototypen zu dem im Test zu prüfenden integrierten Prototyp durch den Systemintegrator, gegebenenfalls unterstützt durch den Entwickler. Dazu verantwortet der Systemintegrator die Bereitstellung der Testumgebung. Der Prüfer definiert in der Test-Planung die Prüfspezifikation, nach der der Prototyp getestet wird sowie die Testfälle und die Testszenarien in der Test-Spezifikation. Der Prototyp wie auch die Testumgebung können rein virtuell, hybrid oder produktnah sei: Die zwei Prozessschritte können demnach in der Prototypenbasierten Integration verortet werden. Die Prozessschritte der „Test-Durchführung“, „Test-Aufnahme“ sowie „Test-Auswertung und Abschluss“ dienen der Durchführung des Tests, der Aufnahme von Testdaten und deren Sammlung, Analyse und Auswertung durch den Prüfer. Je nach Testverfahren ist der Anwender in der „Test-Durchführung“ sowie der Aufnahme von Testdaten in der „Test-Aufnahme“ beteiligt. Der Systemintegrator kann den Prüfer in der abschließenden Erstellung des Prüfberichtes zur formalisierten Zusammenfassung der Erkenntnisse des Tests unterstützen. Entsprechend können diese drei Prozessschritte der Eigenschaftsbestätigung zugeordnet werden.

Abbildung 31 zeigt den Testprozesses verortet im MBSE-Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin. Die verantwortlichen und mitwirkenden Rollen sowie die erstellten Artefakte sind in der Darstellung integriert.

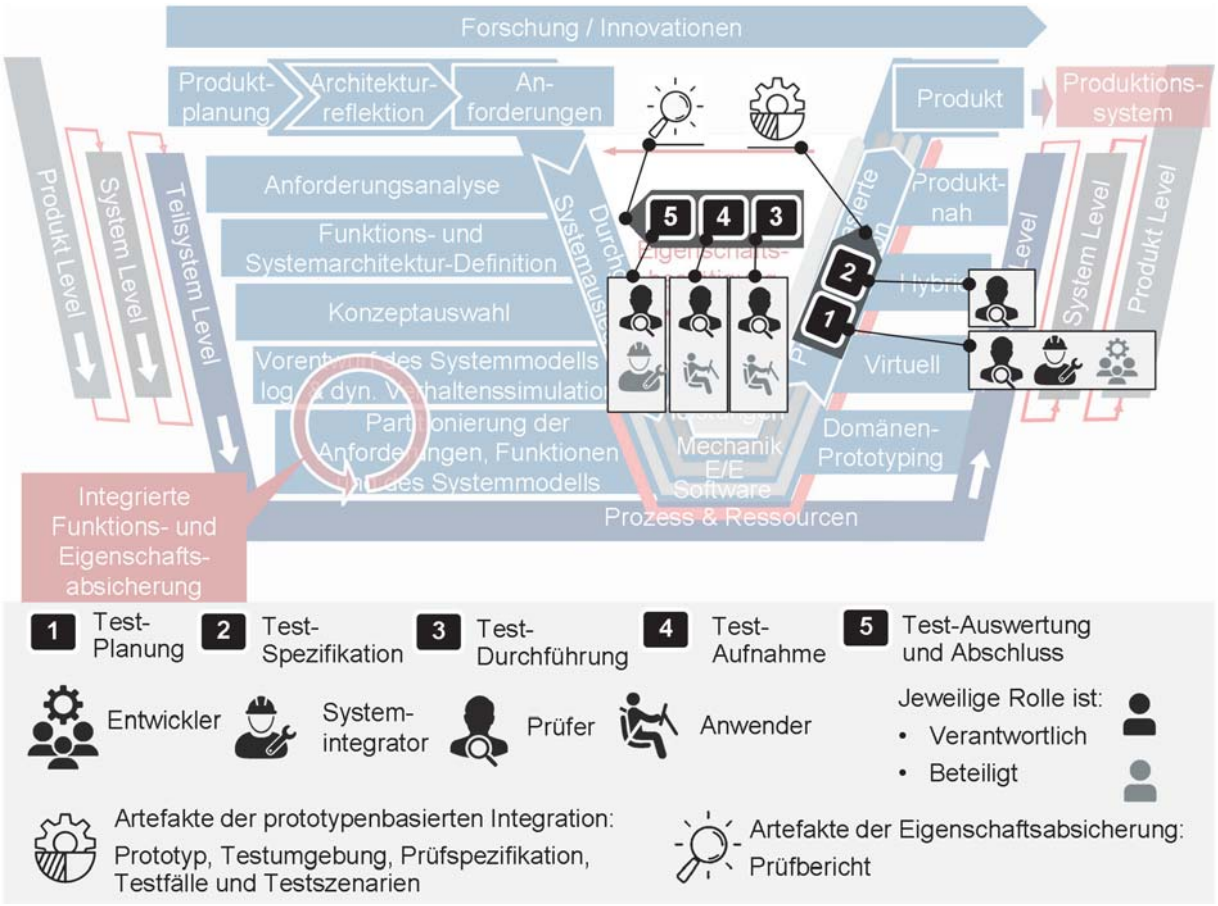


Abbildung 31: Verortung des Testprozesses, dessen Artefakte und dessen Rollen im MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin

Nachfolgend sollen die Grundlagen zum Verständnis der im industriellen FAS Test eingesetzten Testverfahren zum Test der Mechanik, Elektrik und Elektronik sowie Software beschrieben werden.

3.3 Grundlagen des Tests von Fahrerassistenzsystemen

Wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, interagiert das FAS im Regelkreis der Mechatronik mit dem Fahrzeug, der Fahrumgebung, Fremdfahrzeugen sowie der Infrastruktur. Daher spielt die Anpassung der Technik an die individuellen Fähigkeiten des Fahrers eine essentielle Rolle, denn die Leistungsfähigkeit des FAS wird durch das Verständnis, die Akzeptanz und positive Einschätzung des Fahrers definiert (nach Bubb 2015, S. 587). In diesem Kontext ist der Begriffe der Nutzungserfahrung, welche auch im Deutschen zumeist mit dem englischen Begriff der **User Experience (UX)** bezeichnet wird, entscheidend (Preim und Dachselt 2015, S. 4).

User Experience (UX) Design versteht sich als „ganzheitlicher Gestaltungsansatz, der sowohl die Gebrauchstauglichkeit (im englischen: Usability) und Nützlichkeit (Usefulness) eines Systems, aber auch der subjektiven Wahrnehmungen, Gefühle und Bedürfnisse bei dessen Nutzung berücksichtigt“ (Preim und Dachselt 2015, S. 4)

Diesem Verständnis folgend, wird das Experience (UX) Design im Folgenden als eigene Entwicklungsdomäne in der Entwicklung von FAS verstanden und beschrieben. Der Fokus der Entwicklung und des Tests in dieser Domäne unterscheidet sich zum Teil signifikant von den zuvor beschriebenen Domänen „Mechanik“, „Elektrik und Elektronik“ und „Software“.

Die nachfolgenden Ausführungen in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.4 dienen daher der Beschreibung der Grundlagen des Tests in den vier Domänen „Mechanik“, „Elektrik und Elektronik“, „Software“ und „User Experience Design“. Abschließend erfolgt die Beschreibung der Grundlagen des Domänen-übergreifenden Tests in Kapitel 3.3.5.

3.3.1 Grundlagen des Mechanik-Tests

Das FAS interagiert im Regelkreis der Fahrer-FAS Interaktion mit dem Fahrer. Im Test dieser Interaktion werden die **anthropometrischen sowie ergonomischen Gestaltungsmerkmale** der Mensch-Maschine Schnittstelle getestet (Bubb 2015, S. 355). Es gilt:

„Anthropometrie bezeichnet die Wissenschaft von den Maßverhältnissen am menschlichen Körper und deren exakter Bestimmung“ (Adler 2010, S. 16).

„Ergonomie ist die wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst“ (Adler 2010, S. 158).

Der Test anthropometrischer und ergonomischer Gestaltungsmerkmale basiert auf Testverfahren der Mechanik, beispielsweise der Geometrieanalyse. Die Erstellung geometrischer Prototypen wird im automobilen Produktentwicklungsprozess in Computer-Aided-Design (CAD) Werkzeugen durchgeführt (Stark et al. 2011, S. 23; Eigner et al. 2012, S. 15; Beitz und Grote 2001, Y9). Da sich CAD-Prototypen insbesondere bei Systemen hoher Komplexität durch hohe Datenmengen auszeichnen, werden für Evaluation und Test zusätzlich sogenannte Digital Mock-Ups (DMU) eingesetzt (Stark et al. 2011, S. 24; Eigner et al. 2014, S. 183). Diese vereinfachen die Geometrie und damit die Datenmenge von CAD- Prototypen und ermöglichen eine Reduktion des Rechenaufwandes.

Der Test der anthropometrischen und ergonomischen Gestaltungsmerkmale der Mensch-Maschine Schnittstelle wird durch die Kriterien der **Sichtbarkeit**, **Erreichbarkeit** und **Bedienbarkeit** bestimmt (Bubb 2015, S. 355). Für den Test werden die virtuellen CAD beziehungsweise DMU-Prototypen der Mensch-Maschine Schnittstelle in den Kontext eines Umgebungsmodells, zumeist eines Fahrzeugcockpits, eingebunden. Dort können mit anthropometrischen virtuellen Menschmodellen Erreich- sowie Sichtbarkeitstest für Anzeigen und Bedienelemente durchgeführt werden (Bubb 2015, S. 243–251; Braess und Seiffert 2012, S. 449). Im Kontext der Fahrzeugentwicklung werden diese Modelle zunächst zur Abbildung der Maßverhältnisse des menschlichen Körpers sowie dessen mögliche Haltungen während der Fahrt eingesetzt (Bubb 2015, S. 241). Bekannte Modelle sind beispielsweise das JACK-Menschmodell oder das RAMSIS-Menschmodell (Rechnergestütztes Anthropometrisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation), die beide oft für die Analyse von Fahrzeuginnenräumen eingesetzt werden (Bubb 2015, S. 183).

Abbildung 32 zeigt exemplarisch das zugehörige statische Testverfahren **virtuelle Geometrieanalyse**, wie es im Test von Anzeigen und Bedienelementen von FAS zu Einsatz kommt. Im abgebildeten Beispiel werden mit Hilfe eines virtuellen Menschmodells eine Sichtfeldanalyse sowie eine Erreichbarkeitsanalyse durchgeführt. Die Sichtfeldanalyse des Modells zeigt die Sicht des virtuellen Mensch-Modells über das primäre sowie periphere Sichtfeld des linken Auges abhängig von der Kopfhaltung. Dazu wird die Erreichbarkeit von Tastern auf der Mittelkonsole durch den rechten Arm des virtuellen Mensch-Modells untersucht. Neben den gezeigten statischen Untersuchungen können auch dynamische Untersuchungen, wie beispielsweise die Wirkung von Kräften bei Unfällen, mit virtuellen Menschmodellen durchgeführt werden (Bubb 2015,

S. 241–242). Neben der Absicherung von Mensch-Maschine Interaktion wird die virtuelle Geometrieanalyse auch für weitere Tests eingesetzt. So wird beispielsweise die Kollisionsfreiheit von Komponenten sowie deren Verbaubarkeit mit Tests in CAD- und DMU-Tools abgesichert (Eigner et al. 2014, S. 185).

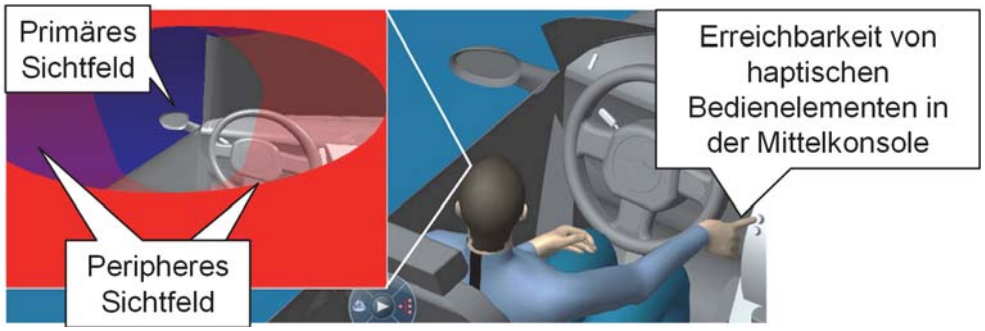


Abbildung 32: Virtuelle Geometrieanalyse mit dem anthropometrischen, virtuellen Mensch-Modell (Grohmann et al. 2017, S. 43)

Im Test anthropometrischer und ergonomischer Gestaltungsmerkmale von Mensch-Maschine Schnittstellen existieren starke Abhängigkeiten zu anderen Kriterien der Fahrzeuggestaltung, beispielsweise dem Sitzen oder dem Raumgefühl des Fahrzeugcockpits (Bubb 2015, S. 355). Ein vollständiger Test erfordert somit zwingend die Anwesenheit eines realen Menschen, denn die beschriebenen virtuellen Menschmodelle sind für eine derartige subjektive Einschätzung nicht nutzbar. Dazu ist der Test dieser Kriterien nur im Kontext des Einbauortes der Mensch-Maschine Schnittstellen sinnvoll, also dem Fahrzeug und dessen Cockpit. Das dazugehörige Testverfahren, in dem der menschliche Fahrer und nicht das virtuelle Fahrermodell die Grundlage der Analyse bildet, wird als **Geometrieanalyse** bezeichnet (Bubb 2015, S. 589ff).

In der Geometrieanalyse können zwei Testumgebungen zum Einsatz kommen: Zum einen Testumgebungen, die CAD- und DMU-Modelle mit 3D Anzeigetechnologie dreidimensional darstellen. Die Modelle werden in der virtuellen Realität, in der Fahrzeugentwicklung zumeist mit dem englischen Begriff **Virtual Reality (VR)** bezeichnet, maßstabsgetreu dargestellt (Stark et al. 2011, S. 25; Bubb 2015, S. 588–589). Zum anderen werden physische **Sitzkisten** als Testumgebung eingesetzt (Braess und Seiffert 2012, S. 450; Bubb 2015, S. 590).

VR-Technologie nutzt den Mechanismus der Tiefenwahrnehmung visueller Bilder durch das Stereosehen, der Wahrnehmung zweier leicht verschiedener Bilder in beiden Augen (siehe Kapitel 3.3). Zur Erzeugung dieses Effektes kommen zwei Technologien zum Einsatz: Zum einen die hochfrequente gleichzeitige Darstellung mehrerer, zueinander leicht versetzter Bilder auf einem Bildschirm oder einer Leinwand. Diese Bilder werden durch eine durch den Nutzer zu tragende Polarisations- beziehungsweise Shutterbrille in separate Bilder für das linke und rechte Auge aufgetrennt (Bubb 2015, S. 593–594). Zum anderen sogenannte Virtual Reality Head Mounted Displays (VR-HMDs), die über zwei kleine Bildschirme jeweils Bilder für das linke und rechte Auge erzeugen (Bubb 2015, S. 595). Exemplarisch zeigt **Abbildung 33 (Links)** einen Nutzer mit Shutterbrille, der eine Geometrieanalyse an einem für Ihn dreidimensional dargestellten Cockpit durchführt.

Abbildung 33 (Rechts) zeigt exemplarisch eine Sitzkiste, die das Fahrzeugcockpit hinsichtlich seiner wichtigsten geometrischen Parameter physisch abbildet. Zur Herstellung von Sitzkisten kommen oft **Rapid-Prototyping Verfahren** zum Einsatz (Braess und Seiffert 2012, S. 450; Bubb 2015, S. 590). In der Entwicklung mechanischer Produkte ist dieser Begriff zumeist mit generativen Fertigungsverfahren des additiven

Materialauftrags verknüpft (Eigner et al. 2014, S. 22; Seiffert und Rainer 2008, S. 34; Filippi und Barattin 2012, S. 148; Feldhusen und Grote 2013, S. 428). Auch die computergestützte Bearbeitung von Werkstücken, beispielsweise das Laserschneiden, wird von einigen Autoren unter diesem Begriff geführt (Ängeslevä et al. 2016, S. 6). Mittels Rapid-Prototyping Fertigungsverfahren hergestellte Prototypen werden auch als **Mock Up** oder **Physical Mock-Up** (PMU) bezeichnet (Bubb 2015, S. 591ff; Eigner et al. 2014, S. 185). Auch in der Absicherung von Kollisionsfreiheit oder Verbaubarkeit beispielsweise von Steuergeräten oder Anzeigen wird auf Rapid-Prototyping Fertigungsverfahren zurückgegriffen.

Abbildung 33: Geometrieanalyse zum Test der anthropometrischen und ergonomischen Gestaltung – (Links) in der Virtual Reality (Bubb 2015, S. 593), (Rechts) in der Rapid-Prototyping Sitzkiste (Bubb 2015, S. 590),

3.3.2 Grundlagen des Elektrik-/Elektronik-Tests

Die Elektrik-Entwicklung nutzt zum einen virtuelle 2D-Modelle für den Entwurf von System- und Kabelschaltplänen, die die elektrischen Parameter des Systems beschreiben (Braess und Seiffert 2012, S. 675). Auch der modellbasierte Entwurf von Schaltungen, Leiterplatten und Chips gehört in diese Kategorie (Eigner 2012, S. 16). Zum anderen werden 3D CAD- sowie DMU-Modelle für den Entwurf von elektrischen Komponenten, elektrischer Befestigungs- sowie Verbindungstechnik genutzt (Braess und Seiffert 2012, S. 675). Zur Abgrenzung zu den zuvor beschriebenen CAD-Modellen des Mechanik-Entwurfs werden diese Modelle auch als **2D** und **3D E-CAD-Modelle** bezeichnet (Eigner 2012, S. 15). Durch Verknüpfung der Teilmodelle dieser beiden Stränge können erste Prüfungen des elektrischen Systems durchgeführt werden (Braess und Seiffert 2012, S. 675–677). Beispielsweise die Prüfung, ob elektrische, funktionale und konstruktive Regeln eingehalten werden oder ob geometrische Aspekte wie Leiterquerschnitt oder -länge mit elektrischen Kenndaten übereinstimmen. **Abbildung 34 (Links)** zeigt das 3D E-CAD-Modell eines Fahrzeug-Bordnetzes.

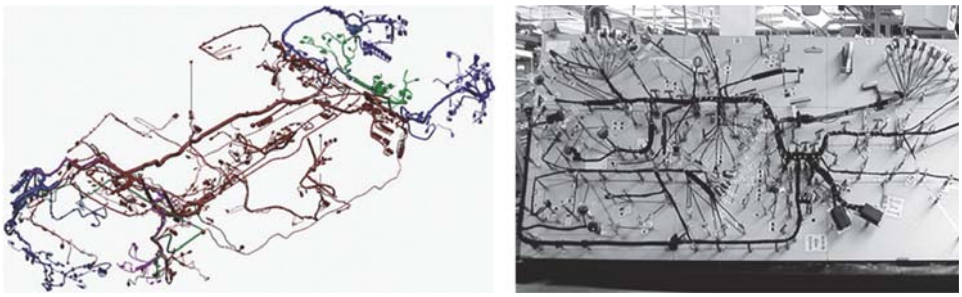


Abbildung 34: (Links) 3D E-CAD-Modell eines Bordnetzes (Braess und Seiffert 2012, S. 676), (Rechts) Test-Board für den Elektriktest (Braess und Seiffert 2012, S. 663)

Die Prüfungen, die mit den Werkzeugen des Elektrik-Entwurfs durchgeführt werden, beschränken sich jedoch mehrheitlich auf statische funktionale und geometrische Aspekte (Eigner 2012, S. 16). Mehrheitlich werden Elektrik-Komponenten heute mit physischen Prototypen, wie dem in **Abbildung 34 (Rechts)** dargestellten Test-Board zum physischen Leitungstest, getestet (Braess und Seiffert 2012, S. 654ff). An diesem Prototyp werden in der Entwicklung von FAS **Elektrik-Tests** durchgeführt, in dem die Elektrik-, aber auch Elektronik-Komponenten auf anforderungsgerechtes Verhalten in Reaktion auf statische und dynamische elektrische Spannungen getestet werden (ISO 26262-5, S. 28).

Auch die **Elektronikentwicklung** setzt mehrheitlich physische Prototypen und Testverfahren ein. So werden die Elektronik-Prototypen mit statischen Testverfahren wie dem **Robustheitstest**, der **Kontrollanalyse** und der **Fehler-Analyse** getestet (ISO 26262-5, S. 28–29; Balci 1998, S. 367–369; Schleuter et al. 2007, S. 8) sowie mit dynamischen Testverfahren wie dem **Funktionstest** oder dem **Falsch-Eingabe Test** (ISO 26262-5, S. 28; Balci 1998, S. 377). **Anhang A** beinhaltet eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Testverfahren des Elektrik- sowie Elektronik-Tests.

Ebenso wie in der Mechanik ist im Elektronik-Test der Begriff des Rapid Prototyping gängig und wird wie folgt beschrieben:

In der Elektronikentwicklung beschreibt der Begriff des Rapid Prototyping den Aufbau von Architekturprototypen auf Basis von Standardkomponenten in Verbindung mit noch in der Entwicklung befindlichen Elementen des Systems (Burst 2000, S. 42; Bieser 2007, S. 58).

Im Rapid Prototyping werden **Mikrocontroller** eingesetzt, welche über programmierbare Input/Output-Schnittstellen mit der Umgebung kommunizieren (Metz 2014; Bieser 2007, S. 58). Der ausführbare Softwarecode der Mikrocontroller wird in spezifischen Programmiersprachen programmiert. Oft beinhalten Mikrocontroller-Lösungen für das Rapid Prototyping auch spezielle Software-Tools, die eine vereinfachte Erstellung des ausführbaren Softwarecodes ermöglichen. Davon abgegrenzt ist das **realisierungsorientierte Rapid Prototyping,** bei dem leistungsfähige, hochspezialisierte Prototypen erzeugt werden, welche bereits eine hohe Nähe zum Seriensystem besitzen (Bieser 2007, S. 59; Burst 2000, S. 42).

3.3.3 Grundlagen des Software-Tests

Im Softwaretest werden informelle, statische und dynamische Testverfahren eingesetzt. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, beruhen informelle Testverfahren auf subjektiven Einschätzungen zumeist von Entwurfs- und Konzeptmodellen durch Menschen, in diesem Fall durch Experten aus dem Software-Entwicklungsprozess. Gängige Testverfahren sind die **Inspektion**, die Begutachtung, die **Validierung im Dialog**, der **Schreibtischtest** oder der **Walkthrough** (nach Balci 1998, S. 363–366; Projekt B-U-I 2010; Rabe et al. 2008, S. 97–109; Harvey et al. 2011, S. 568). Statische Testverfahren wie die **Kontroll**- und die **Fehler-Analyse** prüfen Entwurfsmodelle der Software auf Basis von Beurteilungen der Charakteristika Genauigkeit, Konsistenz und Korrektheit (Balci 1998, S. 367–369). In dynamischen Testverfahren werden maschinenausführbare Software-Modelle hinsichtlich der Charakteristika korrektes Verhalten, Plausibilität, Funktion, Reichweite und Echtzeitverhalten geprüft (Balci 1998, S. 377ff; ISO 26262-6, S. 13ff). Dabei kommen Testverfahren wie die **Visualisierung im Dialog**, **der Funktionstest, der Falsch-Eingabe Test** oder verschiedene **XiL-Testverfahren** zum Einsatz. Zu den dynamischen Testverfahren lassen sich auch die Testverfahren **Feldtest**, **Langzeittest** oder **Nutzertest im Straßenverkehr** zuordnen: Auch diese

Testverfahren nutzen maschinenausführbare Modelle und binden diese in Testfahrzeuge verschiedener Reifegrade ein (ISO 26262-4, S. 23–24; Bubb 2015, S. 613ff; Response Consortium 2009, A62-A65). Eine detaillierte Beschreibung der aufgeführten Testverfahren ist **Anhang A** zu entnehmen.

Maschinenausführbare Software-Modelle für dynamische Tests können durch Erstellung von Softwarecode in einer Programmiersprache oder mittels mathematischen Bausteinen, die Funktionen grafisch repräsentieren, erstellt werden (Rabe et al. 2008, S. 49; Bieser 2007, S. 53–54). Letztere werden auch durch den Begriff des **Computer Aided Software Engineering (CASE) Modellierwerkzeugs** beschrieben (Bieser 2007, S. 53; VDI 2206, S. 65; Eigner et al. 2014, S. 163).

Als CASE- Modellierwerkzeuge oder auch CASE-Tools werden die Modellierungs- und Simulationswerkzeuge bezeichnet, die eine Erzeugung einer grafischen Repräsentierung angestrebter Funktionalitäten und damit eines ausführbaren Verhaltensmodelles ermöglichen.

Bekannteste Beispiele dieser Werkzeuge in der Automobilindustrie sind MATLAB/Simulink, Dymola oder Stateflow (Deicke 2018, S. 24; Bieser 2007, S. 53). Vorteil der Tools aus Sicht der Automobilindustrie ist zunächst die bessere Verständlichkeit gegenüber Softwarecode: So ermöglichen grafische Bausteine eine im Vergleich wesentlich übersichtlichere Modellgestaltungen (Bieser 2007, S. 53). Zum anderen ermöglicht die Nutzung von CASE-Tools die automatisierte Generierung von ausführbarem Programmcode. Dieser Ansatz wird auch als **Rapid Control Prototyping (RCP)** bezeichnet (Borgeest 2010, S. 216; Bieser 2007, S. 58; Wallentowitz und Reif 2006, S. 656). In der Modellierung werden die mathematischen Bausteine mit sogenannten Konnektoren verknüpft. Diese stellen eine grafische Repräsentation einer mathematischen Potential- oder Flussgröße dar und legen fest, wie einzelne Bausteine wechselwirken (Maurer 2015).

Mit in der Industrie gebräuchlichen CASE-Tools wie MATLAB/Simulink oder auch Modelica basierten Tools können mit vordefinierten Modell-Blöcken einfach und schnell Regler, aber auch Bauelemente von Sensoren und Aktoren definiert werden (Deicke 2018, S. 24). So ermöglichen vorkonfigurierte Blöcke sowie Schnittstellen zu anderen Tools ein virtuelles Prototyping der Bauelemente Signalaufbereitung, Signalwandlung und Signalverarbeitung des Sensor-Steuergeräts. Exemplarisch zeigt **Abbildung 35 (Links)** einen in Simulink modellierter Regler. **Abbildung 35 (Rechts)** zeigt einen in Dymola modellierter Signalwandler einer Sensorik.

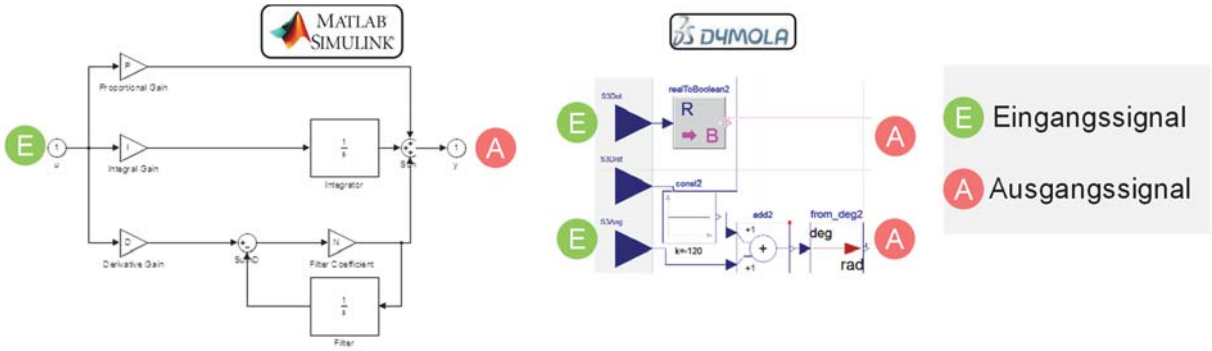


Abbildung 35: (Links) Regler einer Steuerung, modelliert in Simulink (MATLAB Answers 2014), (Rechts) Signalwandlung von zwei Sensor-Rohsignalen in Dymola (Engel et al. 2017, S. 21)

Ebenso können in mit CASE-Tools erstellten Aktor-Bauelementen Steuerungssignale in verwendbare Aktorsignale umgewandelt werden. Abweichend von physischen Aktoren, wie sie in Kapitel 3.1.2 beschrieben sind, findet bei der Nutzung virtueller Aktoren keine Umwandlung von Signal- in Energieflüsse statt. Jedoch ist weiterhin die Umwandlung des von der Steuerung gesendeten Signals in eine für den Aktor verständliche Signalform erforderlich. Das entsprechende Element des Aktors wird im Rahmen der Arbeit als **virtueller Energiesteller** bezeichnet.

An das ausführbare System werden **Echtzeitanforderungen** gestellt. Diese spezifizieren die Zeit, in der ein ausführbareres System korrekte Ausgangswerte zur gegeben Eingangswerten produzieren muss (Zander-Nowicka 2008, S. 13; Bender 2005, S. 367; Schäuffele und Zurawka 2013, S. 61). Für die Echtzeitfähigkeit eines Systems oder eines Modells wird üblicherweise zwischen **harter und weicher Echtzeit** unterschieden (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 61):

Ein System oder Modell erfüllt harte Echtzeitanforderungen, wenn zeitliche Anforderungen der Aufgabe/des Tests in jedem Fall erfüllt werden (nach Zander-Nowicka 2008, S. 13; Borgeest 2010, S. 181; Schäuffele und Zurawka 2013, S. 61).

Ein System oder Modell erfüllt weiche Echtzeitanforderungen, wenn die zeitlichen Anforderungen der Aufgabe/des Tests im durchschnittlichen Fall zu einem bestimmten Prozentsatz erfüllt werden (nach Zander-Nowicka 2008, S. 13; Borgeest 2010, S. 180; Schäuffele und Zurawka 2013, S. 61).

Wie in **Abbildung 36** dargestellt, können Tests maschinenausführbarer Modelle **unidirektional** oder **bidirektional** durchgeführt werden. Beim unidirektionalen Test, in der Softwareentwicklung auch als Open-Loop Test bezeichnet, wird ein manuelles oder ein toolbasiert generiertes Eingangssignal in das ausführbare Simulationsmodell des zu testenden Systems gegeben (Krasnogolowy 2009, S. 4). Die Algorithmen des Modells werden auf dieses Signal angewendet, die resultierende Antwort des Modells wird als Signaloutput aufgenommen und kann durch den Prüfer analysiert werden.

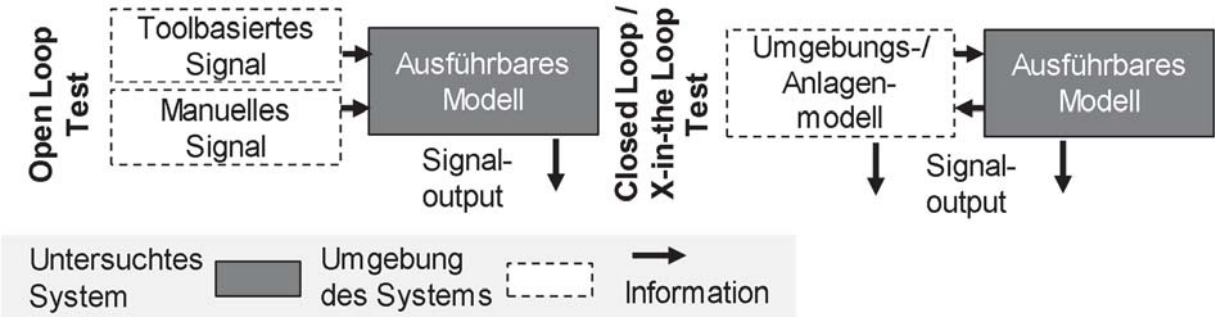


Abbildung 36: Open und Closed / X-in-the-Loop Tests an ausführbaren Systemen (nach Krasnogolowy 2009, S. 4)

Beim bidirektionalen Test, der in der Softwareentwicklung auch als Closed-Loop Test oder auch **X-in-the-Loop (XiL) Test** bezeichnet wird, interagiert ein zweites Modell mit dem ausführbaren Simulationsmodell des zu testenden Systems (Krasnogolowy 2009, S. 4; Gerke und Roggero 2016, S. 28; Reif 2011, S. 223). Dieses Umgebungsmodell, das beispielsweise Fahrumgebungs-, Anlagen oder Fahrzeugmodelle simulieren kann, nimmt das Ausgangssignal des zu testenden Systems auf und generiert seinerseits eine Reaktion auf dieses, welches als Eingangssignal wieder an das Simulationsmodell gegeben wird (nach Schäuffele und Zurawka 2013, S. 234ff; Zander-Nowicka 2008, S. 25). Der Prüfer kann die Signaloutputs beider Modelle analysieren und zueinander in den Kontext stellen. Das Umgebungsmodell kann auch reale Elemente,

beispielsweise Sensoren oder Aktoren koppeln (Reif 2011, S. 223). Der X-in-the-Loop (XiL) Test wird daher wie folgt definiert:

Der X-in-the-Loop (XiL) Test bezeichnet den Test eines Systems im Regelkreis mit einem Umgebungsmodell, das es mit Inputs anregt und dessen Outputs zur Beobachtung und Analyse aufnimmt.

Dieser Typ von Test wird auch unter dem Begriff der **Co-Simulation** geführt. Diese bezeichnet die Methoden und Technologien zur Ermöglichung einer Simulation eines gekoppelten Systems durch die Zusammenführung von Simulationen beziehungsweise Simulatoren (Gomes et al. 2017, S. 4). Die verschiedenen XiL-Tests unterscheiden sich hinsichtlich des Typs des maschinenausführbaren Modells, des Umgebungsmodells, des Testfokus sowie der Testumgebung, in der der Test durchgeführt wird.

Bei **Model-in-the-Loop (MiL) Tests** wird ein Funktionsmodell der Software des zu testenden Systems, das mit CASE Tools erstellt wird, in Interaktion mit einem Umgebungsmodell auf einem Entwicklungsrechner getestet (nach Zander-Nowicka 2008, S. 25; Bieser 2007, S. 3; Yadav und Guddeti 2016, S. 159; Reif 2011, S. 224). Die CASE-Tools übernehmen sowohl die Simulation des zu testenden Systems als auch die Umgebungssimulation (Deicke 2018, S. 24). Der Testfokus des MiL Tests ist der Funktionstest in frühen Entwicklungsphasen (Zander-Nowicka 2008, S. 25). Dabei wird das Verhalten des zu testenden Systems mit funktionalen Anforderungen, die das Verhalten des Systems zwischen Input und Output beschrieben, abgeglichen (Zander-Nowicka 2008, S. 24). Die Co-Simulation von im CASE-Tool erstellten Prototypen mit einem Umgebungsmodell stellt die Anforderung nach „weicher Echtzeit“: Eine Überschreitung von Zeitbedingungen, beispielsweise bei dem periodische Auslesen eines Sensors oder während der Bildgenerierung eines Visualisierungssystems, ist bis zu einem bestimmten Umfang akzeptabel (Wörn und Brinkschulte 2005, S. 311–312; Reif 2011, S. 84).

Bei **Software-in-the-Loop (SiL) Tests** wird Softwarecode des zu testenden Systems, der entweder direkt in der Programmiersprache erstellt oder mit einem Codegenerator beispielsweise aus dem Funktionsmodell generiert wird, in Interaktion mit einem Umgebungsmodell auf einem Entwicklungsrechner getestet (Zander-Nowicka 2008, S. 25; Reif 2011, S. 224). Der Testfokus ist auch hier der Funktionstest sowie zusätzlich das Auffinden von Fehlern im Softwarecode (Zander-Nowicka 2008, S. 25).

Bei **Hardware-in-the-Loop (HiL) Tests** wird der Softwarecode des zu testenden Systems in die Hardware eines Steuergerätes implementiert. Anschließend wird es in Interaktion mit einem über digitale und analoge Schnittstellen verbundenen Entwicklungsrechner, auf dem das Umgebungsmodell läuft, getestet (nach Zander-Nowicka 2008, S. 25–26; Abel und Bollig 2006, S. 304; Bender 2005, S. 370). Im HiL-Test können auch weitere Elemente des mechatronischen Systems, beispielsweise Sensoren oder Aktoren, als Hardware eingebunden werden (Reif 2011, S. 223). Der Testfokus ist das Auffinden von Fehlern des Steuergeräts, in den Ein-/Ausgangsschnittstellen sowie des integrierten zu testenden Systems, bestehend aus Steuergerät und dem darauf implementierten Softwarecode (Zander-Nowicka 2008, S. 25–26; Abel und Bollig 2006, S. 304). Ein entscheidendes Merkmal des HiL-Tests ist die Anforderung nach harter Echtzeit, welche durch die Kommunikation mit dem Steuergerät an das Umgebungsmodell gestellt wird. Bei harter Echtzeit ist eine Zeitüberschreitung nicht akzeptabel und wird als Versagen des zu testenden Systems gewertet (nach Wörn und Brinkschulte 2005, S. 311; Reif 2011, S. 84; Hommel 2006, S. 14). **Abbildung 37** zeigt exemplarisch einen Hardware-in-the-Loop Prüfstand zum Test von Radar-Sensoren.

Der Radar-Sensor ist mit dem Sensor-Steuergerät, auf dem der Software-Code aufgespielt ist, verbunden und auf dem HiL Prüfstand implementiert (dSPACE 2019). Ein Entwicklungsrechner dient der Steuerung dieses Setups und des Umgebungsmodells.

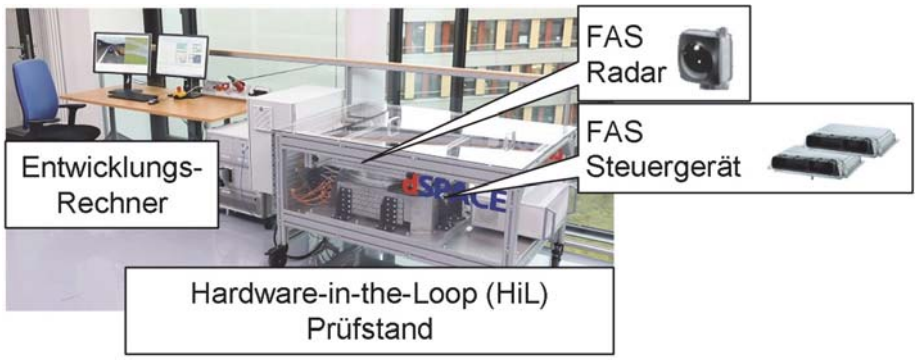


Abbildung 37: Hardware-in-the-Loop Prüfstand zum Test von Radar-Sensorik (dSPACE 2019)

Beim **Function-in-the-Loop (FiL) Test** ist der Softwarecode ebenso wie beim HiL-Test auf dem Steuergerät eingebettet (Reif 2011, S. 224). Im Unterschied zum HiL-Test liegt der Testfokus hier auf dem Softwarecode des zu testenden Systems. Oft wird diese Differenzierung zum HiL-Test jedoch nicht vorgenommen, da sich lediglich der Testfokus, nicht jedoch das zu testenden Systems oder das Testsetup ändert. Im Gegensatz zum SiL-Test, der denselben Testfokus hat, ist jedoch zwingend das Steuergerät erforderlich.

Der **Human-in-the-Loop (HitL)** beziehungsweise **Driver-in-the-Loop (DiL) Test** beschreibt den Test maschinenausführbarer Modelle in Interaktion mit virtuellen Fahrzeug- und Umgebungsmodellen sowie einem Fahrsimulator, über dessen Schnittstellen ein menschlicher Fahrer das Fahrzeug steuert und mit dem zu testenden System interagiert (Neumann-Cosel 2014, S. 50; Alm et al. 2009, S. 2; Chen und Peng 2001, S. 360). Wie erkennbar ist, weist der HitL-Test ein abweichendes Verständnis des XiL-Begriffes auf: So impliziert der Begriff „Human“ die Untersuchung des Fahrers in Interaktion mit der Umgebung. Es steht jedoch die Untersuchung des maschinenausführbaren Modells in Interaktion mit der Umgebung im Vordergrund, den vorherigen Ausführungen folgend entspräche der HitL also eher dem MiL oder SiL Test.

Der **Vehicle-in-the-Loop (ViL) Test** verbindet das zu testende System mit einer virtuellen Fahrumgebung und integriert beides in ein reales Fahrzeug, das durch einen menschlichen Fahrer gesteuert wird (Neumann-Cosel 2014, S. 53–54; Bock et al. 2007, S. 4). Zur Visualisierung der Fahrumgebung für den Fahrer wird ein Augmented Reality Head Mounted Display eingesetzt. Mit diesem Setup wird das zu testende System in Interaktion mit dem Regelkreis von realem Fahrzeug, realem Fahrer und virtueller Fahrumgebung getestet. Über das HMD wird dem Fahrer die virtuelle Umgebung in überlagert in sein Blockfeld projiziert. Testfokus kann beispielsweise der Test mechatronischer, umfeldbasierter Systeme inklusive ihrer Sensorik und Aktorik unter realitätsnahen Fahrbedingungen sein (Neumann-Cosel 2014, S. 52). Auch beim ViL-Test ist ein abweichendes Verständnis des XiL-Begriffes zu erkennen: Es wird ein mechatronisches System unter realitätsnahen Fahrbedingungen getestet. Das Fahrzeug stellt damit eigentlich einen Teil der Testumgebung, nicht jedoch den Testgegenstand „X“ des XiL-Tests dar. Den vorherigen Ausführungen folgend wäre der ViL Test daher eher als HiL Test zu klassifizieren.

Zur Simulation von Umgebungsmodellen des XiL-Tests werden in der Entwicklung von FAS **(Fahr-) Simulationssysteme** eingesetzt (Wisselmann et al. 2014, S. 7). Simulationssysteme stellen eine virtuellen Repräsentation der Umgebung, in der sich das Fahrzeug bewegt, bereit (Negele 2007, S. 22). Diese Umgebung beinhaltet zum einen die Datenbasis zur Beschreibung der Fahrumgebung und des Fahrzeugs durch Modelle, Texturen und logische Informationen. Zum anderen sind der umgebende Fremdverkehr sowie weitere Verkehrsteilnehmer beinhaltet. **Abbildung 38** zeigt diese Inhalte in einer exemplarischen Simulations-Szene in zwei Ansichten.

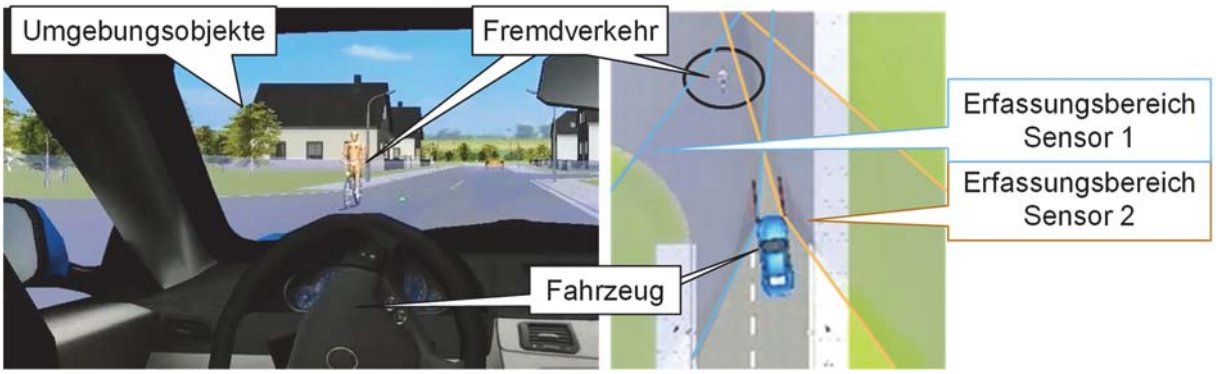


Abbildung 38: Exemplarische Fahrsimulations-Szene und Sensorsimulation mit geometrischen Modellen

Sensoren und Aktoren von FAS lassen sich durch unterschiedlich komplexe Modellierungsformen modellieren. Die am wenigsten komplexe Modellierungsform bildet die **Funktion des Sensors** oder **Aktors** nach: Beispielsweise indem die Position, Orientierung und Geschwindigkeit eines Umgebungsobjektes direkt aus der Fahrsimulation übernommen wird (Koustanai et al. 2010, S. 173). Oder es wird auf bestehende Funktionen wie die Bremse, die Geschwindigkeitsregelung oder die Lenkung eines virtuellen Fahrzeugs zurückgegriffen und so die Wirkung eines Aktor-Eingriffes simuliert.

Die nächstfolgende Komplexitätsstufe nutzt **geometrische Vergleichsmodelle.** Das in **Abbildung 38 (Rechts)** gezeigte Beispiel bildet zwei Radarsensoren jeweils durch einen dreidimensionalen Erfassungskegel ab. Der komplexe Sensor-Mechanismus, bestehend aus der Aussendung von Radarstrahlen, deren Reflektion durch ein Umgebungsobjekt und dem Empfang dieser reflektierten Strahlen durch einen Empfänger (vergleiche Winner et al. 2012, S. 123ff) wird über geometrische Aspekte wie der Position und Ausrichtung des Senders sowie einem durchschnittlichen Erfassungsbereich, in dem eine Reflektion hinreichend starke Signale gibt, vereinfacht modelliert**.**

Physikalisch basierte Sensorsimulationen basieren auf Geometrie, ergänzt durch physikalische Wirkmechanismen wie beispielsweise dem Reflexionsverhalten verschiedener Oberflächen (vergleiche dSPACE 2018b; IPG Automotive GmbH 2018a; VIRES 2018). **Abbildung 39 (Links)** zeigt eine physikalisch basierte Sensorsimulation, in der die Reflektion eines Radarsignals an verschiedenen Punkten des mittig stehenden LKW- Modells simuliert wird (dSPACE 2018b).

In der höchsten Komplexitätsstufe werden die physikalischen Mechanismen der jeweiligen Messung oder des Eingriffes durch **physikalische Computer Aided Engineering (CAE) Modelle** abgebildet (Kaltenbacher 2015, S. 1). Dazu werden die mechanischen, elektrostatischen, elektromagnetischen oder akustischen Felder mit Finite Elemente (FE-Methoden) oder Computational Fluid Dynamics (CFD) Methoden modelliert und simuliert (Kaltenbacher 2015, S. 2). Sowohl die FE als auch die CFD-Methode unterteilen das Berechnungsgebiet in endlich große Elemente (Feldhusen und Grote

2013, S. 438). Diese Elemente und ihre Kopplung können durch mathematische Funktionen beschrieben und in Differentialgleichungssystemen gelöst werden. Die FE-Methode wird üblicherweise für Systeme ohne Stoffaustausch mit der Umgebung eingesetzt. Die CFD-Methode dagegen zur Simulation der Interaktion einer Strömung mit geometrischen Elementen (Feldhusen und Grote 2013, S. 441). **Abbildung 39 (Rechts)** zeigt exemplarisch eine CFD-Simulation eines akustischen Feldes (Kaltenbacher 2015, S. 517). Eine solche Simulation kann beispielsweise eine auf ein Objekt auftreffende Ultraschall-Welle eines Radar-Sensorsignals beschreiben. CAE-Simulationen ermöglichen die detaillierte Analyse der Wirkmechanismen sowie des Zeitverhaltens des Sensors und Aktors in Interaktion mit dem Messgegenstand und der Umgebung. Sie zeichnen sich durch eine hohe Komplexität und einen hohen Rechenbedarf aus (Kaltenbacher 2015, S. 3).

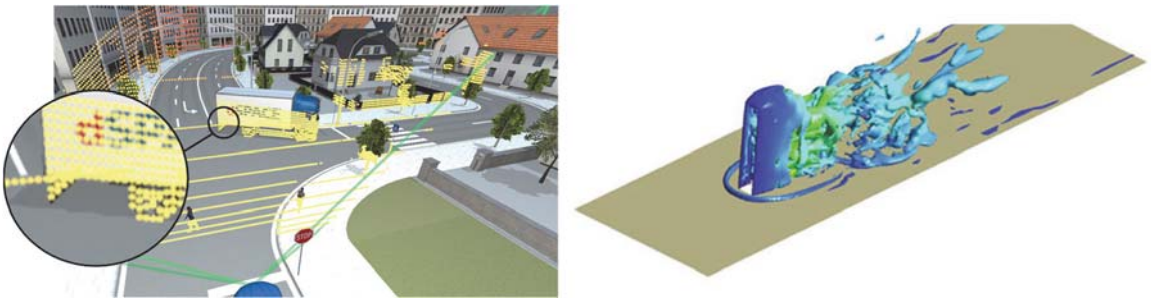


Abbildung 39: (Links) Reflexionspunkte in einem Radarsensor-Modell (dSPACE 2018b), (Rechts) CFD-Modell eines akustischen Feldes (Kaltenbacher 2015, S. 517)

In XiL-Testverfahren wie dem MiL oder dem SiL Test kommt in der Regel kein realer Fahrer, sondern virtuelle Fahrermodelle zum Einsatz. Diese sogenannten **Fahrerverhaltensmodelle** zielen auf die Nachbildung der Mensch-Maschine Interaktion im Fahrzeug und bilden den menschlichen Fahrer in Interaktion mit dem Fahrzeug ab (Bubb 2015, S. 222ff). Es können drei grundlegende Modelltypen unterschieden werden, die sich hinsichtlich der Fähigkeit, den realen Fahrer nachzubilden, unterscheiden (Bubb 2015, S. 222ff; Hartfiel et al. 2018, S. 668):

1. **Gesteuertes Fahrerverhaltensmodell**: Der Fahrer fährt die vorgegebene Strecke ab und interagiert nicht mit der Umgebung.
2. **Regelungstechnisches Fahrerverhaltensmodell**: Der Fahrer fährt die vorgegebene Strecke ab und reagiert auf Umgebungsreize.
3. **Kognitives Fahrerverhaltensmodell**: Der Fahrer wird durch ein kognitives Modell abgebildet, das seine Informationsaufnahme, -verarbeitung und -ausführung simuliert. Das Fahrermodell navigiert das Fahrzeug je nach Aufgabenstellung selbstständig.

Das kognitive Fahrerverhaltensmodell stellt den Fahrer mit der höchsten Abbildungsqualität dar. Derartige Modelle gelten als psychologisch valide, weisen allerdings einen sehr hohen Komplexitätsgrad auf und erfordern entsprechend hohe Rechenaufwände (Bubb 2015, S. 231).

Wird der menschliche Fahrer im Test benötigt, kommen **Fahrsimulatoren** als Testumgebung zum Einsatz. Diese Prüfstände unterschiedlicher Komplexität koppeln die Fahrsimulation mit funktionalen Mensch-Maschine Schnittstellen des Fahrzeugcockpits sowie Elementen der Sicht-, Geräusch- und Bewegungssimulation (Bubb 2015, S. 589–606).

Fahrsimulatoren können als Systeme betrachtet werden, die aus sieben interaktiven Elemente zusammengesetzt sind (Fischer et al. 2015, S. 141ff):

1. **Visualisierung** zur visuellen Anzeige des Fahrzeugs, der Fahrumgebung sowie Fremdfahrzeugen und Infrastruktur.
2. **Bewegungssystem** zur Anzeige der wahrgenommenen translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen.
3. **Soundsystem** zur Anzeige der Fahr-, Stand und Nebengeräusche des Fahrzeugs
4. **Cockpit** zur Darstellung des Fahrzeugcockpits, dessen Ergonomie sowie der primären Bedienelemente.
5. **Haptisches System** zur Bereitstellung aktiven haptischen Feedbacks an den Fahrer.
6. **Fahrzeugdynamik** zur Simulation der fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs, bereitgestellt durch das Fahrsimulations-Tool.
7. **Simulationssystem**, zur Simulation der Fahrzeug-Geometrie, der Fahrumgebung sowie von Fremdfahrzeugen und Infrastruktur, bereitgestellt durch das Fahrsimulations-Tool.

Abbildung 40 verortet diese sieben Elemente exemplarisch anhand von zwei Fahrsimulatoren. **Abbildung 40 (Links)** zeigt einen Basis-Fahrsimulator (nach Reich 2017, S. 110ff). Dieser basiert auf Endnutzer-Equipment wie handelsüblichen PC Bildschirmen und PC Lautsprechern für die Visualisierung und das Soundsystem, mit denen das Fahrzeug, die Fahrumgebung und Fremdfahrzeuge dargestellt werden. Sowie dem Cockpit und haptischen System bestehend aus einem Tablet und einer Lenkrad-Pedalerie-Kombination aus dem Computerspiele-Bereich. Der Fahrer sitzt davor auf einem Bürostuhl, eine Bewegungssimulation wird nicht eingesetzt. **Abbildung 40 (Rechts)** zeigt den in der Evaluation der Arbeit eingesetzten Functional Drive Simulator (FDS) des Fachgebietes Industrielle Informationstechnik der TU Berlin. Der FDS setzt eine Shutterbrillen-basierte Virtual Reality Visualisierung für die 360° Sichtsimulation, umlaufende Lautsprecher für die Soundsimulation und ein Bewegungssystem mit fünf Freiheitsgraden zur Wiedergabe der fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges ein. Für detaillierte Beschreibungen des FDS wird auf Kapitel 7.1.4 verwiesen.

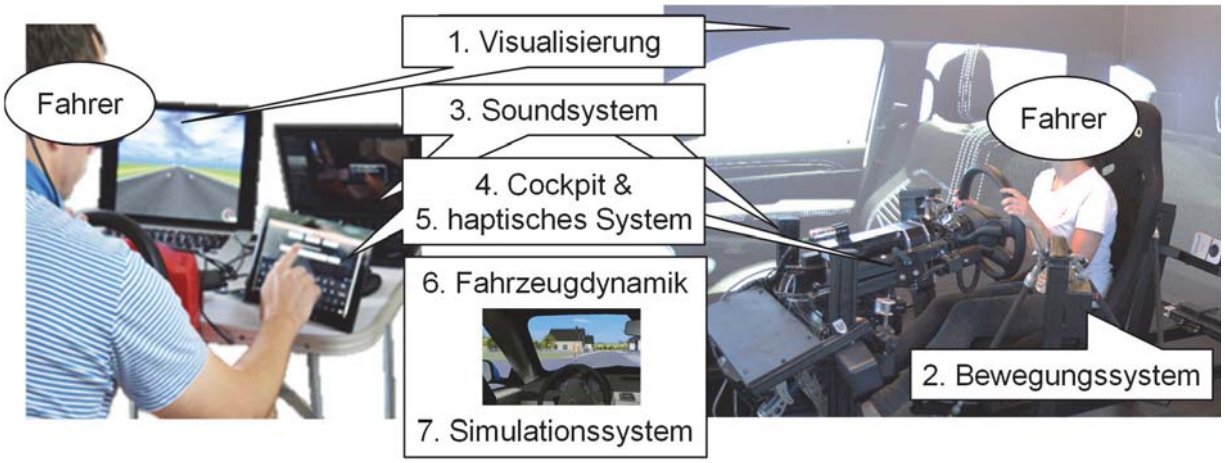


Abbildung 40: (Links) Basis-Fahrsimulator auf Basis von Consumer-Geräten (Reich 2017, S. 110), (Rechts) Komplexer Functional Drive Fahrsimulator

Neben den technischen Bauelementen der Visualisierung, dem Bewegungssystem und dem Cockpit wird die Gestalt von Fahrsimulatoren maßgeblich von **konzeptionellen Parametern** bestimmt. So kann der Simulator sowohl fest installiert

als auch transportabel ausgelegt sein (Fischer et al. 2015, S. 150). Die feste Installation insbesondere komplexer Bewegungssysteme stellt oft spezielle Anforderungen an die Räumlichkeiten: So wirken beispielsweise hohe Kräfte auf Schienensysteme, die daher mit speziellen Installationen im Boden verankert werden müssen. Ein weiterer konzeptioneller Auslegungspunkt ist die Größe des Cockpits: So sind Konfigurationen mit nur dem Fahrersitz, mit beiden Vordersitzen bis hin zum Komplettfahrzeug möglich. Zur Klassifizierung der Elemente des Fahrsimulators dienen technische Parameter: So kann ein Visualisierungssystem durch Parameter wie Sichtfeld, Sichtweite, Helligkeit, Auflösung oder Echtzeitfähigkeit beschrieben werden (Fischer et al. 2015, S. 141). Der durch Fischer et al. konzipierte, 44 stufige Bewertungsschlüssel ermöglicht eine Vergleichbarkeit von unterschiedlich gestalteten Fahrsimulatoren anhand der vier Fidelity-Stufen „Kein (K)“, „Generisch (G)“, „Repräsentativ (R)“ und „Spezifisch (S)“ (Fischer et al. 2015, S. 140). **Abbildung 41** zeigt exemplarisch die Anwendung des Bewertungsschlüssels für den Anwendungsfall „Test eines adaptiven Geschwindigkeitsreglers“.

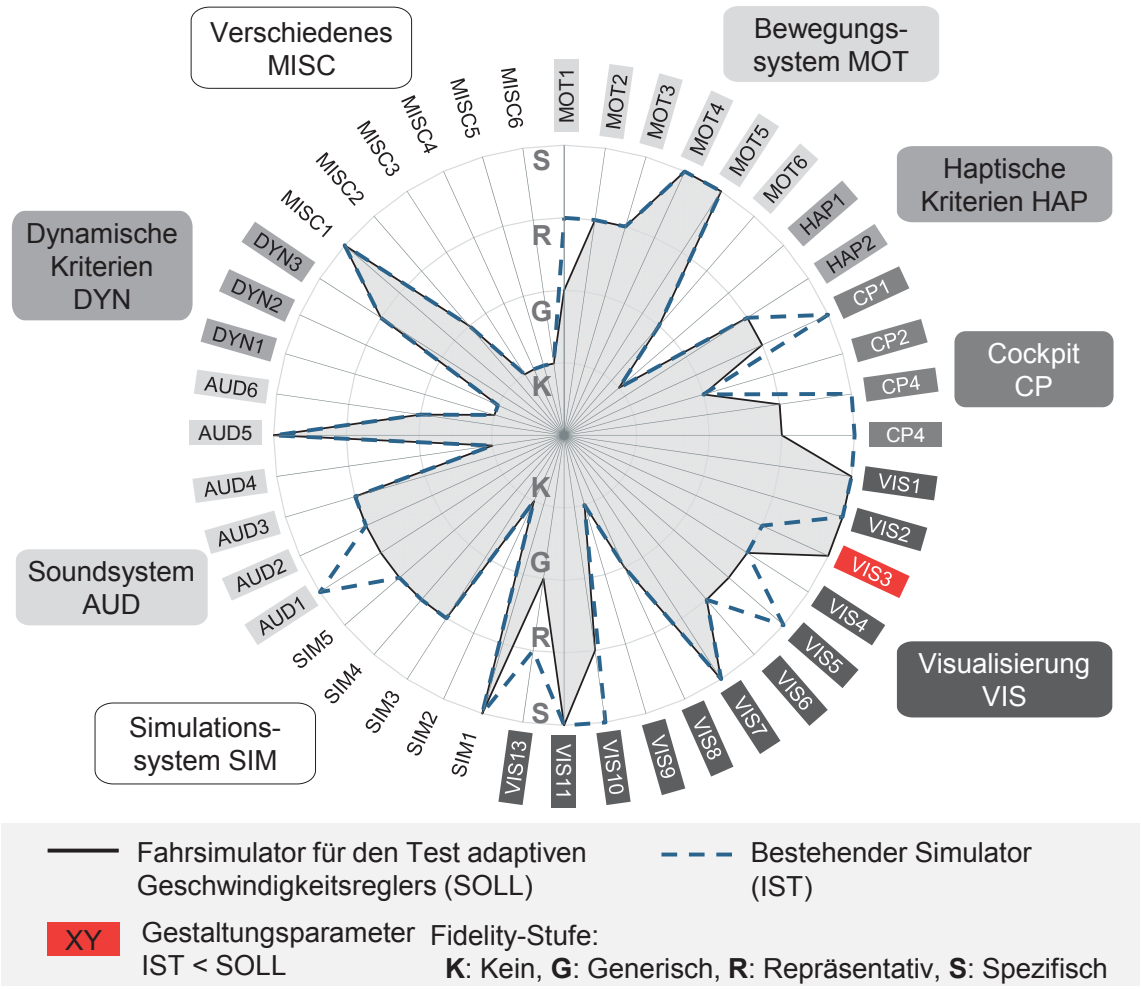


Abbildung 41: Vergleich der Soll- und Ist-Konfiguration eines Fahrsimulators zum Test eines Geschwindigkeitsreglers (Fischer et al. 2015, S. 144)

Der dargestellte Anwendungsfall zeigt die Soll-Konfiguration eines Fahrsimulators für den Test eines adaptiven Geschwindigkeitsreglers (graue Markierung) (Fischer et al. 2015, S. 144). Dem gegenüber gestellt ist ein bestehender IST-Fahrsimulator durch die gestrichelte Linie dargestellt. 43 der 44 Gestaltungsparameter des IST-Fahrsimulators entsprechen dem der SOLL-Konfiguration oder sind sogar besser ausgeprägt.

Nur für die mittels durchgängiger Linie markierten Gestaltungsparameter (VIS 3), der Sichtweite, ist der IST- Fahrsimulator mit der Stufe „Repräsentativ (R)“ schlechter ausgeprägt als der Sollwert „Spezifisch (S)“. Der Anwendungsfall erfordert eine Sichtweite „identisch zum Original“, das Visualisierungssystem des IST-Fahrsimulators kann diese aber nur realitätsnah darstellen.

Die Nutzung von Fahrsimulatoren erfordert darüber hinaus weitere **Testumgebungs-Elemente**, die für den eigentlichen Test erforderlich sind (Hartfiel et al. 2018, S. 664). Beispielsweise können das Kameras oder Fragebögen zur Aufnahme von Tests sein. Weiterhin werden Anforderungen an die Szenarios, in denen getestet wird oder die Anforderungen an den **Testgegenstand** selbst gestellt, beispielsweise dessen Reifegrad oder Kompatibilität zu bestehender IT Umgebung (Hartfiel et al. 2018, S. 669). Fahrsimulatoren ermöglichen eine subjektive Bewertung von Prototypen durch einen menschlichen Fahrer. Entsprechend kommen in verschiedenen XiL-Testverfahren, in denen die Bewertung quantifizierbarere Aspekte wie der Plausibilität oder der Reichweite von In- und Outputs oder der Test von Software-Funktionen im Vordergrund steht, zum Einsatz (ISO 26262-6, S. 13; Zander-Nowicka 2008, S. 25–26).

Tabelle 8 fasst die verschiedenen XiL-Testverfahren der FAS Entwicklung, deren Testgegenstand, die erforderliche Testumgebung sowie den zum Einsatz kommenden Fahrer und Fahrermodelle zusammen. Es wird jeweils unterschieden, ob der Testgegenstand und die Testumgebung virtuell oder physisch sind. Sowie ob ein Fahrermodell oder ein menschlicher Fahrer zum Einsatz kommt.

Tabelle 8: XiL Testverfahren der FAS Entwicklung

Test-ver-fahren	**Testgegenstand** (**V**irtuell, **P**hysisch)	**Testfokus**	**Testumgebung** (**V**irtuell, **P**hysisch)		
			Fahrzeug	**Fahr-umgebung**	**Fahrer**
MiL	**V** Funktionaler Prototyp im CASE-Tool	Funktionstest	**V** Virtuelles Fahrzeug	**V** Virtuelle Umgebung & Verkehr	**V** Fahrer-modell
SiL	**V** Softwarecode in Programm-iersprache	Funktionstest, Auffindung von Fehlern im Softwarecode	**V** Virtuelles Fahrzeug	**V** Virtuelle Umgebung & Verkehr	**V** Fahrer-modell
HiL	**V+P** Software-code im-plementiert in Hardware der Steuergeräte	Auffindung von Fehlern des Steuer-gerätes, Schnittstellen, integriertem System	**V+P** Virtuelles oder physisches Fahrzeug, virtuelle oder physische Sensoren/Aktoren, ggf. Fahr-simulator	**V** Virtuelle Umgebung & Verkehr	**V** Fahrer-modell, ggf. auch mensch-licher Fahrer im Fahr-simulator
FiL		Auffindung von Fehlern im Softwarecode			

Test-ver-fahren	**Testgegenstand** (**V**irtuell, **P**hysisch)	**Testfokus**	**Testumgebung** (**V**irtuell, **P**hysisch)		
			Fahrzeug	**Fahr-umgebung**	**Fahrer**
HtiL / DiL	**V** Funktionaler Prototyp oder Softwarecode	Funktionstest	**V+P** Virtuelles Fahrzeug, Fahr-simulator	**V** Virtuelle Umgebung & Verkehr	**P** mensch-licher Fahrer
ViL	**V+P** Softwarecode implementiert in Hardware der Steuergeräte	Auffindung von Fehlern des integrierten Systems	**P** physisches Fahrzeug	**V+P** Physische Umgebung, virtueller Verkehr	**P** mensch-licher Fahrer

Im Software-Test existieren verschiedene Standards, sowohl für die methodische Durchführung des Tests als auch für die unterstützenden Werkzeuge. Ein wichtiger Standard ist die im Jahr 2014 erschienene Norm ISO/IEC/IEEE 29119 zur Standardisierung des Softwaretests (ISO/IEC/IEEE 29119). Diese Norm beinhaltet standardisierte Prozesse und Methoden für den Test, dessen Dokumentation sowie für agile Entwicklungsprozesse. Eine standardisierte, zertifizierte Ausbildung für den Softwaretest bietet das International Software Testing Qualifications Board (ITSQB) (ISTQB AISBL, German Testing Board e.V. 2018).

3.3.4 Grundlagen des Tests des User Experience Designs

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, versteht sich das UX Design als ganzheitlicher Gestaltungsansatz, der sowohl die **Gebrauchstauglichkeit** und **Nützlichkeit** eines Systems, aber auch die subjektiven Wahrnehmungen, Gefühle und Bedürfnisse des Nutzers bei dessen Nutzung berücksichtigt. Der Begriff der Gebrauchstauglichkeit eines Systems beschreibt das Ausmaß, in dem dieses durch einen bestimmten Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und mit Zufriedenheit zu erreichen (Schneider 2008, S. 53). Die Nützlichkeit des Systems für einen Nutzer wird vom Grad bestimmt, in dem dieses System den Nutzer bei der Ausführung seiner Aufgabe unterstützt (Davis 1989, S. 320).

Im Test des User Experience Design werden verschiedene Prototypen eingesetzt, die mit den Werkzeugen der Domänen-Entwicklung der Mechanik, der Elektrik/Elektronik sowie der Software erstellt werden.

Der Test von Prototypen mit realen Nutzern wird durch die **empirische Evaluation** beschrieben (Preim und Dachselt 2015, S. 160). Ziel empirischer Tests ist der Nachweis der Auswirkung bestimmter unabhängiger Variablen, beispielsweise Designentscheidungen, auf abhängige Variablen, beispielsweise messbare Usability-Faktoren (Preim und Dachselt 2015, S. 163). Der empirische Test unterscheidet zwischen **Between Subject** und **Within Subject** Evaluationen (Preim und Dachselt 2015, S. 165). Entweder findet ein Vergleich zwischen (englisch: between) verschiedenen Probandengruppen statt, die jeweils eine unabhängige Variable testen. Oder jeder Proband testet alle (englisch: within) unabhängigen Variablen und die Ergebnisse werden anschließend verglichen. Beide Formen haben charakteristische Vor- und Nachteile:

Im Between Subject Test ist oft nicht klar, ob die aufgenommenen Effekte auf die Probanden zurückzuführen sind (Preim und Dachselt 2015, S. 165; Charness et al. 2012, S. 2). Der Within Subject Test ist dagegen anfällig für Störeffekte resultierend aus der Reihenfolge der Tests. Zur Reduktion dieser Probleme sind große Versuchsgruppen, randomisierte Testverteilungen sowie eine vorherige Analyse der Probanden-Gruppen auf relevante Merkmale zielführend (Preim und Dachselt 2015, S. 165).

Der Beurteilung der Qualität einer Nutzerstudie der empirischen Evaluation und damit der Zuverlässigkeit und Nachvollziehbarkeit ihrer Ergebnisse dienen **vier Qualitätskriterien** (nach Preim und Dachselt 2015, S. 169–170):

1. Das Kriterium der **Glaubwürdigkeit** ist gegeben, wenn die Probanden hinsichtlich wichtiger Kriterien wie Alter, Geschlecht oder Vorkenntnissen mit der Zielgruppe übereinstimmen und zudem unabhängig sind. Auch müssen Aufgaben im Test realistisch und anwendbar sein.
2. Die **Interne Validität** bemisst sich am Umgang der Testplanung und Durchführung mit Störgrößen wie Umgebungseinflüssen, der Qualität des Testequipments oder der Motivation der Versuchsteilnehmer. Mögliche Maßnahmen sind eine Minimierung der Störgrößen sowie die Schaffung gleicher Ausgangsbedingungen durch konstante Störgrößen. In der Einteilung von Probandengruppen sollte auf eine Einteilung auf gleich große Gruppen geachtet werden. Darüber hinaus sollten Maßnahmen ergriffen werden, um Lerneffekte von einem zum nächsten Test hin zu vermeiden, beispielsweise durch eine Variation der Testreihenfolge innerhalb der Probandengruppe.
3. Die **Übertragbarkeit** (auch: externe Validität) eines Tests bemisst sich an der Ähnlichkeit, mit der die Testergebnisse auch in anderen Testumgebungen zu erwarten sind.
4. Zuletzt ist ein Test **zuverlässig**, wenn die Anzahl und Auswahl der Probanden erwarten lässt, dass die Ergebnisse sich auch bei größerer Anzahl an Probanden oder einer geänderten Testdauer nicht wesentlich verändern.

Das Qualitätskriterium der Zuverlässigkeit eines Tests ist eng mit dessen **statistischer Signifikanz** verknüpft. Der t-test ist ein Werkzeug zur Bewertung der statistischer Signifikanz, indem die Unterschiede zweier Gruppen in einem untersuchten Merkmal ermittelt werden (Rasch 2014, S. 33). Dem Nullhypothesensignifikanztest, in dem der t-test zumeist Anwendung findet, liegt die Annahme von identischen Mittelwerte der beiden zu vergleichenden Gruppen zugrunde (Rasch 2014, S. 38). Die (vereinfachte) Formel zur Berechnung des t-Wertes lautet:

$$t_{df} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma_{\overline{X_1} - \bar{X}_2}}$$

$\bar{X}_{1/2}$ – Mittelwert Gruppe 1/2, σ_X – Standardabweichung (nach Rasch 2014, S. 33)

Ein t-Wert wird als statistisch signifikant bezeichnet, wenn seine Wahrscheinlichkeit kleiner als ein vorher festgelegter Grenzwert ist (Rasch 2014, S. 42). Eine statistische Signifikanz lässt darauf schließen, dass die Anzahl an Probanden ausreichend groß ist, auf die zu untersuchende Grundgesamtheit zu schließen. Die Wahl dieses Grenzwertes, der als **Signifikanzniveau α** bezeichnet wird, ist von der jeweiligen Fragestellung abhängig, liegt aber per Konvention zumeist bei α = 0,05 (Rasch 2014, S. 42). Ist t kleiner oder gleich α, kann von einer statischen Signifikanz ausgegangen werden.

In der empirischen Evaluation werden verschiedene **Verfahren zur Gewinnung von Erkenntnissen** eingesetzt:

- **Messungen** können während des Tests vorgenommen werden. Diese Messdaten können mit Tools zu Datenaufzeichnung zur späteren Auswertung aufgezeichnet werden (Preim und Dachselt 2015, S. 161).
- Probanden und deren Interaktionen mit dem System können während des Tests **beobachtet** werden (Preim und Dachselt 2015, S. 38; Adler 2010, S. 59)
- Subjektive Eindrücke der Probanden können durch **mündliche Befragungen** während oder nach einem Test **sowie schriftliche Befragungen** nach einem Test erhoben werden (Preim und Dachselt 2015, S. 41).

Verschiedene Fragebögen haben sich zur schriftlichen Befragung etabliert: Mit Hilfe des Fragebogens **„wahrgenommene Nützlichkeit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“** können Probanden zu Ihrer Einschätzung der Nützlichkeit und Nutzbarkeit eines Werkzeugs befragt werden. Diese Einschätzungen korrelieren mit der Einstellung eines Nutzers gegenüber dem Werkzeug und der damit unterstützen Methoden und Prozesse sowie der Verhaltensintention des Nutzers zur Werkzeugnutzung (Davis 1989, S. 319). Der **Fragebogen NASA TLX** (Task Load Index) dient der Einschätzung der geistigen, körperlichen und zeitlichen Anforderungen an die Probanden sowie der Ausführungsqualität, dem Aufwand und der Frustration bei der Erfüllung der jeweiligen Testaufgabe (nach Hart und Staveland 1988). Mit dem **meCUE-Fragebogen** kann das Produkterlebnis ganzheitlich erhoben werden (Minge et al. 2013, S. 31). Neben aufgabenbezogenen Aspekten der Nutzbarkeit und Nützlichkeit werden die wahrgenommene visuelle Ästhetik, der Status und die Bindung eines Nutzers an das Produkt, die Emotionen gegenüber diesem sowie die Konsequenzen aus dessen Nutzung erhoben. Weitere etablierte Fragebögen sind beispielsweise der AttrakDiff zur Erfassung der hedonischen und pragmatischen Qualität eines Produktes oder der Fragebogen ISOMetric zur Erfassung der Gebrauchstauglichkeit (Hassenzahl et al. 2003; Preim und Dachselt 2015, S. 193; Adler 2010, S. 54).

Tests funktionaler mechatronischer Systemfunktionen können mit der **Wizard-of-Oz Methode** durchgeführt werden. Mit dieser Methode können fehlende Teile einer Systemimplementierung so durch Bedieneingaben eines menschlichen „Wizard“ ersetzt werden, dass die Probanden den Eindruck bekommen, das System ist vollständig funktionsfähig (Preim und Dachselt 2015, S. 127). Der Wizard, zumeist ein für die Proband nicht sichtbarer Prüfer, übernimmt Steuerungsaufgaben als eine Art „Bioprozessor“ und steuert die Reaktionen des MMS und übernimmt in einigen Fällen sogar die Geschwindigkeitssteuerung und Lenkung des Fahrzeugs (Kiss et al. 2008).

Typische Testverfahren zum Test des UX Design sind die **Inspektion**, das **Walkthrough**, das **Review** oder die **Validierung im Dialog** (Balci 1998, S. 363–366; Adler 2010, S. 55; Projekt B-U-I 2010; Rabe et al. 2008, S. 97–109). Diese Testverfahren, detailliert in **Anhang A** beschrieben, werden auch als informelle Testverfahren bezeichnet, da die Bewertung auf der menschlicher Einschätzung und Subjektivität und nicht auf mathematischen Formalismen beruht (Balci 1998, S. 361; Preim und Dachselt 2015, S. 153ff). In der Regel werden diese Testverfahren an sehr frühen Entwürfen und statischen Prototyen durchgeführt.

Zum Test funktionaler Anzeigen- und Bedienprototypen kommt das Testverfahren **Mensch-Maschine Konzeptsimulation (MMS-KS)** zum Einsatz (Balci 1998, S. 380;

Response Consortium 2009, A59). Die Prototypen werden zur besseren Beurteilbarkeit dazu oft lage-, positions- und formgetreu in Sitzkisten oder modulare Versuchsfahrzeuge eingebettet.

Abbildung 42 (Links) zeigt exemplarisch das Testsetup eines informellen Tests, bei dem ein Papier-Prototyp einer visuellen Anzeige im Rahmen einer Inspektion evaluiert wird. **Abbildung 42 (Rechts)** zeigt exemplarisch ein Wizard-of-Oz Testfahrzeug. In diesem kann ein Testfahrer, der für den Fahrer verdeckt auf dem Beifahrersitz sitzt, mit den zusätzlich installierten Lenkrad und Pedalerie die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen (Meier-Arendt 2019, S. 42–43).

Abbildung 42: (Links) Inspektion eines Paper Prototypen (Buxton 2011, S. 372), (Rechts) Wizard-of-Oz Testfahrzeug für die Mensch-Maschine Konzeptsimulation (Meier-Arendt 2019, S. 43)

Im Aufbau und dem empirischen Test von bildhaft situationsanalogen sowie kontaktanalogen Anzeigen werden funktionale (Bildanzeigen-) Prototypen eingesetzt (Preim und Dachselt 2015, S. 123). Diese basieren auf Software-Tools, mit denen die Datenverarbeitung von Bild, Audio- und Videoelementen programmiert, Geometrie computerbasiert generiert sowie haptische Bedienung von Touch-Flächen ausgewertet werden kann (Johansson und Olausson 2018). Diese Software-Tools werden im Rahmen der Arbeit unter dem Begriff der **Anzeigen Prototyping (AP) Tools** zusammengefasst. Neben der Wiedergabe über 2D Bildschirme können in AP Tools erstellte, digitalen Anzeigeinhalte auch direkt mit 3D CAD oder DMU Modellen gekoppelt werden. Dies ermöglicht die Wiedergabe mit Virtual Reality Technologie, ohne dass physische Anzeige-Hardware erforderlich ist. **Abbildung 43** zeigt diese zwei Wiedergabe-Möglichkeiten exemplarisch an der mittels AP Tool nachmodellierten digitalen Anzeigeinhalte des Kombiinstrumentes „Virtual Cockpit“ der Firma Audi. Links ist der Prototyp auf einem konventionellen PC Bildschirm wiedergegeben, rechts in einem 3D Modell eingebettet in einer Virtual Reality Umgebung.

Abbildung 43: (Mitte) Kombiinstrument „Virtual Cockpit“ (Audi Online Konfigurator 2017), Im AP Tool modellierte digitale Anzeigeinhalte, wiedergegeben auf einem konventionellen Bildschirm (Links) und einer Virtual Reality Umgebung (Rechts)

3.3.5 Grundlagen des domänenübergreifenden Tests

Der Domänenübergreifenden Tests befasst sich mit dem Test von Prototypen, die jeweils aus Elementen von mindestens zwei der zuvor beschriebene Domänen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software sowie User Experience Design bestehen.

Wie in Kapitel 3.2.2 für das MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin beschrieben, bildet die Erstellung sogenannte Funktions- und Systemarchitekturen den ersten Schritt der durchgängigen Systemauslegung. Die **Funktionsarchitektur** beschreibt das Zusammenspiel der konkreten technischen Elemente zur Erfüllung der Funktionen des Systems (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 22). Die **Systemarchitektur** beschreibt sowohl welche Funktionen oder Teilfunktionen durch welche Domänen realisiert werden. Als auch die Anforderungen, die sich daraus für die jeweilige Domäne ergeben (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 22). Es kommen verschiedene Modelltypen zum Einsatz: Zur Beschreibung der Funktionsarchitektur werden beispielsweise *Sequenzdiagramme* eingesetzt, die das Systemverhalten durch zeitliche Sequenz und zeitliche Bedingungen, Synchronisierungspunkte sowie die Interaktion von Elementen beschreiben (Booch et al. 2006, S. 128; Sendler 2016, S. 68; INCOSE 2015, S. 192). Oder sogenannte *IDEF-Diagramme* (Integrated Definition for Functional Modeling) zur Beschreibung der Funktionen durch sequenziellen Ein- und Ausgangsflüsse. In der System Architektur-Modellierung werden objektorientierte Modellierungssprachen eingesetzt, beispielsweise die Unified Modeling Language (UML) oder die Systems Modeling Language (SysML) (INCOSE 2015, S. 193; Wallentowitz und Reif 2006, S. 385ff; Bremer et al. 2015, S. 156).

Sowohl die Sicht „Modellbildung und erste Simulation“ des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen MVPE-Modell nach Eigner, als auch die Prozessschritte „logische und dynamische Verhaltenssimulation“ des MBSE Modells des Fraunhofer IPK und der TU Berlin nutzen **funktionale System-Verhaltensmodelle** für erste domänenübergreifende Simulationen der logischen und technischen Systemarchitektur. Für diesen Typ von Simulationen werden die System-Modelle in Tools wie MATLAB/Simulink oder Dymola erstellt und simuliert (Hommel 2006, S. 47–49). Ziel ist die virtuelle Auslegung mechatronischer Komponenten, um so insbesondere konzeptionelle Untersuchungen an zukünftigen oder hypothetischen Funktionen durchführen zu können (Hommel 2006, S. 23). Wie erkennbar, werden zum Teil dieselben Tools wie in der Modellierung der Verhaltensmodelle der Software eingesetzt. Im Unterschied zur Software-Modellierung in CASE-Tools beinhalten funktionale System-Verhaltensmodelle auch logische Elemente zur Beschreibung und Simulation des Verhaltens der Elektrik, Elektronik und Mechanik. Es erfolgt eine ganzheitliche, domänenübergreifende System-Simulation.

Maschinenausführbare Modelle werden in den Testverfahren **Feldtest**, **Langzeittest** und **Nutzertest im Straßenverkehr** in Testfahrzeuge implementiert und getestet. Dazu beinhalten diese Testverfahren üblicherweise bereits Prototypen der MMS (ISO 26262-4, S. 23–24; Bubb 2015, S. 613ff; Response Consortium 2009, A62-A65). Die Prototypen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Reifegrades: So wird beim Feldtest seriennahe Software, implementiert auf seriennahen Steuergeräten mit prototypischen oder seriennaher MMS verknüpft, auf abgesperrtem Testgelände getestet (Balci 1998, S. 378; Response Consortium 2009, A62-A65). **Abbildung 44 (Links)** zeigt exemplarisch den Einbau eines seriennahen Steuergerätes, auf dem seriennahe Software implementiert ist, in ein Testfahrzeug. **Abbildung 44 (Mitte)** zeigt eine prototypische MMS. Funktionen derartiger MMS sind oft noch nicht vollständig umgesetzt, es treten noch Fehler in Anzeige und Bedienlogik auf (Hartfiel et al. 2018, S. 660).

Der umgebende Verkehr wird simuliert, beispielsweise mit speziellen Anhängern oder aufblasbaren Fahrzeugen, wie in **Abbildung 44 (Rechts)** dargestellt (Bubb 2015, S. 612). Dagegen werden die Testverfahren Langzeittest und Nutzertest im Straßenverkehr auf repräsentativen Strecken im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt (ISO 26262-4, S. 23–24; Bubb 2015, S. 613ff). Es werden nur seriennahe Elemente eingesetzt, gegebenenfalls werden sicherheitsrelevante Funktionen aus Sicherheitsgründen deaktiviert.

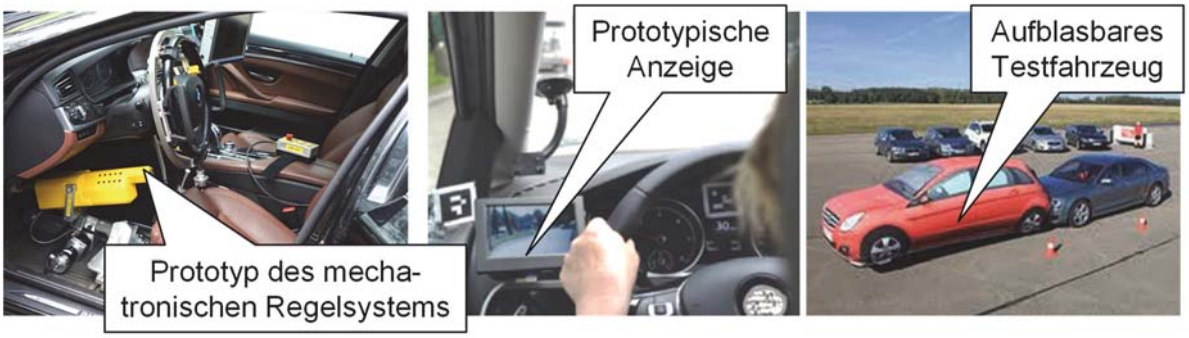


Abbildung 44: (Links) Prototyp des mechatronischen Regelsystems im Testfahrzeug (Spinnarke 2017), (Mitte) Prototypische MMS im Test (Schmidt et al. 2016, S. 34), (Rechts) Feldtest eines Notbremsassistenzsystems (Bubb 2015, S. 612)

Die Integration verschiedener Simulationen stellt eine Herausforderung dar. Das **Advanced Co-Simulation Open System ARchitecture (ACOSAR)** Projekt befasste sich mit der Entwicklung einer standardisierten Lösung für die Co-Simulation in der Entwicklung (ACOSAR Project Consortium 2019). Kernentwicklung des Projektes ist das standardisierte Verbindungsprotokoll DCP (Distributed Co-Simulation Protocol), welches die Integration verschiedener Tools und Prototypen entsprechend dem FMI Standard beschreibt. Der in Kapitel 3.3.1 beschriebene AUTOSAR-Standard zielt neben der Standardisierung von Elektrik-/ Elektronikarchitekturen auf die Einführung standardisierter Testverfahren für die Elektronik und Software der verschiedenen Fahrzeug-Steuergeräte (AUTOSAR GbR 2017). So wurden ab dem Jahr 2014 sogenannte **AUTOSAR Akzeptanztests** mit dem Ziel definiert, Testaufwände und -kosten zu minimieren (AUTOSAR GbR 2017). Im Allgemeinen dienen Akzeptanztests der Bewertung, ob das entwickelte System die in den Systemspezifikationen zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber vereinbarten Anforderungen erfüllt (Balci 1998, S. 373). Entsprechend nehmen am Test sowohl Vertreter des Auftragnehmers als auch des Auftraggebers teil. Der AUTOSAR Akzeptanztest dient dem Nachweis der spezifikationskonformen Entwicklung der Soft- und E/E-Hardware (AUTOSAR GbR 2014, S. 9). Es werden verschiedene Kriterien, beispielsweise das Laufzeitverhalten verschiedener Software-Bestandteile oder das Verhalten des Bus-Systems geprüft. AUTOSAR Akzeptanztest ersetzen explizit keine anderen Testaktivitäten, sondern werden ergänzend zu diesen durchgeführt (AUTOSAR GbR 2014, S. 12). Die eingesetzten Testverfahren entsprechen den zuvor beschrieben Testverfahren des Softwaretests: So kommen die statischen Testverfahren der Kontroll- und Fehler-Analyse und die dynamischen Testverfahren Funktionstest und Falsch-Eingabe Test zum Einsatz.

Ein in der Industrie etablierter Standard für die Co-Simulation, der auch in verschiedene Ansätzen der Co-Simulation von Verhaltensmodell und Fahrsimulator eingesetzt wird, ist der **Functional Mock-Up Interface (FMI) Standard** (vergleiche Auricht 2018, S. 67; Deicke 2018, S. 34). Der im Rahmen eines Konsortialprojektes unter Beteiligung

verschiedener Automobilhersteller entwickelte FMI-Standard für Co-Simulation beschreibt eine Schnittstelle, die durch den Aufruf eines standardisierten ausführbaren Modells, des sogenannten Functional Mock-Up Unit (FMU), funktioniert (Modelica Association Project 2014, S. 8). Dieses Modell beinhaltet beschreibende Informationen, die durch das Modell verwendeten mathematischen Formeln kompiliert als C-Code sowie optionale weitere Daten, beispielsweise Parametertabellen oder Bibliotheken. Die Standardisierung des FMU ermöglicht eine einfache Kopplung diesen Standard unterstützender Tools. Eine wichtige Anwendung des FMU stellt das sogenannte Functional Digital Mock Up (FDMU) dar: Für einen FDMU-Prototyp werden virtuelle geometrische Prototypen der Mechanik-Entwicklung, beispielsweise CAD oder DMU-Modelle, mit Verhaltensmodellen, erstellt in Tools zur Verhaltensmodellierung, beispielsweise CASE-Tools wie Dymola oder MATLAB/Simulink, gekoppelt (Fukuda et al. 2013, S. 432). Ziel ist es, durch diese Kopplung von Geometrie und Verhalten funktionale, virtuelle Modelle zu schaffen, die das Verhalten des Zielsystems nachvollziehbar visuell nachbilden können (Fukuda et al. 2013, S. 432; Enge-Rosenblatt 2010, S. 69; Stork et al. 2010).

3.4 Vorgehen im industriellen Integrations- und Testprozess von Fahrerassistenzsystemen

Im Folgenden wird zunächst das Verständnis des FAS Entwicklungsprozesses im Rahmen der Arbeit beschrieben. Es folgt eine Beschreibung des im Rahmen der Arbeit entscheidenden Testkriteriums „Beherrschbarkeit“ des FAS. Anschließend dienen Kapitel 3.4.3 bis 3.4.5 der detaillierten Beschreibung des Vorgehens zur Integration und Test im heutigen FAS Entwicklungsprozess.

Die Ausführungen in diesen Kapiteln basieren maßgeblich auf den Ergebnissen des in Kooperation zwischen der Volkswagen AG und der Technischen Universität Berlin durchgeführten Projekts „Fahrsimulatorlandkarte“, die im VDI Bericht Nr. 2333 im Beitrag **„Use Case orientierte Gestaltungsempfehlungen für Fahrsimulatoren zur menschzentrierten Absicherung von Sicherheits- und Komfortfunktionen“** dargestellt sind (Hartfiel et al. 2018). Im Projekt wurden Entwickler der Volkswagen AG zum aktuellen Vorgehen im Test von FAS in leitfadengeführten Interviews befragt. Die aus diesen Interviews extrahierten Kernaussagen sind:

FAS bestehen aus den zwei Teilsystemen des Regelkreises der Mechatronik sowie des Regelkreises der Fahrer-FAS-Interaktion. Deren Entwicklung findet getrennt voneinander statt, eine Integration findet erstmals etwa ein Jahr vor Produktionsstart (SOP) statt (Hartfiel et al. 2018, S. 659 – S. 661).

Das Teilsystem des Regelkreises der Mechatronik wird als **Mechatronisches Regelsystem** bezeichnet und beinhaltet die Hard- und Software der Sensorik, Steuerung, Aktorik sowie Car2X-Kommunikation des FAS (Hartfiel et al. 2018, S. 659).

Das Teilsystem des Regelkreises der Fahrer-FAS-Interaktion wird als **Mensch-Maschine Schnittstelle (MMS)** bezeichnet und beinhaltet die Anzeigen und Bedienelemente des FAS (Hartfiel et al. 2018, S. 660).

Neben diesen wichtigen Kernaussagen, auf denen nachfolgende Schritte aufbauen, haben weitere, im Beitrag beschriebene Erkenntnisse des Projektes eine hohe Relevanz für die weitere Arbeit: So basiert die in Kapitel 5 entwickelte Lösung unter anderem auf Aussagen der im leitfadengeführten Interviews befragten Entwickler der Volkswagen AG.

3.4.1 Der Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess

Wie das Fahrzeug ist sowohl das FAS selbst wie auch dessen Teilsysteme jeweils ein mechatronisches System. Es bedarf damit jeweils Schritte der Entwicklung, der Integration und des Tests der Elemente aus den Domänen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software sowie des User Experience Designs, in dem die User Experience des FAS konzipiert und mit den in Kapitel 3.3.4 beschrieben Testverfahren getestet werden muss.

Exemplarisch können diese Domänen an dem aus Abbildung 23 bekannten Beispiel des Einpark-FAS der Firma VW beschrieben werden. **Abbildung 45** zeigt dieses FAS.

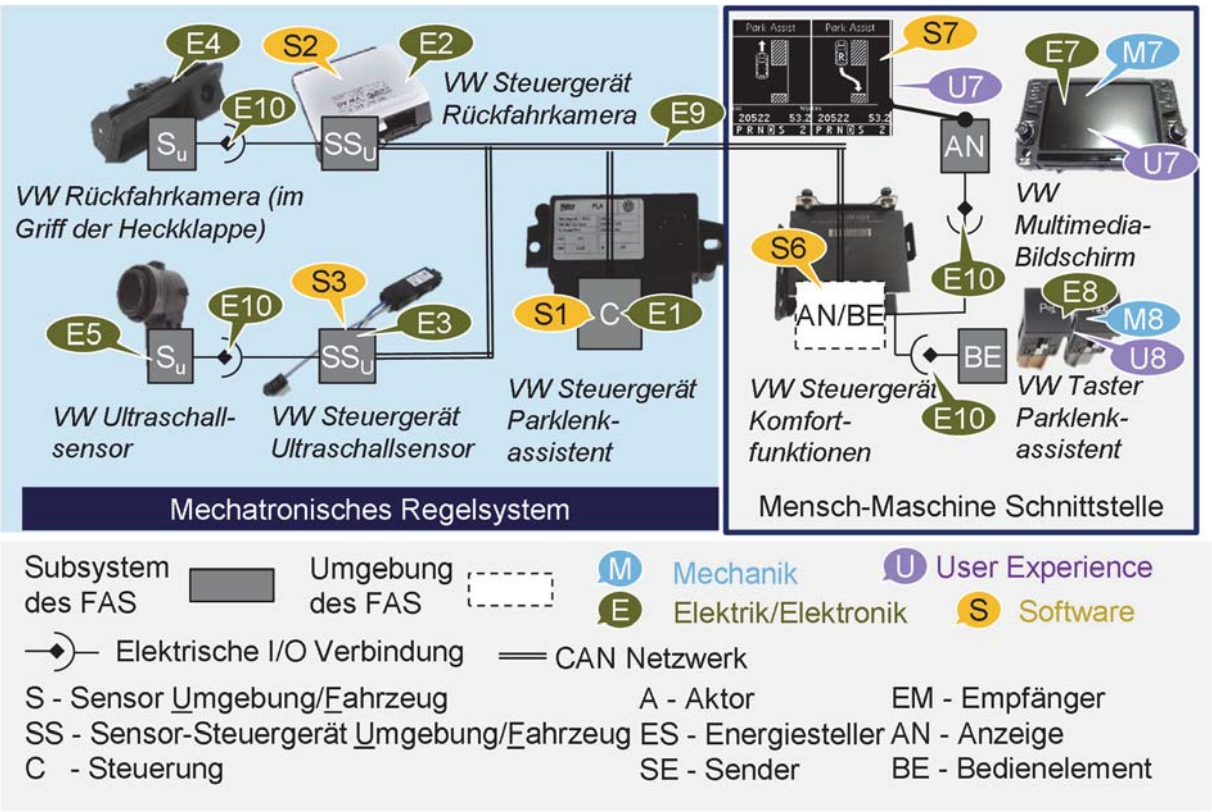


Abbildung 45: Exemplarische Darstellung der Entwicklungs- und Testaktivitäten am VW Einpark-FAS (nach Volkswagen Service 2002; Bildquellen: Ebay 2019)

In der Abbildung sind nummerierte Elemente zur Verortung der Entwicklungs- und Testaktivitäten der Mechanik (M), der Elektrik/Elektronik (E), der Software (S) sowie der User Experience (U) enthalten. Das FAS besteht aus dem links in der Abbildung dargestellten Teilsystem „Mechatronisches Regelsystem“ sowie dem rechts in der Abbildung dargestellten Teilsystem „Mensch-Maschine Schnittstelle“. In der Entwicklung des mechatronischen Regelsystems muss die Elektronik der Steuergeräte „Steuergerät Parklenkassistenzsystem“, „Steuergerät Rückfahrkamera“ sowie „Steuergerät Ultraschallsensor“ ausgelegt und deren anforderungskonforme Funktion und Fehlerfreiheit durch Elektronik-Tests (E1, E2, E3) abgesichert werden. Wie in Kapitel 3.1.4 ausgeführt ist, wird auf diesen Steuergeräten jeweils Software implementiert. Aspekte wie deren anforderungskonforme Funktion und Verhalten, korrekte In- und Outputs sowie Fehlerfreiheit müssen entsprechend durch Softwaretests (S1, S2, S3) abgesichert werden. Für die korrekte Ausführung der Messung muss die Lage, Orientierung und Position der elektrischen Komponenten Kamera- und der Ultraschall-Sensoren mit

Tests (E4, E5) abgesichert werden. Auch die Entwicklung der MMS der Software zur Ansteuerung und Auswertung der Anzeigen und Bedienelemente auf dem Steuergerät durch Softwaretests (E6). Ebenso muss die anforderungskonforme Funktion der softwarebasierten Anzeigen-Inhalte abgesichert werden (S7). Die anforderungskonforme Funktion und Fehlerfreiheit der Elektronik der Anzeigen und Bedienelemente muss durch Elektronik-Tests (E7, E8) abgesichert werden. Zur Absicherung anthropometrischer Aspekte wie Sicht- und Erreichbarkeit müssen Testverfahren der Mechanik (M7, M8) eingesetzt werden. Diese werden ergänzt durch User Experience Tests, in denen die Gebrauchstauglichkeit und Nützlichkeit der virtuellen und physischen Elemente der Anzeigen und Bedienelemente für den Fahrer ermittelt wird (U7, U8). Darüber hinaus werden hier die subjektiven Wahrnehmungen, Gefühle und Bedürfnisse des Fahrers in Verbindung mit den Anzeigen und Bedienelementen ermittelt. Zur Umsetzbarkeit derartiger Tests, muss die korrekte elektrische Funktion der elektrischen und elektronischen Elemente sowie die Einhaltung funktionaler und konstruktiver Regeln in der Gestaltung der Elemente und elektrischer Befestigungs- und Verbindungstechnik durch Elektrik-Tests (E9, E10) für das gesamte FAS abgesichert werden.

Im automobilen Produktentwicklungsprozess können die Entwicklungs- und Testaktivitäten der FAS Entwicklung wie in der nachfolgenden **Abbildung 46** dargestellt werden.

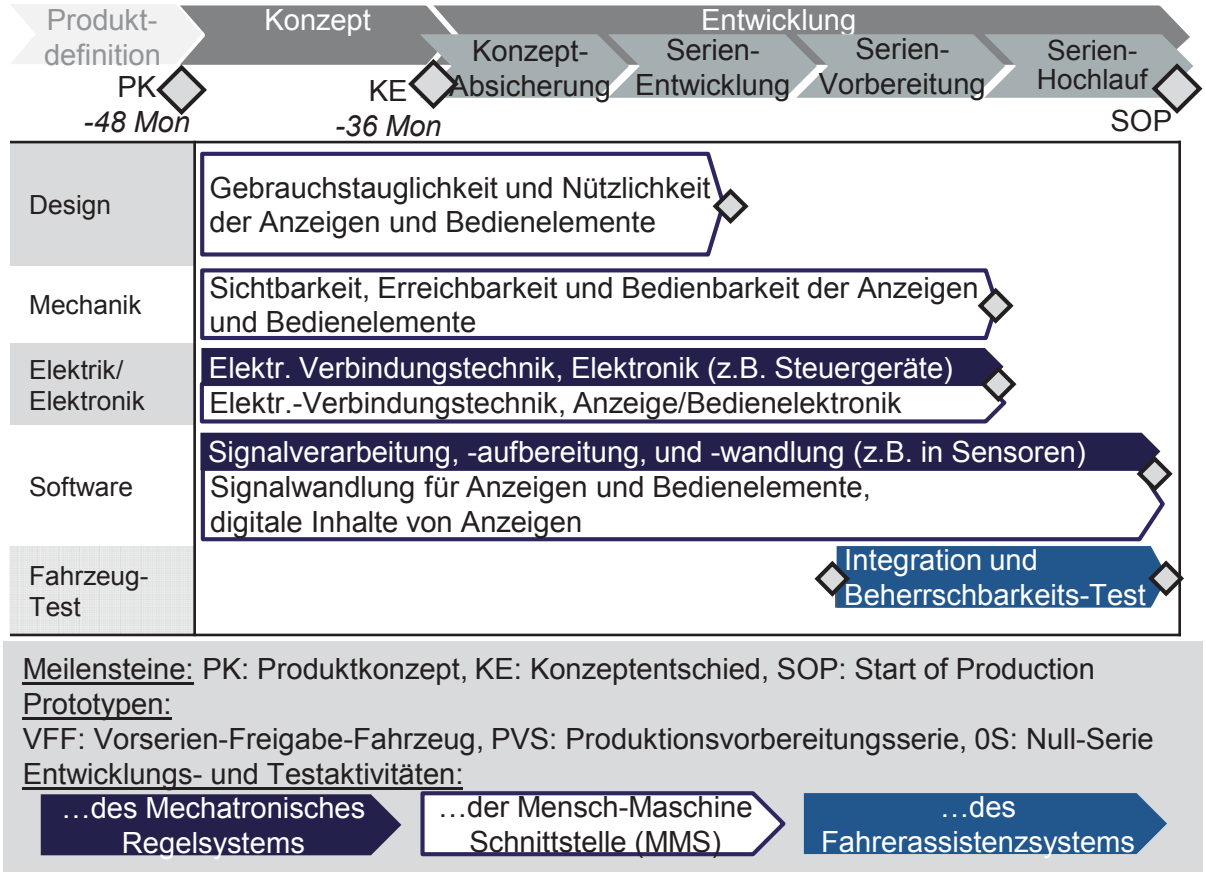


Abbildung 46: Entwicklungs- und Testaktivitäten der FAS Entwicklung im automobilen Produktentwicklungsprozess

Mit dieser Darstellung ist es möglich, die jeweilige Domänen-Entwicklung in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess darzustellen, aber auch eine Kette von Testaktivitäten in einem kontinuierlichen Teilprozess. Die Darstellung ist jedoch ungeeignet, die zahlreichen Wechselwirkungen der Domänen und die domänenübergreifenden Aspekte der Integration und des Tests in der Entwicklung des mechatronischen Systems

FAS abzubilden. Daher werden, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, das Vorgehensmodell V-Modell und seine Derivate zur Beschreibung von FAS Entwicklungsprozessen eingesetzt (nach Wisselmann et al. 2014, S. 7; Wehner et al. 2014, S. 381; Schäuffele und Zurawka 2013, S. 19). Der Domänen-Entwicklungsprozess der Software, bestehend aus den Prozessschritten Rapid Control Prototyping (RCP), Grobdesign und Feindesign, kann als Kette von V-Modellen beschrieben werden (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 30).

Abbildung 47 (Links) zeigt diese Kette. Der Software-Prototyp, je nach Testverfahren entweder das im CASE-Tool erstellte Software-Verhaltensmodell (1), der Software-Code (3) oder der Software-Code implementiert auf einem Steuergerät (5), wird entlang des jeweiligen Domänen-Prozessschrittes so lange weiterentwickelt, bis der in der Spezifikation beschriebene Zielzustand (2, 3, 6) durch das jeweilige Testverfahren bestätigt ist. Es erfolgt also eine inkrementelle Entwicklung des Software-Prototyps analog den Ausführungen der VDI 2206 (siehe Kapitel 3.2.2).

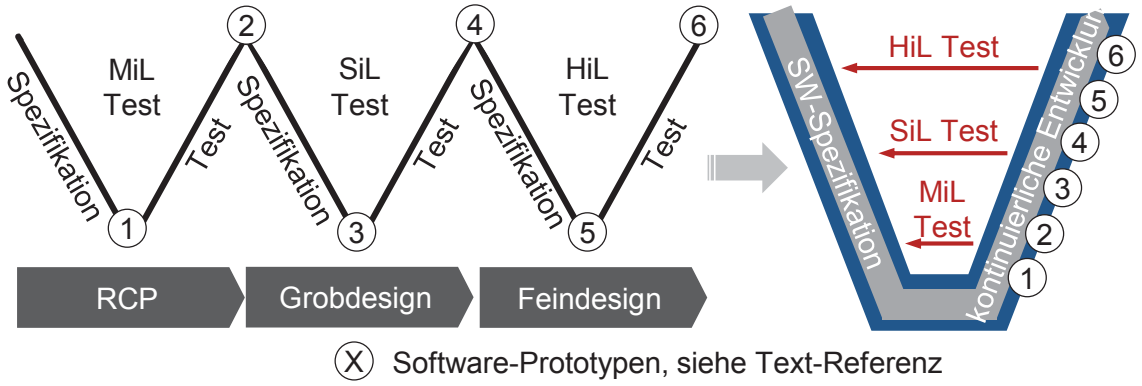


Abbildung 47: (Links) Inkrementelles Vorgehen zur Beschreibung der Schritte des Tests von Software (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 30), (Rechts) Abgeleitetes V-Modell zur Beschreibung der Schritte des Tests von Software

Derivate des V-Modells, wie beispielsweise das in Kapitel 3.2.2 beschriebene V-Modell XT oder das MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin, fassen dieses inkrementelle Vorgehen in einen einzigen Prozess zusammen. Im Rahmen des iterativen Vorgehens werden Erkenntnisse aus den Tests zurück an die Domänen gespielt, die Prototypen werden mit Hilfe der Domänen-Werkzeuge entlang der Prozesskette zu steigender Reife weiterentwickelt. Diesen Ausführungen folgend, kann das inkrementelle Vorgehen der Kette von V-Modellen das in **Abbildung 47 (Rechts)** dargestellte V-Modell zusammengefasst werden: Es werden kontinuierlich zu steigender Reife weiterentwickelte Prototypen mit verschiedenen Testverfahren gegen die Spezifikationen des linken Astes getestet.

Verschiedene Derivate des V-Modells beschreiben den **domänenübergreifenden Entwicklungsprozess von elektronischen Systemen und Software im Fahrzeug**. Analog zu den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen V-Modellen differenzieren diese zwischen Entwicklungs- und Testaktivitäten auf Domänen-Ebene sowie auf domänenübergreifender System-Ebene (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 22–24; Wehner et al. 2014, S. 381). Exemplarisch ist in der nachfolgenden **Abbildung 48** der Entwicklungsprozess von elektronischen Systemen und Software im Fahrzeug nach Schäuffele und Zurawka darstellt.

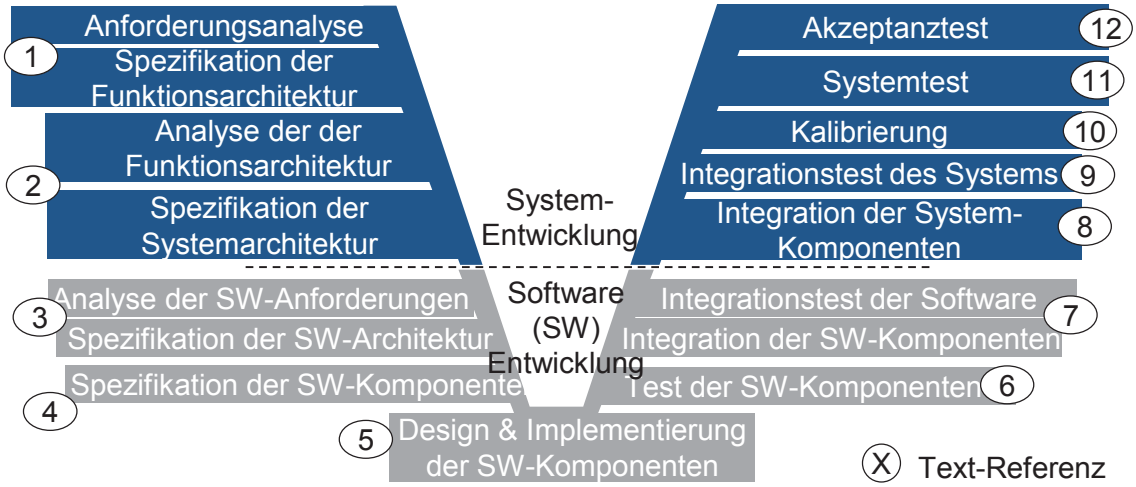


Abbildung 48: Das V-Modell zur Entwicklung von elektronischen Systemen und Software im Fahrzeug (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 23)

Die initialen Schritte der Anforderungsanalyse (1) dienen der Analyse der Benutzeranforderungen und der Ableitung technisch verwertbarer Anforderungen. Es folgt die Spezifikation der Funktionsarchitektur. Auf Basis dieser wird die Systemarchitektur (2) festgelegt. Anschließend wird in der Software-Entwicklung die Software- (SW) Architektur (3) spezifiziert. Diese beschreibt die Grenzen und Schnittstellen des Software-Systems und die Software-Komponenten des Systems (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 22–23). Es folgt die Spezifikation der einzelnen Software-Komponenten (4), gefolgt von deren Entwurf, Implementierung (5) und Test (6). Es folgt die Integration der Software-Komponenten zum Software-System und anschließendem Test (7). Der erfolgreich entsprechend der Software-Spezifikation entwickelte Software-Prototyp wird anschließend mit der Steuergräte-Elektronik integriert (8) (Schäuffele und Zurawka 2013, S. 24). Zum Test dieses domänenübergreifenden integrierten Prototyps werden Umgebungselemente, beispielsweise Sensoren oder Aktoren, mit dem Steuergerät gekoppelt und der Prototyp im XiL-Test getestet (9). Es folgt die Kalibrierung des Steuergerätes mit fahrzeugspezifischen Kennwerten, Kennlinien oder Kennfeldern (10). Anschließend findender Systemtest gegenüber der Funktionsarchitektur (11), also eine Verifikation statt. Es folgt die abschließende Validierung im Akzeptanztest gegenüber den Nutzanforderungen (12).

Wie gezeigt, lassen sich die in Abbildung 47 beschriebene Schritte der Software-Entwicklung des automobilen Produktentwicklungsprozesses auf das V-Modell übertragen. Dieses bietet eine Darstellungsform der **kontinuierlichen Entwicklung** und des **entwicklungsbegleitenden Tests** auf Ebene der Entwicklungsdomänen sowie der **domänenübergreifenden Integration** und dem **domänenübergreifenden Test** gegen die Anforderungen und Architektur des Gesamt-Systems. Eine **Darstellung** des gesamten automobilen Produktentwicklungsprozesses, wie auch des gesamten **System-Entwicklungsprozesses des FAS** in Form des V-Modells ist in der Literatur jedoch **nicht verfügbar**. Da eine solche Darstellung für den weiteren Verlauf der Arbeit essentiell ist, wird diese auf Basis der beschriebenen Vorgehensweisen im Folgenden abgeleitet. Dazu werden die folgenden Annahmen getroffen:

Erstens ist das FAS ein System des Produktes Fahrzeug.

Zweitens besteht das FAS aus den zwei Teilsystemen Mechatronisches Regelsystem sowie Mensch-Maschine Schnittstelle.

Drittens findet die Entwicklung des FAS in den Ebenen System (dem FAS) sowie Teilsystem (dem mechatronischen Regelsystem beziehungsweise der Mensch-Maschine Schnittstelle) statt. Die Teilsysteme können in „reine“ Domänen-Bestandteile zerlegt werden, also in mechanische, elektrische und elektronische sowie Software-Elemente.

Die nachfolgende **Abbildung 49** zeigt den automobilen Produktentwicklungsprozess im entsprechend adaptierten MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin. Da der Fokus der Arbeit auf dem Test zur Eigenschaftsabsicherung liegt, wird die Planung von Dienstleistungen und von (Produktions-) Prozess und Ressourcen zur besseren Übersichtlichkeit aus der Darstellung ausgeklammert.

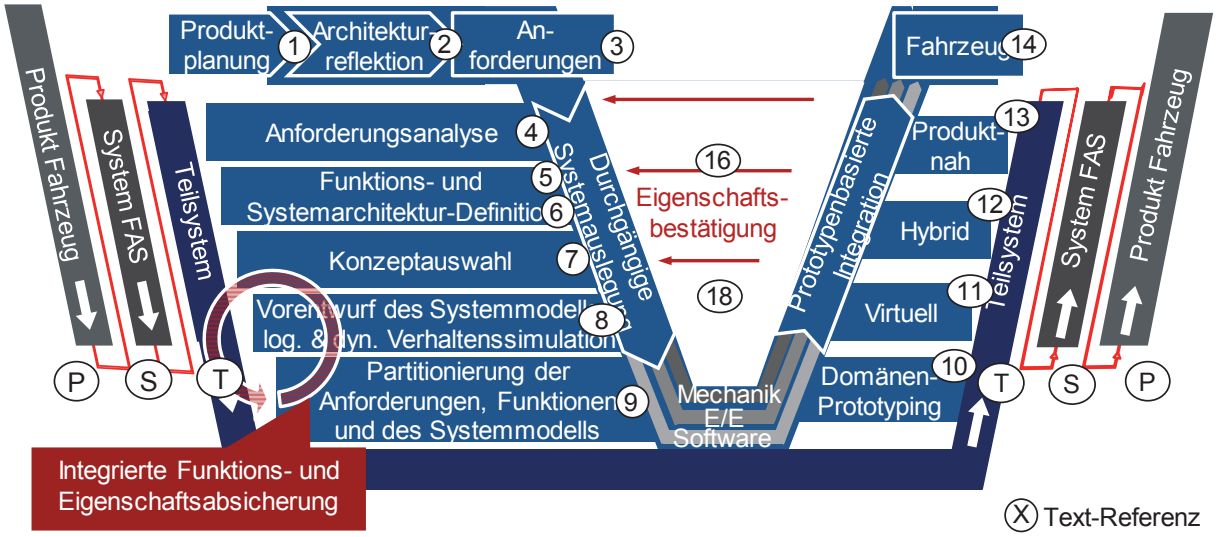


Abbildung 49: Der automobile Produktentwicklungsprozess und der FAS Entwicklungsprozess im MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin

Der automobile Produktentwicklungsprozess startet mit den Schritten der Produktplanung (1) sowie der Reflexion der Architektur (2) zur Erfassung bestehender Elemente aus vorherigen Entwicklungsprozessen sowie der Festlegung von einzusetzenden Baukasten-Bestandteilen. Anschließend erfolgt die Aufnahme der Kundenanforderungen und der Analyse von Wettbewerb, gesetzlichen Vorgaben und Kundengruppen (3).

Die generierten High-Level Anforderungen werden dann an das Fahrzeug-Entwicklungsprojekt übergeben, es startet die durchgängige Systemauslegung auf Produktebene (P). Diese wird durch das *Lastenheft* als Ergebnis der Anforderungsanalyse (4), die *Funktions*- und *Systemarchitektur* (5,6), den *Konzeptentwurf* (7) sowie den *Vorentwurf des Systemmodells* und die *logische* und *dynamische Verhaltenssimulation* (8) spezifiziert. Die in den Schritten 4-8 erzeugten Modelle und Dokumente bilden damit die *Spezifikation des Fahrzeugs*. Es erfolgt die Partitionierung in die Systeme (S), unter anderem das *Fahrerassistenzsystem*. Auf System-Ebene wird der Prozess der durchgängigen Systemauslegung von der Anforderungsanalyse (4) bis zur Vorentwurf des Systemmodells und der logischen und dynamischen Verhaltenssimulation (8) erneut durchlaufen. Anschließend erfolgt die Partitionierung des FAS in die Teilsysteme (T) *mechatronisches Regelsystem* und *Mensch-Maschine Schnittstelle*, für die wiederum die Schritte der durchgängigen Systemauslegung (4 bis 8) durchlaufen werden.

Es erfolgt die Erstellung der domänenspezifischen Spezifikationen (9), nach denen die Domänenprototypen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software entwickelt werden

(10). Nach erfolgreicher Prüfung der Spezifikationskonformität werden diese in der Prototypenbasierten Integration zum Teilsystem-Prototyp integriert und getestet. Hier kommen rein virtuelle (11), hybride (12) wie auch produktnahe Teilsystem-Prototypen (13) zum Einsatz. Letztere entsprechen nach Kapitel 3.2.2 entweder physischen Teil-Systemprototypen der Mechanik oder Elektrik/Elektronik. Oder seriennahem Software-Code. Sind die Teilsystem-Prototypen erfolgreich geprüft, erfolgt die Übergabe an die Systementwicklung (S), in der sie zum *FAS Prototyp* integriert und getestet werden. Zuletzt findet die Übergabe des *FAS* an die Produktentwicklung (P) sowie dessen Integration und Test in den Fahrzeug-Prototyp statt. Der Prozess schließt mit der Fertigstellung des Produktes *Fahrzeug* (14).

Wird die Ebene Produkt *Fahrzeug* aus der Betrachtung ausgeklammert, kann der FAS Entwicklungsprozess wie in der nachfolgenden **Abbildung 50** visualisiert, als dreiteiliges Systementwicklungs-Prozessmodell dargestellt werden. Der Prozess startet mit der Übergabe der System-Spezifikationen aus der Produktentwicklung des Fahrzeugs und endet mit der Übergabe des entsprechend dieser Spezifikationen entwickelten Systems Fahrerassistenzsystem an die Produktentwicklung.

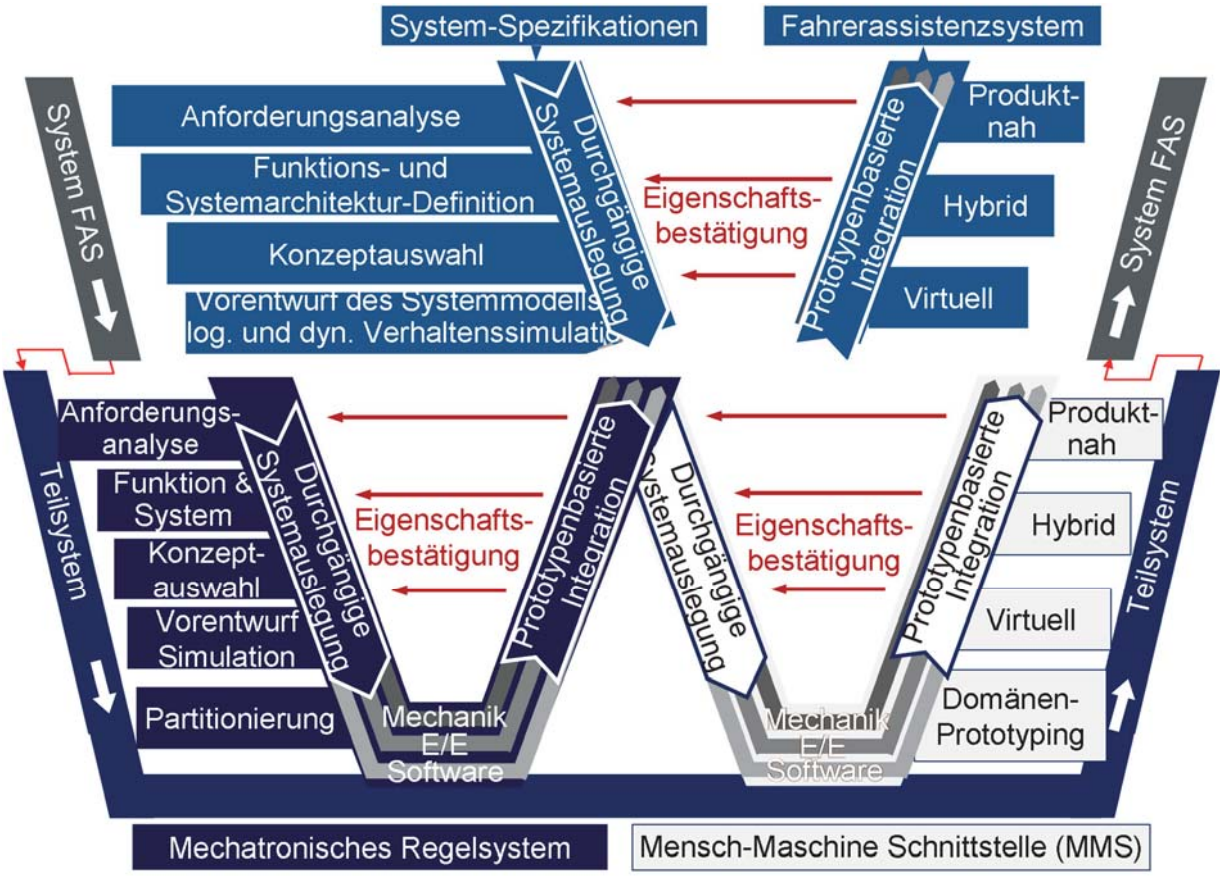


Abbildung 50: Detaillierte Darstellung des FAS Entwicklungsprozesses im MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK und der TU Berlin

Dieses Vorgehensmodell ermöglicht die Darstellung aller Aktivitäten der Integration und des Tests von FAS.

3.4.2 Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen

In der deutschen Gesetzgebung ist eine Verantwortung der Fahrzeughersteller für Personenschäden infolge technischer Defekte durch §823, Absatz 1 des Bürgerlichen Gesetzbuches vorgesehen (Bundesamt für Justiz 12.07.2018). Nur falls ein solcher Defekt mit durch Einsatz von Entwicklung- und Testwerkzeugen des Stand der Technik nicht nachweisbar ist, können die Automobilhersteller von den zuständigen Prüfstellen von der Haftung ausgeschlossen werden (Altinger et al. 2014, S. 5). Aus diesem Grund sind für die FAS Entwicklung die Standards der ISO 26262 entwickelt und seit 2011 verpflichtend eingeführt worden (nach Altinger et al. 2014, S. 5). Die ISO 26262 definiert Standards für sicherheitsrelevante elektrische und/oder elektronische Fahrzeugsysteme und der eingesetzten Software und fokussiert die funktionale Sicherheit der Systeme und des Fahrzeugs, in das diese verbaut sind (ISO 26262-1). Das Vorgehen der ISO 26262 zur Definition der Sicherheitsanforderungen orientiert sich am allgemeinen V- Modell der Produktentwicklung. So werden zu Beginn Gefahren- und Risikoanalysen vorgenommen, um mögliche Risiken der Funktion abschätzen zu können (Weitzel und Winner 2012, S. 2). Diese Analysen sowie die zugrundeliegenden Anforderungen müssen anschließend in der Systementwicklung validiert werden.

Ein spezifisches Sicherheitsziel, das für den erfolgreichen Nachweis der funktionalen Sicherheit zu erfüllen ist, ist die **„Controllability“,** im deutschen Sprachraum auch als **Beherrschbarkeit** oder Kontrollierbarkeit bezeichnet (Weitzel und Winner 2012, S. 2).

Die Beherrschbarkeit eines FAS bezeichnet dessen Fähigkeit, durch rechtzeitige Reaktion Verletzungen oder Schädigungen von den beteiligten Personen abzuwenden (ISO 26262-1, S. 4).

Beteiligte Personen können der Fahrer, Passagiere aber auch Personen in der Nähe des Fahrzeugäußeren sein. Zur Unterstützung der Beherrschbarkeit können auch zusätzliche Messungen eingesetzt werden (ISO 26262-1, S. 4). Eine Bewertung der Beherrschbarkeit ist bereits in einer Gefahren- und Risikoanalyse erforderlich und muss durch spätere Entwicklungsstudien und auf Basis von Erfahrungen bereits getesteter Systeme gestützt werden (Weitzel und Winner 2012, S. 2). Methoden, bewährte Vorgehensweisen und Werkzeuge zur Bewertung der Beherrschbarkeit sind im **RESPONSE Code of Practice** zusammengefasst (Response Consortium 2009). Die Wiener Straßenverkehrskonvention, ein internationaler Vertrag zur Standardisierung von Verkehrsregeln, definiert das gesetzliche Kriterium an Beherrschbarkeit eines FAS wie folgt (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2016):

Das FAS muss so gestaltet sein, dass der Fahrer es jederzeit übersteuern oder abschalten kann.

Die Beherrschbarkeit bezieht sich damit auf die ganzheitliche Interaktion zwischen Fahrer und FAS. Dies beinhaltet sowohl die Nutzung des FAS innerhalb dessen Systemgrenzen als auch darüber hinaus. Sowie die Nutzung während oder nach dem Auftreten von Fehlern (Response Consortium 2009, S. 13). Die Beherrschbarkeit eines FAS durch einen Fahrer hängt damit an:

- Der Möglichkeit und der Fähigkeit des Fahrers, die Kritikalität einer Situation mit Unterstützung des FAS wahrzunehmen,
- Der Fähigkeit des Fahrers zur Entscheidung für eine angemessene Gegenreaktion,
- Sowie der Fähigkeit des Fahrers, die Gegenreaktion mit Unterstützung des FAS durchzuführen.

Für die Bewertung der Beherrschbarkeit definiert die ISO 26262 die in **Tabelle 9** dargestellten vier Klassen der Beherrschbarkeit.

Tabelle 9: Klassen der Beherrschbarkeit (nach ISO 26262-3, S. 10; Weitzel und Winner 2012, S. 4)

Klasse	**C0**	**C1**	**C2**	**C3**
Beschreibung	Generell beherrschbar	Einfach beherrschbar	Normal beherrschbar	schwierig oder nicht beherrschbar
Definition	Generelle Beherrschbarkeit durch 100% aller Fahrer	≥ 99% …	≥ 90% …	< 90% …
		…oder mehr aller Fahrer oder anderen Verkehrsteilnehmer sind in der Lage spezifische Verletzungen oder Schädigungen zu vermeiden		

Es wird zwischen den Klassen C0 „generelle Beherrschbarkeit“ bis zur Klasse C3 „schwierig oder nicht beherrschbar“ nach dem Anteil der Fahrer, die das Ereignis beherrschen können, unterschieden (Weitzel und Winner 2012, S. 2).

Für eine Bewertung wird für eine identifizierte gefährliche Situation grundsätzlich von der Einstufung C3 ausgegangen, es wird davon ausgegangen dass die Situation nicht kontrollierbar ist (ISO 26262-3, S. 24). Für einen Nachweis der Beherrschbarkeit nach Klasse C0, C1 oder C2 muss eine funktionierende Interaktion zwischen Fahrer und FAS nachgewiesen werden: Es sind also Probandenversuche des FAS mit der spezifischen Funktion oder zumindest einer Funktion hoher Ähnlichkeit erforderlich (Weitzel und Winner 2012, S. 3). Aus statistischer Sicht ist der Umfang der Probandengruppe das für den Nachweis bestimmende Merkmal. So ist die generelle Beherrschbarkeit C0 statistisch nicht oder nur unter sehr hohem Aufwand nachweisbar (Weitzel und Winner 2012, S. 3). Daher wird die Bewertung C0 in der Praxis nur vergeben, wenn das Nichtvorhandensein der Funktion die Sicherheit der Fahrt nicht gefährdet oder der Nachweis hinreichend auf Basis von Erfahrungen erbracht werden kann (ISO 26262-3, S. 10). Exemplarisch können dies beispielsweise Fehlfunktionen im Multimedia-System oder der (rechnerische) Nachweis der im Fehlerfall wirkenden Kräfte und Beschleunigungen sein (ISO 26262-3, S. 10; ISO 26262-3, S. 24). Der statistische Nachweis der Klasse C1 durch 99% der Fahrer kann mit mindestens 299 Probanden im Probandentest erbracht werden (Weitzel und Winner 2012, S. 4). Für den statistischen Nachweis des Klasse C2 durch 90% der Fahrer wird eine Probandengruppe ab 20 Personen als ausreichend angesehen (Response Consortium 2009, S. 15). Da der Aufwand des Nachweis der Klasse C1 gegenüber Klasse C2 vergleichsweise hoch ist, wird in der Praxis zumeist nur Klasse C2 abgesichert (Weitzel und Winner 2012, S. 3). Die Abgrenzung zu Klasse C1 erfolgt dann durch eine Expertenbeurteilung nach Abschluss der Probandentests zum Nachweis der Klasse C2.

Der abschließende Nachweis der Beherrschbarkeit eines FAS kann auf **drei Arten** erfolgen (nach Response Consortium 2009, S. 14–15):

1. Zum einen kann das FAS in einem interdisziplinären Experten-Panel durch Fachexperten auf Basis von Analogien, Literaturangeben sowie Testergebnissen aus der Entwicklung bewertet werden. Zusätzlich können auch Tests durchgeführt werden.
2. Weiterhin kann der Nachweis im Test des FAS mit einer statistisch signifikanten Gruppe naiver Probanden ohne Bezug zum Entwicklungsprozess in den relevan-

ten Szenarien erbracht werden. Das Testszenario wird als bestanden angenommen, wenn die Probanden entsprechend der FAS Auslegung reagieren. Oder zumindest so situationsadäquat, dass die Situation beherrscht wird.

3. Zuletzt kann der Nachweis durch das FAS Entwicklungsteam selbst erbracht werden. Dazu muss die Erfüllung einer Anforderungsliste durch verschiedene Tests des FAS in den relevanten Szenarien nachgewiesen werden.

Für den Nachweis definiert der RESPONSE Code of Practice einen Fragenkatalog, dessen Beantwortung die umfassende Evaluation eines FAS hinsichtlich Beherrschbarkeit ermöglicht (Response Consortium 2009, A24-A40). Der Fragenkatalog beinhaltet 107 Fragen, gruppiert nach Kriterien der **Fahrerwahrnehmung und Bewertung** der Kritikalität einer Situation, der **Fahrer-Entscheidung** einer angemessenen Reaktion, sowie der **Ausführung der Reaktion** durch den Fahrer. **Tabelle 10** zeigt die im Fragenkatalog beinhalteten Kriterien-Gruppen und beschreibt die Anforderungen, die jeweils an die Beherrschbarkeit des FAS gestellt werden.

Tabelle 10: Kriterien-Gruppen des Fragenkatalogs Beherrschbarkeit von FAS (nach Response Consortium 2009, A24-A40)

	Kriterien-Gruppe und Beschreibung	Anzahl Fragen
Fahrer-Wahrnehmung	1) **Vorhersagbarkeit** des Systems für den Fahrer und Verkehrsteilnehmer	4
	2) **Emotionale Probleme** durch Nutzung des Systems, beispielsweise durch erhöhten Stress beim Fahrer,	2
	3) **Vertrauen** des Fahrers in Warn-Anzeigen des Systems,	5
	4) **Wahrnehmbarkeit** von Systemanzeigen durch den Fahrer, beispielsweise gemessen an der Position von MMS im Fahrzeug oder der zeitlicher Gestaltung und Eindeutigkeit von Warnanzeigen,	8
	5) **Wachsamkeit** des Fahrers und der Fähigkeit des Systems, diese in kritischen Situationen sicherzustellen	3
	6) **Arbeitsbelastung** des Fahrers, die durch das Systems gering gehalten werden muss sowie die Müdigkeit, die vermieden werden muss.	4
Fahrer-Entscheidung	7) **Verkehrssicherheit und Verkehrsrisiko**, beispielsweise gemessen an der Verständlichkeit von Systemreaktion von anderen Verkehrsteilnehmern, der Möglichkeit für den Fahrer das System zu bedienen oder der Fähigkeit des Systems, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden.	11
	8) **Verantwortung und Haftung**, gemessen an der Möglichkeit des Fahrers das Systems jederzeit übersteuern oder abschalten zu können. An dessen Gesetzeskonformität, Vorhersagbarkeit für anderen Verkehrsteilnehmer oder Qualität der Dokumentation,	16
	9) **Erlernbarkeit**, gemessen an den zur Verwendung benötigten Fähigkeiten sowie der Kompatibilität zwischen System und dessen mentalem Modell beim Fahrer,	3
	10) **Verhaltensänderungen des Fahrers** aufgrund von Verwirrung des Fahrers durch Systemanzeigen oder anderer Verkehrsteilnehmer durch Systemreaktionen,	4
	11) **Verständlichkeit** der Systemgrenzen, beispielsweise von Sensorreichweiten, Arbeitsbereichen des Systems oder der Outputs dessen MMS.	8
	12) **Fehlerrobustheit** des Systems, beispielsweise durch physische Limitationen während der Fahrt oder einer zeitlichen Nicht-Verfügbarkeit des Systems.	4

	Kriterien-Gruppe und Beschreibung	Anzahl Fragen
Fahrer-Reaktion	13) **Fehlbenutzungs-Potential**, beispielsweise durch externe Manipulation. Aber auch durch die Erprobung von Systemgrenzen durch den Fahrer oder der fehlerhaften Verstellung von Systemfunktionen.	8
	14) **Makroskopische Effekte und Fahreffizienz**, beispielsweise gemessen an der Beeinflussung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer oder einer Effizienzsteigerung der Fahrt durch das System.	4
	15) **Vorteile und Akzeptanz**, gemessen an der Angemessenheit von Warnmeldungen,	1
	16) **Durchführbarkeit** aller Mensch-Maschine Interaktionen für alle Fahrer. Sowie der Möglichkeit, diese auch zu korrigieren.	3
	17) **Kontrollproblem**, beispielsweise gemessen an der Fähigkeit des Fahrers mit unbeabsichtigter Aktivierung/Deaktivierung umzugehen, der Intuitivität von Fahrhandlungen zum Übersteuern oder einem Bedarf nach einem Training für die Bedienung des Systems	17
	Summe	107

In der Entwicklung von FAS stellt die ISO 26262 einen maßgeblichen Standard für die Integration und Test von Elektrik, Elektronik sowie Software dar. Das dort beschriebene, am V-Modell orientierte Vorgehen bildet die Basis der folgenden Ausführungen.

Im Folgenden soll zunächst die Integration und der Test des Regelkreises der Mechatronik beschrieben werden. Dieser dient dem Test des *Mechatronischen Regelsystems*, bestehend aus der Steuerung, Sensorik, Aktorik und des Car2X-Systems, in Interaktion mit der Umgebung, Fremdfahrzeugen sowie der Infrastruktur.

3.4.3 Integration und Test des Mechatronischen Regelsystems

Abbildung 51 (Links) dient der Verortung dieses Teilsystems in der FAS Systemdarstellung. **Abbildung 51 (Rechts)** zeigt die Verortung in dem durch Abbildung 50 beschriebenen FAS Entwicklungsprozess.

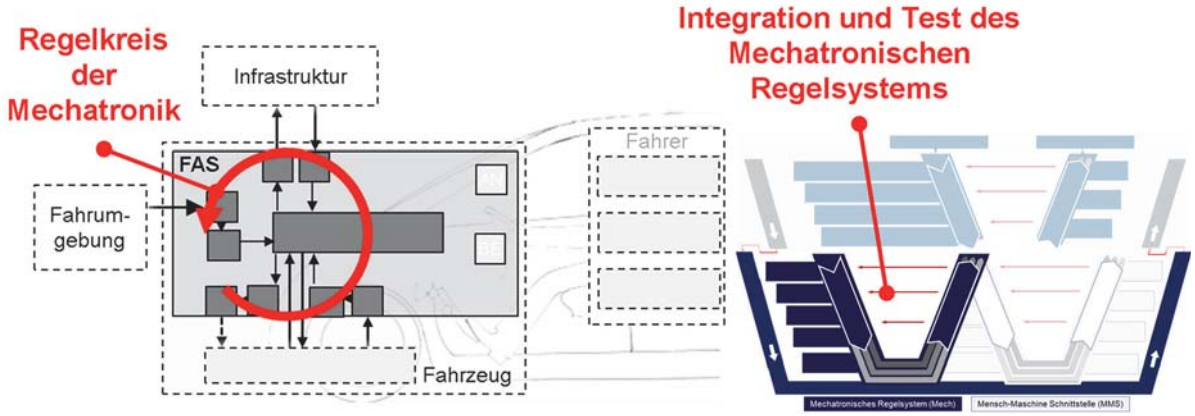


Abbildung 51: Verortung des Teilsystems *Mechatronisches Regelsystem* im FAS Systemschaubild sowie dessen Integration und Test im FAS Entwicklungsprozess

Die Aktivitäten zur Integration und Test der Steuerung, der Sensorik, dem Car2X System und der Aktorik sind nach den Ausführungen der Kapitel 3.3.1 bis Kapitel 3.3.3 dem Elektrik-/Elektronik-Test sowie dem Software-Test zugeordnet und werden im

Folgenden beschrieben. Die im Text verwendeten Kürzel (E), (S), und (ES) verweisen auf **Abbildung 52**, welche das Vorgehen abschließend grafisch zusammenfasst.

Integration und Test der Elektrik und Elektronik

Die ersten Tests in der Elektrik und Elektronik werden mit informellen Testverfahren wie Inspektionen sowie Walkthroughs der *Elektrik-/Elektronik-Systemarchitektur* **(E1)** durch Entwickler durchgeführt (ISO 26262-5, S. 12). Ziel ist insbesondere die frühzeitige Analyse hinsichtlich Umgang mit zufälligen Fehlern (ISO 26262-5, S. 31).

Die ersten modellbasierten Tests der Elektronik werden mit 2D E-CAD-Werkzeugen durchgeführt. So werden beispielsweise die Systemschaltpläne des Gesamtsystems, der Leiterplatten der Steuergeräte oder von integrierten Schaltkreisen der implementierten Mikroprozessoren mit den statischen Testverfahren Kontroll-Analyse und Fehleranalyse geprüft **(E2)** (ISO 26262-5, S. 12; Eigner et al. 2014, S. 140ff). Anschließend werden die Entwürfe in Hardwareprototypen der Elektronik überführt **(E3)** (ISO 26262-5, S. 12). Diese mit Rapid Prototyping Verfahren hergestellte *Rapid Prototyping Elektronik* wird mit verschiedenen dynamischen Testverfahren wie Funktionstest, Falsch-Eingabe Test, Elektrik-Test und Test der Robustheit und Arbeit unter externem Stress auf die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen geprüft (ISO 26262-5, S. 31). Diese Tests werden zunächst auf Komponentenebene durchgeführt, anschließend mit zu Elektronik-Teilsystemen vernetzten Komponenten (Schleuter et al. 2007, S. 9). In einem iterativen, prototypenbasierten Entwicklungs- und Testvorgehen werden diese Elektronik-Teilsysteme mit weiterer *Rapid Prototyping Elektronik* bis hin zur *Serien-Elektronik* **(E4)** weiter entwickelt (Bieser 2007, S. 59).

Parallel zu den ersten 2D Entwürfen und Tests werden die ersten 3D-Modelle der Elektrik-Installation mit 3D E-CAD-Tools erstellt **(E5)**. Die Hauptaufgabe liegt in der passenden Positionierung und Ausrichtung insbesondere der Messfühler, aber auch der Aktoren und Car2X Elemente, so dass diese gemäß ihres Wirkprinzips störungsfrei funktionieren (Winner et al. 2012, S. 96; Reif 2011, S. 157). Es folgt das 3D E-CAD-basierte Packaging der restlichen Steuergeräte und elektronischen Bauelemente sowie die 3D CAD-Elektrik-Installation zu deren elektrischer Kopplung **(E6)** (Winner et al. 2012, S. 96). Es werden keine dynamischen Tests, sondern abteilungsübergreifende Reviews durchgeführt. Diese Reviews dienen der Prüfung der anforderungskonformen Umsetzung sowie der Fehlerfindung (Winner et al. 2012, S. 95). Es folgt der Aufbau physischer Prototypen der Elektrik-Installation **(E7),** zumeist zweidimensionale Ableitungen installiert auf Test-Boards wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Hier werden die prototypischen Elektronik-Komponenten mit der Elektrik zusammen geschlossen und mit Elektrik-Test auf anforderungsgerechtes Verhalten in Reaktion auf statische und dynamische elektrische Spannungen getestet (ISO 26262-5, S. 28). In einem iterativen Entwicklungs- und Testvorgehen wird die Elektrik bis zur Serienreife **(E8)** weiterentwickelt und kontinuierlich getestet.

Integration und Test der Software

Zuerst werden Inspektionen und Walkthroughs der *Software-Spezifikationen* durch deren Entwickler und Qualitätsverantwortliche durchgeführt **(S1)** (ISO 26262-6, S. 18). Ziel ist frühzeitige Prüfung der Software-Architektur hinsichtlich Konsistenz mit dem Sicherheitskonzept sowie der Spezifikation des Gesamtsystems (ISO 26262-6, S. 28). Es folgt die Erstellung von *Verhaltensmodellen* der Software **(S2)** (Bringmann und Krämer 2008, S. 487). Üblicherweise werden diese Modelle nicht vollständig sondern nur bis zu einem Detailgrad modelliert, der die enthaltene Komplexität verständlich und

handhabbar ausdrückt (Eigner et al. 2014, S. 166–167; Hommel 2006, S. 47). Die Verhaltensmodelle werden zunächst auf Komponentenebene, anschließend zu Software-Teilsystemen vernetzten Komponenten in statischen Kontrollanalysen oder Open-Loop Testverfahren wie Funktionstest oder Falsch-Eingabe-Tests auf korrekten Verhaltens bei normalen Betrieb, Plausibilität oder Fehlerfreiheit geprüft (ISO 26262-6, S. 13; ISO 26262-6, S. 20; Bringmann und Krämer 2008, S. 487; Krasnogolowy 2009, S. 4). Anschließend erfolgen Model-in-the-Loop Tests **(S4),** bei denen das *Teilsystem-Verhaltensmodell* in Interaktion mit einem Umgebungsmodell, erzeugt durch Fahrsimulations-Tools, auf anforderungskonformes Verhalten geprüft wird (ISO 26262-6, S. 15; Wisselmann et al. 2014, S. 7; Fischer 2015, S. 37).

Parallel zum Model-in-the-Loop Test wird bereits mit dem Entwurf des *Softwarecodes* begonnen, weitestgehend durch Rapid Control Prototyping, also automatische Generierung von Code aus dem Verhaltensmodell und Erweiterung um fehlende Elemente **(S3)** (Krasnogolowy 2009, S. 4; Eigner 2012, S. 166–167). Analog zum Verhaltensmodell wird der Softwarecode zunächst auf Komponentenebene, anschließend auf Teilsystem-Ebene in statischen Kontrollanalysen oder Schreibtischtests sowie in dynamischen Open-Loop Testverfahren wie Funktionstest oder Falsch-Eingabe-Tests geprüft (ISO 26262-6, S. 18). Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, werden in diesem Kontext statische Charakteristika wie Genauigkeit, Konsistenz oder Korrektheit getestet. Darüber hinaus auch dynamische Charakteristika wie das korrekte Verhalten, Plausibilität, Funktion, Reichweite oder Echtzeitverhalten.

Mit dem *Teilsystem-Softwarecode* werden dann Software-in-the-Loop Tests in Interaktion mit einem Umgebungsmodell zur Überprüfung auf anforderungskonformes Verhalten durchgeführt **(S5)** (ISO 26262-6, S. 15; Bringmann und Krämer 2008, S. 487; Wisselmann et al. 2014, S. 7). In einem iterativen Entwicklungs- und Testvorgehen wird der Softwarecode im Folgenden bis zur Serienreife **(S6)** weiterentwickelt und kontinuierlich getestet.

Gekoppelter Test des mechatronischen Regelsystems

Sobald der *Teilsystem-Softwarecode* in den statischen und dynamischen Tests hinreichende Fehlerfreiheit der verschiedene Charakteristika gezeigt hat, wird er erstmalig auf der zugehörigen *Rapid Prototyping Elektronik* eingebettet **(E3+S5)** (ISO 26262-6, S. 29; Krasnogolowy 2009, S. 3). Es folgt der Hardware-in-the-Loop Test mit einem Umgebungsmodell (ISO 26262-6, S. 26; Schäuffele und Zurawka 2013, S. 231). Ziel ist der Test auf anforderungskonformes Verhalten, aber auch die Identifikation von Problemen der Schnittstellen (Bringmann und Krämer 2008, S. 487). Mit zunehmender Reife von Elektronik und Software werden erweiterte Hardware-in-the-Loop Tests durchgeführt, in denen beispielsweise physischen Sensoren und Aktoren mit Serienelektrik ans Steuergerät angebunden sind **(E8+E4+S6)** (ISO 26262-6, S. 26; Schleuter et al. 2007, S. 8; Bringmann und Krämer 2008, S. 487). Neben der rein virtuellen Fahrsimulation basierend auf virtuellen Menschmodellen werden in dieser Phase auch Fahrsimulatoren als Testumgebung für den Hardware-in-the-Loop Test eingesetzt (Bubb 2015, S. 587). Sobald alle Sensoren, Aktoren und Steuergeräte in Serienreifeverfügbar sind, werden Tests im modularen Erprobungsfahrzeugen oder seriennahen Fahrzeugen durchgeführt (Reif 2011, S. 223; Zander-Nowicka 2008, S. 26).

Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, erfordert ein vollständiger Nachweis der in Tabelle 10 beschriebenen Beherrschbarkeits-Kriterien die Interaktion des FAS in beiden Regelkreisen. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, sind verschiedene Beherrschbarkeits-Kriterien bereits während der Teilsystem-Entwicklung testbar. So werden *Hardware-in-the-Loop*

Tests eingesetzt um die Fähigkeit des mechatronischen Regelsystems zu prüfen, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden (Response Consortium 2009, A55-A56). Dieses Kriterium ist der der in Tabelle 10 gezeigten Kriterium-Gruppe 7, Verkehrssicherheit und Verkehrsrisiko, zugehörig. Der Test dieser Kriterien auf Teilsystem-Ebene kann den gekoppelten Testverfahren (E3+S5) oder (E8+E4+S6) zugeordnet werden.

Tabelle 11 fasst die dargestellten Modelle und Prototypen und das jeweils eingesetzte Testverfahren zusammen. **Abbildung 52** verortet das Vorgehen zur Integration und Test der Elektrik, Elektronik und Software sowie den gekoppelten Test von Elektronik und Software im Teilsystem-Entwicklungsprozess des mechatronischen Regelsystems.

Tabelle 11: Modelle, Prototypen und Testverfahren im Test des mechatronischen Regelsystems

	Modell/Prototyp	**Testverfahren**
E1	Elektrik/Elektronik Systemarchitektur	Walkthrough & Inspektion
E2	2D E-CAD Systemschaltpläne, Leiterplatten, integrierte Schaltkreise	Kontroll- und Fehleranalyse
E3	Rapid Prototyping Elektronik	Funktionstest, Falsch- Eingabe Test, Elektrik-Test, Test der Robustheit
E4	Seriennahe Elektronik	Funktionstest, Falsch- Eingabe Test , Elektrik-Test, Test der Robustheit
E5	3D E-CAD Messfühler, Aktorik, Car2X	Review
E6	3D E-CAD Elektrik-Installation & Packaging	Review
E7	physischer Prototyp der Elektrik-Installation	Elektrik-Test
E8	Seriennahe Elektrik	Elektrik-Test
S1	Software Systemarchitektur	Walkthrough & Inspektion
S2	Software Verhaltensmodell	Funktionstest, Falsch-Eingabe Test
S3		Model-in-the-Loop Test
S4	Software-Code	Funktionstest, Falsch-Eingabe Test, Schreibtischtest
S5		Software-in-the-Loop Test
S6	Seriennaher Software-Code	Software-in-the-Loop Test
ES1	Rapid Prototyping Elektronik & prototypischer Software-Code	Hardware-in-the-Loop Test
ES2	Seriennaher Elektronik Prototyp & seriennaher Software-Code	Hardware-in-the-Loop Test, u.a. mit gekoppelten Sensoren und Aktoren, Feldtest im Fahrzeug, teilweise auch Test im Fahrsimulator

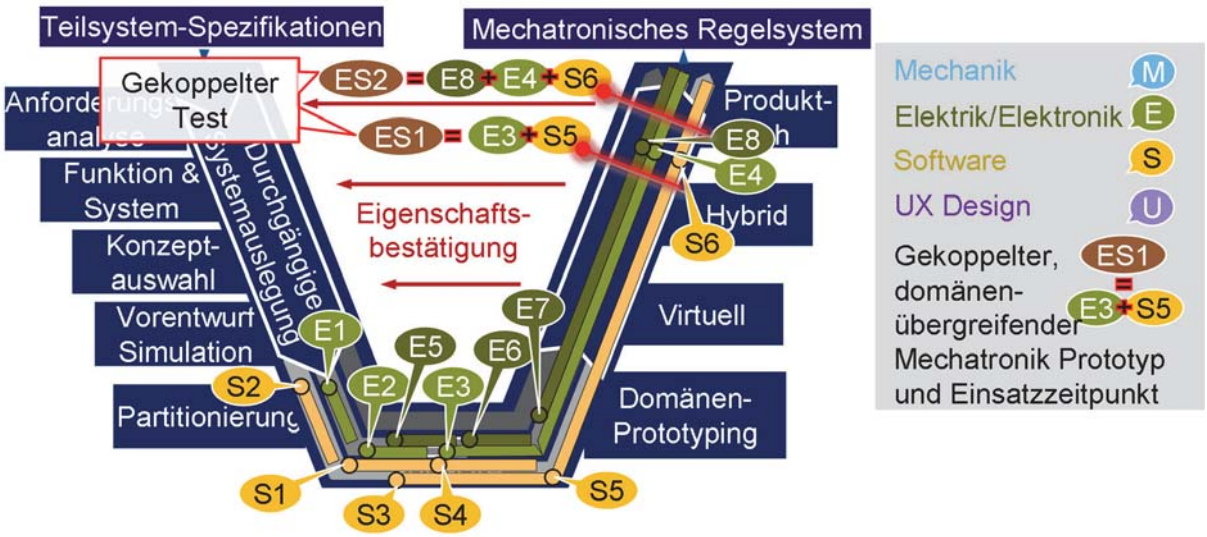


Abbildung 52: Test des mechatronischen Regelsystems und dessen Interaktionen im Regelkreis der Mechatronik

Das folgende Kapitel dient der Beschreibung der Integration und des Tests des Regelkreises der Fahrer-FAS-Interaktion. Dieser dient dem Test des Teilsystems *Mensch-Maschine Schnittstelle*, bestehend aus den Anzeigen und Bedienelementen des FAS, in Interaktion mit der Steuerung und dem Fahrer.

3.4.4 Integration und Test des Teilsystems Mensch-Maschine Schnittstelle

Abbildung 53 (Links) dient der Verortung dieses Teilsystems in der FAS Systemdarstellung. **Abbildung 53 (Rechts)** zeigt darüber hinaus die Verortung im durch Abbildung 50 beschriebenen FAS Entwicklungsprozess.

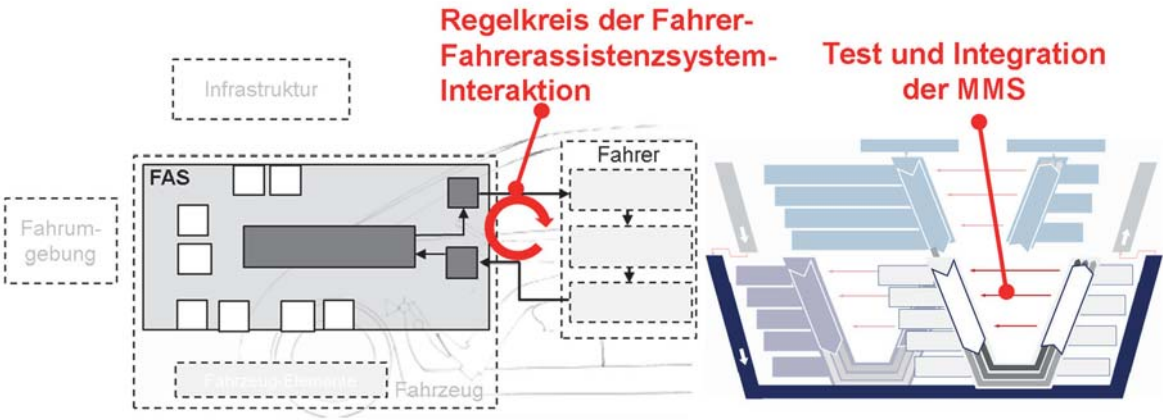


Abbildung 53: Verortung des Teilsystems *Mensch-Maschine Schnittstelle* im FAS Systemschaubild so-wie dessen Integration und Test im FAS Entwicklungsprozess

In Integration und Test der Mensch-Maschine Schnittstellen des FAS lassen sich zwei Vorgehensweisen identifizieren:

1. Die **Integration und Test der MMS Elektrik, Elektronik und Software**. Dies umfasst die Elektrik und Elektronik der Anzeigen, Bedienelemente und deren Steuergeräten sowie die auf den MMS-Steuergeräten implementierte Software

zur Ansteuerung visueller, akustischer und haptischer Anzeigen und der Auswertung von Bedienelementen. Es werden die in **Abbildung 52** beschriebenen Schritte **(E1) bis (E8)** für die Integration und Test der Elektrik/Elektronik, die Schritte **(S1) bis (S5)** für die Integration und Test der Software sowie die Schritte **(E3+S5)** beziehungsweise **(E8+E4+S6)** für den gekoppelten Test durchlaufen.

2. Die **Integration von MMS Design-Prototypen und deren Test des User Experience Designs s**owie dem Aufbau von MMS Mechanik-Prototypen und deren Test hinsichtlich **anthropometrischen und ergonomischen Gestaltungsmerkmalen**.

Da die erste Vorgehensweise dem in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Testvorgehen der Integration und Test des mechatronischen Regelsystems entspricht, wird nachfolgend nur auf die zweite Vorgehensweise eingegangen. Die im Text verwendeten Kürzel (U), (M) und (UM) verweisen auf **Abbildung 54**, welche das Vorgehen grafisch zusammenfasst.

Integration zum Design-Prototypen und Test des User Experience (UX) Designs

Zunächst wird der *MMS Basisentwurf* erstellt, der die Fahreraktivitäten zum Betrieb des Systems, die jeweils ausgetauschten Informationen sowie Prozeduren zur wechselseitigen Übergabe beinhaltet **(U1)** (Response Consortium 2009, S. 18; Bubb 2015, S. 586). Der *MMS Basisentwurf* wird heute zumeist nicht modellbasiert, sondern auf Basis von Zeichnungen oder Dokumenten erstellt. Mit diesen Entwürfen werden Inspektionen und Schreibtischtests durch Entwickler mit dem Ziel durchgeführt, Fehler hinsichtlich Usability aufzufinden (Harvey et al. 2011, S. 568).

Für einen ersten Test der Gebrauchstauglichkeit werden auf dieser Basis anschließend *Papierprototypen* oder rudimentäre *Klickprototypen*, beispielsweise auf Basis von Power Point Präsentationen, erstellt **(U2)** (Bubb 2015, S. 586). Auf Basis von Checklisten-basierten Inspektionen sowie Reviews werden mit diesen Prototypen erste Untersuchungen der Beherrschbarkeit durch Expertengruppen durchgeführt (Response Consortium 2009, A24-A40; Harvey et al. 2011, S. 569). Die *Klickprototypen* werden dazu bereits in ersten Studien unter Nutzung einfacher Fahrsimulatoren durch Entwickler untersucht (Bubb 2015, S. 586). Zur Bedienung werden hier zumeist Tastatur, Maus und Touch-Devices eingesetzt, die Anzeigen werden auf konventionellen PC-Bildschirmen dargestellt. Exemplarisch ist ein derartiges Setup in Abbildung 41 (Links) dargestellt.

Anschließend werden mit computerstützen Modellierungstools, beispielsweise den in Kapitel 3.3.4 beschriebenen Anzeigen Prototyping (AP) Tools, *digitalen Anzeigeinhalte* erstellt **(U3)** (Response Consortium 2009, S. 22–23; Bubb 2015, S. 586). Die Entwicklungsaktivitäten beinhalten die Erstellung die Aufteilung der MMS-Funktionen auf den Fahrer, die Elektrik/Elektronik-Hardware und die Software, die Ausdetaillierung der System-Stati und der Fahrer-FAS-Interaktionen sowie die detaillierte zeitliche Abstimmung der Anzeige- und Bedienvorgänge. Diese Prototypen werden wiederrum in informellen Reviews und Inspektionen durch Experten beurteilt. In dieser Stufe kommen auch erste Fahrsimulatoren im Test zum Einsatz**.**

Im weiteren Vorgehen wird das UX Design in Anzeige-Softwarecode **(U4)** implementiert und iterativ bis zur Serienreife weiterentwickelt. Dieser Softwarecode stellt die in Kapitel 3.1 beschriebenen, vordefinierten digitalen Anzeigeinhalte bereit. Parallel findet die Entwicklung des Softwarecodes zur Auswertung und Ansteuerung der anzeigen und Bedienelemente statt.

Integration und Test der anthropometrischen und ergonomischen Kriterien

Der *MMS Basisentwurf* umfasst auch das erste physische Layout der Anzeigen und Bedienelemente sowie deren Einbindung ins Fahrzeugcockpit **(M1)** (Response Consortium 2009, S. 18; Bubb 2015, S. 586). Auch hier werden Inspektionen und Schreibtischtests durch Entwickler mit dem Ziel durchgeführt, Fehler in Entwurf oder Konzept aufzufinden (Harvey et al. 2011, S. 568). Zur Evaluation der anthropometrischen Kriterien werden *3D CAD-Modelle* der Anzeigen und Bedienelemente erstellt und in erste *3D CAD-Modelle* oder *3D DMU-Modelle* des Fahrzeugcockpits aus dem automobilen Produktentwicklungsprozess eingebunden **(M2)** (Bubb 2015, S. 584). Für die Ermittlung der Sichtbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit werden an diesen Modellen virtuelle Geometrieanalysen entsprechend der Ausführung aus Kapitel 3.3.1 durchgeführt. Dabei werden virtuelle Menschmodelle zur Analyse der Sicht- und Erreichbarkeit der Anzeigen und Bedienelemente durch den Fahrer eingesetzt (Bubb 2015, S. 401, 2015, S. 419). Zur Beurteilung der Anthropometrie und Ergonomie durch den realen Menschen werden anschließend Geometrietest durchgeführt **(M3)** (Bubb 2015, S. 586). Zumeist werden dazu mit Rapid Prototyping Verfahren hergestellte *physische Attrappen* der Anzeigen und Bedienelemente hergestellt und in statischen Sitzkisten eingebaut. Aber auch Tests in Virtual Reality Umgebungen, bei denen wie in Kapitel 3.3.1 ausgeführt 3D CAD-*Modelle* oder *3D DMU-Modelle* stereoskopisch visualisiert werden, kommen hier zum Einsatz (Bubb 2015, S. 593).

Gekoppelter Test von MMS Prototypen

Für den gekoppelten Test werden die *digitalen Anzeigeinhalte* auf *Rapid Prototyping Elektronik* der Anzeigen und Bedienelemente aufgespielt **(U3+E3+M3).** Diese *hybriden MMS Prototypen*, bestehend aus Software und Hardware-Elementen, werden anschließend entsprechend der anthropometrischen und ergonomischen Vorgaben des 3D CAD-Modells in statische Sitzkisten integriert. Es folgen die Tests durch menschliche Prüfer in Geometrieanalysen hinsichtlich Ergonomie und Anthropometrie sowie in Mensch-Maschine-Konzeptsimulationen hinsichtlich User Experience Design (Harvey et al. 2011, S. 570). In diesen gekoppelten Tests werden sowohl geometrische Untersuchungen als auch User Experience Untersuchungen durchgeführt. Als Testumgebung werden Sitzkisten sowie Fahrsimulatoren eingesetzt. In der weiteren Detaillierung wird Anzeige-Softwarecode auf seriennahe Anzeige-Elektronik implementiert **(U4+E4+M3).** Diese gekoppelte Prototypen der Mensch-Maschine Schnittstelle werden in weiteren Mensch-Maschine-Konzeptsimulationen auch erstmals in Testfahrzeugen getestet (Bubb 2015, S. 586). Diese Fahrzeuge werden auch als *HMI-Konzept-Erlebnis-Fahrzeuge* bezeichnet. Es werden zumeist alte Fahrzeuge eingesetzt, in die die neuen, seriennahen Anzeigen und Bedienelementen eingebaut sind. Mit diesen werden Nutzertests im Straßenverkehr zur Prüfung der korrekten funktionale Performance und Einbindung der technischen Sicherheitsanforderungen durchgeführt (ISO 26262-4, S. 23–25; Hartfiel et al. 2018, S. 660). Hier werden neben den bisherigen Daten auch erstmalig Fahrdaten erhoben und evaluiert (Harvey et al. 2011, S. 570–571). Wie den Ausführungen zur MMS-Konzeptsimulation in Kapitel 3.3.4 zu entnehmen ist, sind weiterhin nur MMS-Funktionen, jedoch keine Funktionen des mechatronischen Regelsystems implementiert. Entsprechend können nur MMS-interne Reaktionen auf Bedieneingaben, beispielsweise Reaktionen eines Touchscreens auf eine Eingabe, getestet werden. In dieser Phase wird oft auf die Wizard-of-Oz Methode zur Simulation der Funktionen des mechatronischen Regelsystems, insbesondere der Reaktion der Steuerung, zurückgegriffen (Hartfiel et al. 2018, S. 660).

Auch mit der Mensch-Maschine Schnittstelle können bereits einzelne Beherrschbarkeits-Kriterien während der Teilsystem-Entwicklung geprüft werden. So werden die Kriterien der Wahrnehmbarkeit von Systemanzeigen (Kriterien-Gruppe 4) mittels *Mensch-Maschine Konzeptsimulation* geprüft (Response Consortium 2009, A59-A61). Dabei werden verschiedene Ausbaustufen der MMS Prototypen zunächst in statischen *Sitzkisten* integriert und getestet. Anschließend in dynamischen Test im *Fahrsimulator* oder im *MMS Konzeptfahrzeug*. Der Test dieser Kriterien auf Teilsystem-Ebene kann den Testverfahren, welche die gekoppelten Prototypen (U3+E3+M3) oder (U4+E4+M3) nutzen, zugeordnet werden.

Tabelle 12 fasst die dargestellten Modelle und Prototypen und das jeweils eingesetzte Testverfahren zusammen. **Abbildung 54** verortet das Vorgehen zur Integration und Test der anthropometrischen und ergonomischen Gestaltungsmerkmale sowie des User Experience Designs im Teilsystem-Entwicklungsprozess der MMS.

Tabelle 12: Modelle, Prototypen und Testverfahren im Test der Mensch-Maschine Schnittstelle

	Modell/Prototyp	**Testverfahren**
U1	MMS Basisentwurf	Schreibtischtest, Inspektion
U2	Klick- und Papierprototypen	Inspektion, Reviews
U3	Digitale Anzeigeinhalte im AP Tool	Inspektion, Reviews
U4	Anzeige-Softwarecode der digitalen Anzeigeinhalte und Software zur Ansteuerung/ Auswertung der MMS	Inspektion, Reviews
M1	MMS Basisentwurf	Schreibtischtest, Inspektion
M2	3D CAD Modell	Virtuelle Geometrieanalyse
M3	physische Attrappen der MMS, eingebaut in statischer Sitzkiste **oder** 3D CAD/DMU-Modell in VR Umgebung visualisiert	Geometrieanalyse in Sitzkiste, Fahrsimulator oder Virtual Reality Umgebung
UM1	Digitale Anzeigeinhalte implementiert auf Rapid Prototyping Elektronik, nach Vorgabe des 3D CAD-Modells gestaltet und verbaut	Gekoppelte Mensch-Maschine-Konzeptsimulation und Geometrieanalyse, in Sitzkiste oder Fahrsimulator
UM2	Seriennahe Software der digitalen Anzeigeinhalte, implementiert auf seriennahen Anzeigen und Bedienelementen, nach Vorgabe des 3D CAD-Modells gestaltet und verbaut	Gekoppelte Mensch-Maschine-Konzeptsimulation und Geometrieanalyse, in Fahrsimulator oder HMI-Konzept-Erlebnis-Fahrzeug

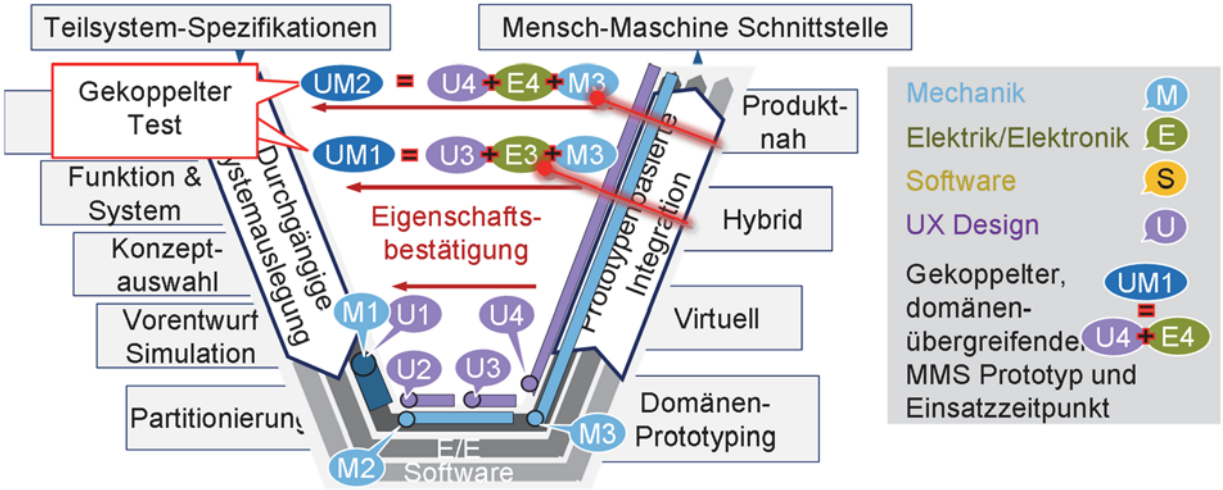


Abbildung 54: Test der Mensch-Maschine Schnittstelle und deren Interaktionen im Regelkreis der Fahrer-FAS Interaktion

Da das MBSE Prozessmodell keine explizite Entwicklung von Design-Prototypen in der „Domäne“ des User Experience (UX) Design vorsieht, ist diese in der Abbildung außerhalb der drei Domänen verortet. Der *MMS Basisentwurf* stellt, wie zuvor beschrieben, die Schnittstelle zur Domäne der Mechanik dar: Es wird die Fahrer-Fahrzeug Interaktion sowie das physische Layout der Anzeigen und Bedienelemente sowie deren Einbindung ins Fahrzeugcockpit beschrieben. Wie beschrieben ist, findet die erstmalige prototypenbasierte Integration mit hybriden Prototypen (U3+E3+M3) statt. Erst im darauffolgenden Schritt der „Produktnahen“ prototypenbasierte Integration erfolgt der Test seriennaher Prototypen (U4+E4+M3). Es kommt kein virtueller integrierten MMS Prototyp zum Einsatz.

Das folgende Kapitel dient der Beschreibung der Integration der beiden Teilsysteme zum FAS und dessen gleichzeitigem Test im Regelkreis der Mechatronik sowie dem Regelkreis der Fahrer-FAS-Interaktion.

3.4.5 Integration und Test von Fahrerassistenzsystemen

Abbildung 55 (Links) dient der Verortung des Systems FAS in der FAS Systemdarstellung. **Abbildung 55 (Rechts)** zeigt darüber hinaus die Verortung im durch Abbildung 50 beschriebenen FAS Entwicklungsprozess.

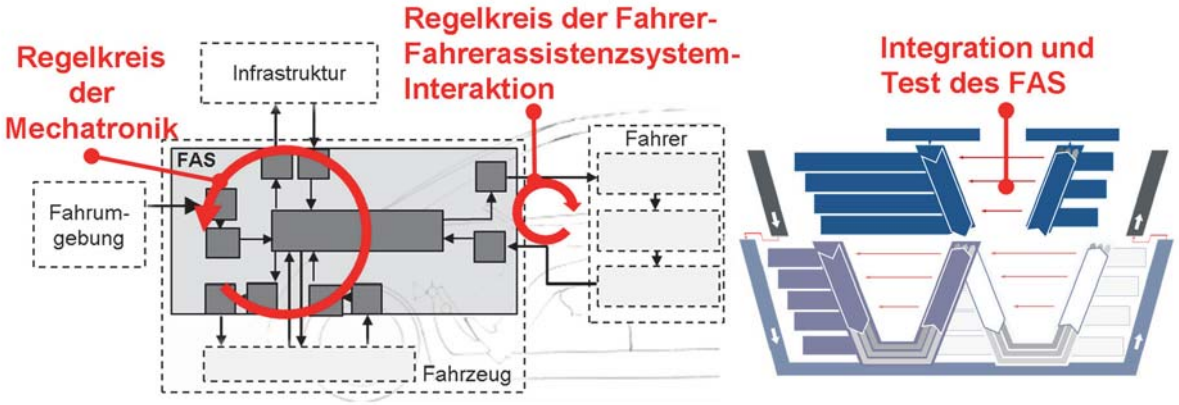


Abbildung 55: Verortung des Fahrerassistenzsystems im FAS Systemschaubild sowie dessen Integration und Test im FAS Entwicklungsprozess

Die im Text verwendeten Kürzel (F) und (B) verweisen auf **Abbildung 56**, welche das Vorgehen grafisch zusammenfasst.

Zunächst werden an der *Funktions*- sowie der *Systemarchitektur* **(F1)** Inspektionstest und Walkthroughs zur Prüfung der vollständigen und korrekten Einbindung der Sicherheitsanforderungen durch Experten aus dem Entwicklungsprozess durchgeführt (ISO 26262-4, S. 15; ISO 26262-4, S. 31).

Erste Tests des gekoppelten FAS, bestehend aus den Teilsystem-Prototypen des mechatronischen Regelsystems sowie der Mensch-Maschine Schnittstelle, finden in Laborumgebungen statt (ISO 26262-4, S. 32). Es wird zumeist Rapid Prototyping Steuergeräte-Elektronik mit implementiertem Software-Code mit seriennahen Anzeigen und Bedienelementen gekoppelt **(F2).** Mit diesen Setup werden zunächst statische Tests der Robustheit und Arbeit unter externem Stress sowie dynamischen Funktionstests, Falsch-Eingabe-Tests oder Performance-Tests durchgeführt (ISO 26262-4, S. 19–23). In Hardware-in-the-Loop Tests wird das System anschließend im Kontext eines virtuellen Fahrermodells sowie eines virtuellen Umgebungsmodells getestet (ISO 26262-4, S. 19–23). In Ergänzung zum Hardware-in-the-Loop Setup des mechatronischen Regelsystems werden erstmals auch das anforderungskonforme Verhalten und Schnittstellen der Anzeige- und Bedienelektronik berücksichtigt. Ein Test der Fahrer-FAS-Interaktion findet jedoch noch nicht statt. Zum erstmaligen Test dieser Interaktion – und damit dem Test des FAS in beiden Regelkreisen der Fahrerassistenzsystems – setzen Fahrzeughersteller zumeist auf fahrzeugbasierte Tests wie den *Feld-Tests* (ISO 26262-4, S. 23–25). In diesem wird das FAS auf abgesperrtem Testgelände durch Experten auf Robustheit, Funktionsfähigkeit von Diagnose-Systemen, Einhaltung der Sicherheitsanforderungen sowie funktionale Performance geprüft. Der Test findet zu einem Zeitpunkt, in dem die Fahrzeugprototypen „Vorserien-Freigabe-Fahrzeug“ (VFF) beziehungsweise „Produktionsvorbereitungsserie“ (PVS) erstmals zur Verfügung stehen. Beim Fahrzeughersteller VW stellt diese Integration die erste Testmöglichkeit in beiden Regelkreisen dar und wird etwa 12 Monate vor SOP durchgeführt (Hartfiel et al. 2018, S. 660). Einige Hersteller setzen zum Test dieser System-Ausbaustufe auch Fahrsimulatoren ein. Diese koppeln den Prototypen im Hardware-in-the-Loop Setup mit Sicht-, Bewegungs- und Sound-Simulationen sowie einer Mensch-Maschine Schnittstelle und ermöglichen so den Test der Interaktion zwischen Fahrer und FAS. Ein solches Setup wird beispielsweis durch den Fahrzeughersteller BMW genutzt (Wisselmann et al. 2014, S. 7; Deicke 2018, S. 36). Es folgt der *Langzeittest* durch Experten und die Prüfung auf korrekte Implementierung der funktionalen Sicherheits-Anforderungen. Es wird auch in diesem Stand weiterhin prototypische Hard- und Software eingesetzt: Funktionen sind jedoch noch nicht vollständig umgesetzt und Fehler in Anzeige und Bedienlogik treten auf (Hartfiel et al. 2018, S. 660). Parallel werden Hardware-in-the-Loop Tests vor zum Test der Elektrik und Software mit dem Serienstand näherkommenden Systems durchgeführt.

Seriennahe Prototypen des FAS werden anschließend in seriennahe Fahrzeuge wie der Produktionsvorbereitungsserie (PVS) oder der Nullserie (0S) implementiert im Straßenverkehr durch Experten sowie naive Probanden im *Langzeittest* und *Nutzertest im Straßenverkehr* getestet **(F3)** (ISO 26262-4, S. 23–24). Der naive Proband zeichnet sich dadurch aus, das nicht mehr Erfahrung oder Vorwissen über das System vorhanden ist, als es der spätere Kunde hat (Response Consortium 2009, S. 15). Ziel dieser Test sind beispielsweise die Messung von Effekten, die die sich erst nach längerer Zeit oder Gewöhnung einstellen. Oder der Erprobung der Nutz- und Bedienbarkeit durch im Alltagsverkehr (ISO 26262-4, S. 23–24).

Zum vollständigen Test der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Beherrschbarkeits-Kriterien werden FAS in fahrzeugbasierten Testverfahren wie dem *Feldtest* auf abgesperrtem Testgelände sowie in *Langzeittest* und *Nutzertest im Straßenverkehr* im öffentlichen Straßenverkehr geprüft (Response Consortium 2009, A61-A65). Teilweise kommen auch Fahrsimulatoren, wie der zuvor beschrieben bei BMW eingesetzte Fahrsimulator, zum Einsatz. Die Tests der ersten vollständigen FAS Prototypen der Stufe F2 werden durch Experten in der Rolle des Fahrers durchgeführt. In Tests mit späteren FAS Prototypen der Stufe F3, welche dem Serienstand näher sind, übernehmen sowohl Experten als auch naive Probanden die Rolle des Fahrers.

Tabelle 13 fasst die dargestellten Modelle und Prototypen und das jeweils eingesetzte Testverfahren zusammen. **Abbildung 56** verortet das beschriebene Vorgehen der Integration und des Test im Systementwicklungsprozess von FAS.

Tabelle 13: Modelle, Prototypen und Testverfahren im Test des Fahrerassistenzsystems

	Modell/Prototyp	**Testverfahren**
F1	Funktions- und Systemarchitektur	Walkthrough, Inspektion
F2	Rapid Prototyping Steuergeräte-Elektronik mit implementiertem Software-Code gekoppelt mit seriennahen Anzeigen und Bedienelementen	Funktionstest, Falsch- Eingabe Test, Robustheit, Performance, Hardware-in-the-Loop Test
		Erster Fahrzeugtest: Feldtest & Langzeittest durch Experten im Testfahrzeug VFF/PVS, Fahrsimulation mit Hardware-in-the-Loop Setup
F3	Seriennahe Steuergeräte mit implementiertem seriennahen Software-Code und seriennahen Anzeigen und Bedienelementen	Langzeittest und Nutzertest im Straßenverkehr durch Experten und naive Probanden im öffentlichen Straßenverkehr im Testfahrzeug PVS/0S

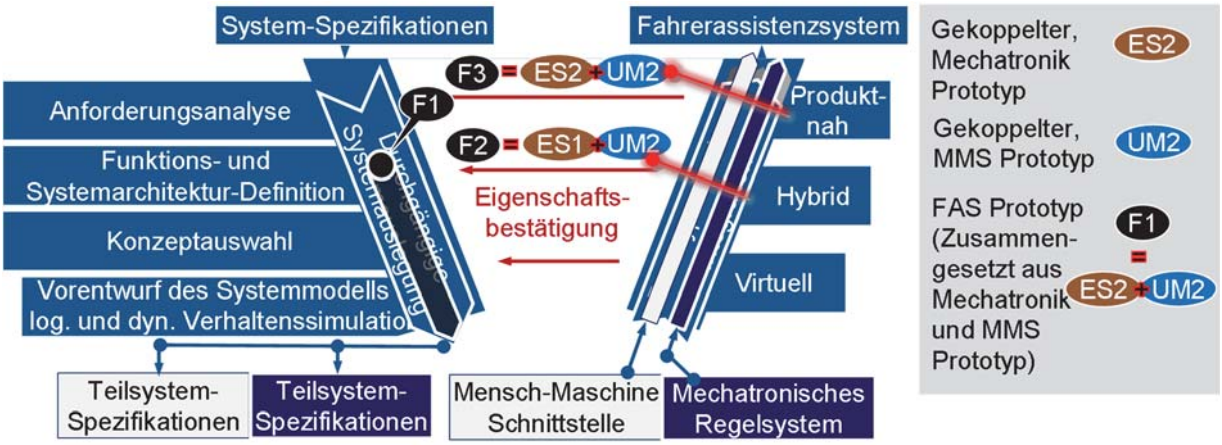


Abbildung 56: Integrierter Test des FAS und dessen Interaktionen im mechatronischen Regelkreis sowie dem Regelkreis der Fahrer-FAS-Interaktion

Die initialen Inspektionstests und Walkthroughs an Funktions- und Systemarchitektur dienen der durchgängigen Systemauslegung und sind somit auf dem linken Ast des V-Modells verortet. Die prototypenbasierten Integration auf dem rechten Astes des

V-Modells dient der Zusammenführung der Teilsystem-Prototypen zum Nachweis der erfolgreichen Integration, der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen sowie der funktionalen Sicherheit (ISO 26262-4, S. 4). Es kommt kein virtueller FAS Prototyp zum Einsatz, die erste Integration koppelt hybride Teilsystem-Prototypen zum hybriden System-Prototyp. Diese Kopplung findet mit steigender Reife der Teilsysteme bis hin zum seriennahen Teilsystem statt: Es wird also ein „Produktnaher“ FAS Prototyp erstellt und getestet. In der übergeordneten Produkt-Ebene der Fahrzeug-Entwicklung finden anschließend fahrzeugbasierte Tests wie der *Feldtest*, der *Langzeittest* und *Nutzertest im Straßenverkehr* statt. Auch diese dienen dem Nachweis der Robustheit, Funktionsfähigkeit oder der Nutz- und Bedienbarkeit, allerdings auf Produktebene. Der Testfokus liegt nicht auf einem Einzelsystem wie dem FAS, sondern auf der ganzheitlichen Betrachtung des Fahrzeugs und dem Zusammenspiel von dessen Teilsystemen.

Kapitel 4

Analyse des Standes der Technik

It is easy to predict an automobile in 1880, but it is very hard to predict a traffic problem.

(Asimov 1977)

4 Analyse des Standes der Technik

Wie in der initialen Zielsetzung der Arbeit in Kapitel 1.2 ausgeführt, soll das heutige Vorgehen zum Test und Nachweis der Beherrschbarkeit von FAS aus der **Analyse des Standes der Technik** herausgearbeitet werden. Es sollen die damit einhergehenden Herausforderungen für den heutigen wie auch zukünftigen Test und Nachweis der Beherrschbarkeit aufgezeigt sowie Potentiale neuartiger Ansätze, die einen früheren Test und Nachweis der Beherrschbarkeit ermöglichen, beschrieben werden.

Zunächst werden die Erkenntnisse des Stand der Technik zum heutigen Test und Nachweis der Beherrschbarkeit in Kapitel 4.1 zusammengefasst. Es folgt eine Analyse der Herausforderungen, die sich aus dem heutigen Vorgehen zum Test und Nachweis der Beherrschbarkeit für die Entwicklung heutiger wie auch zukünftiger FAS ergeben. Fahrsimulatoren ermöglichen bereits heute einen frühen Test von Funktionen, Kapitel 4.2 beschreibt den heutigen Einsatz dieses Werkzeuges. Auf Basis dieser Ausführungen skizziert Kapitel 4.3 mögliche Lösungsansätze des früheren Test und Nachweis der Beherrschbarkeit und diskutiert die Potentiale, die diese zur Lösung der Zielstellung der Arbeit bieten. Die Ergebnisse dieser Ausführungen bilden die Grundlage für die abschließende Formulierung der **zwei Forschungsfragen F I. und F II.** dieser Arbeit. **Abbildung 57** zeigt die Verortung des Kapitels in den Kontext der Arbeit.

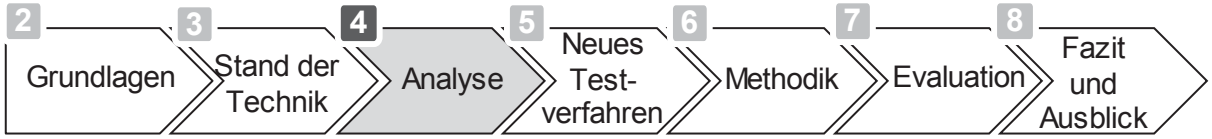


Abbildung 57: Verortung des Kapitels „4. Analyse des Standes der Technik“ in der Arbeit

4.1 Heutiges Vorgehen im Test der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen

Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, kann der Nachweis der Beherrschbarkeit eines FAS durch **Tests erbracht werden, in denen Experten oder naive Probanden die Rolle des Fahrers** übernehmen. Der Nachweis kann aber auch durch **interdisziplinäre Experten-Panels** erfolgen. Diese bewerten die Ergebnisse und Prototypen der FAS Entwicklung auf Basis von Analogien, Literaturangaben sowie Testergebnissen aus der Entwicklung. Im Folgenden soll zunächst diese zweite Möglichkeit im Hinblick auf ihre Nutzbarkeit für den Nachweis der Beherrschbarkeit von heutigen, speziell aber auch zukünftigen FAS analysiert werden.

Analyse: Nachweis der Beherrschbarkeit durch interdisziplinäre Experten-Panels

Wie in Kapitel 3.3.3 ausgeführt, werden die Prototypen des mechatronischen Regelsystems in CASE-Tools modelliert oder direkt in Softwarecode umgesetzt. Diese Darstellungsformen und die Plausibilität der durchgeführten Modellierung sind **ohne Expertenwissen oft nur schwer verständlich** (Broy 2010, S. 109). Auch ist die Testauswertung von X-in-the-Loop Tests, die zumeist in Form von Kennzahlen und Diagrammen korrelierten Messergebnissen besteht, nicht für jede Zielgruppe verständlich (Rabe et al. 2008, S. 169, 2008, S. 173). Ein Verständnis des entwickelten Artefakts und eine darauf basierende fundierte Entscheidungsfindung, insbesondere hinsichtlich der Einhaltung von einschlägigen Sicherheitsstandards, ist somit schwierig und bis

komplett unmöglich für den nicht am spezifischen Entwicklungsprozess beteiligte Prüfer (nach Broy 2010, S. 109; Balci 1998, S. 401). Die mangelhafte Verständlichkeit der Entwicklungsartefakte sowie von Ergebnissen der mit Ihnen durchgeführten Tests limitiert insbesondere die Fähigkeit des interdisziplinären Experten-Panels, den Nachweis der Beherrschbarkeit eines FAS auf Basis informeller Testverfahren wie der Inspektion oder der Begutachtung zu erbringen.

Die in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Entwicklungstrends wie das autonome Fahren, die Sensorfusion, funktionale Rechencluster oder vernetzte Systeme werden die Komplexität zukünftige FAS weiter erhöhen. Gestaltungstrends der Mensch-Maschine Schnittstelle, wie die Einführung multimodaler oder mehrstufiger Warnsysteme, eine zunehmende Individualisierung und Variantenvielfalt, die Integration von Konsumelektronik oder Technologieinnovationen wie Gestensteuerung oder Head-Up Displays sorgen dazu für eine höhere Komplexität der MMS des FAS. Auch die Absicherung von im FAS implementierter, künstlicher Intelligenz, welche eine Unterstützung für dieses Gesamtsystem bereitstellen kann, erfordert ganz neue Maßnahmen der Qualitätssicherung. So muss zukünftig auch unstetiges, teilweise unvorhersehbares Verhalten des FAS resultierend aus Lernprozessen berücksichtigt werden können (Rumpe 2006, S. 474–479; Henzel et al. 2017, S. 136). In allen Fällen sind informelle Testverfahren die auf Expertenwissen und -einschätzungen basieren, immer weniger für eine Erbringung der erforderlichen Beherrschbarkeits-Nachweise geeignet.

Insbesondere gilt dies für bedingt bis hoch autonome FAS ab SAE Level 3. Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, sind hinsichtlich der wechselseitigen Übergabe zwischen Fahrer und System weiterhin wesentliche Aspekte nicht abschließend geklärt: Es sind zwingend Tests erforderlich. In FAS ab SAE Level 3 steht der Fahrer darüber hinaus nicht mehr in jedem Fall als Rückfallebene zur Verfügung: Das FAS übernimmt in Teilen oder sogar vollständig die Kontrolle über die Fahraufgabe. Der Automobilhersteller muss daher die Verantwortung über das FAS und dessen korrekte Funktion übernehmen und **haftet** entsprechend auch für **auf Fehler im FAS zurückzuführende Sach- und Personenschäden**. Die Methoden zur Absicherung der Fahrfunktionen sowie die unterstützenden Werkzeuge müssen einen hundertprozentigen Nachweis der Robustheit und Fehlerfreiheit der autonomen Fahrfunktion vor Kundeneinsatz ermöglichen (Riener 2017, S. 198; Niederée und Vollrath 2005, S. 202; Hartfiel et al. 2018, S. 660). Darüber hinaus werden sich die Referenzwerte des Gesetzgebers, welche die Auslegungsgrenzen der FAS für das Unfallrisiko festlegen, weiter verringern (Winner et al. 2012, S. 663). Zudem wird es gesetzliche Verpflichtungen geben, Fahrerassistenzfunktionen in zukünftige Fahrzeuge einzubauen. So hat die EU Kommission verkündet, Notbremssysteme zum Schutz von Fahrradfahrern ab 2028 verpflichtend zu machen (Seiniger et al. 2017, S. 329). Diese Maßnahmen werden zu einer **Erhöhung der Komplexität der Testszenarien**, in denen zukünftige FAS sicher funktionieren müssen, führen (Schuldt et al. 2014, S. 170; Seiniger et al. 2017, S. 328–329). Die Absicherung von FAS, die sich auf innerstädtische Szenarien fokussieren, ist weit aufwendiger als die Absicherung von FAS für Autobahnen oder Schnellstraßen mit ihren weit geringeren Einflussparametern und Variationen (Schuldt et al. 2014, S. 170). **Abbildung 58** visualisiert diese Zusammenhänge. Die Testaufwände sind durch die Bildquelle nur qualitativ dargestellt. Durch statistische Überlegungen können Testaufwände von bis zu 100 Millionen Kilometer abgeschätzt werden (Winner et al. 2012, S. 663).

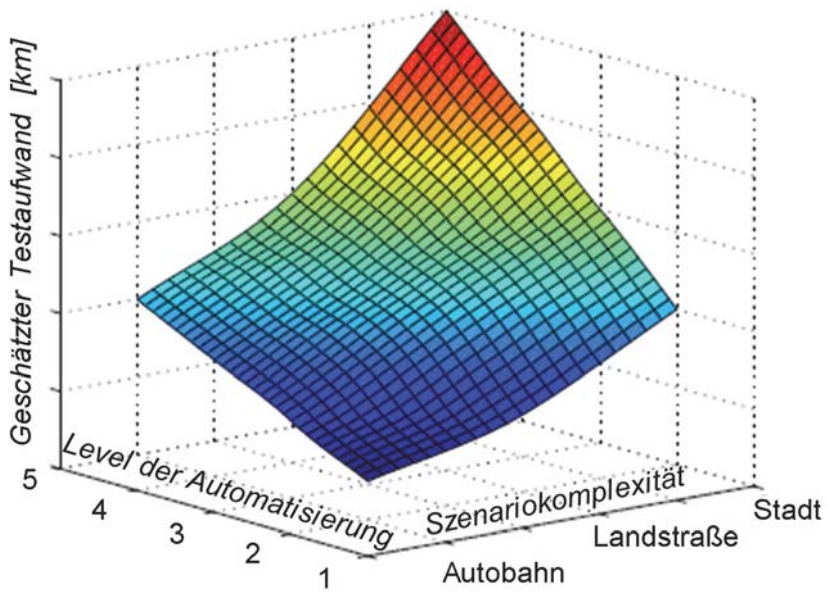


Abbildung 58: Schätzung des Testaufwands für verschiedene Automatisierungsstufen und Fahrszenarien (Schuldt et al. 2014, S. 170)

Entsprechend kann geschlussfolgert werden:

Der Nachweis durch interdisziplinäre Fachexperten wird insbesondere bei zukünftigen FAS durch Faktoren wie steigender Systemkomplexität und steigender Komplexität der Szenarien, in denen die FAS ihre Funktion erbringen müssen, nicht mehr möglich sein. Es wird damit unmöglich, FAS vollständig und ganzheitlich nur auf Basis von Erfahrungswissen zu verstehen. Dazu kommt die Frage der Haftung: Ein Automobilhersteller, der für die aus den Fehlern des FAS verursachten Sach- und Personenschäden haftet, benötigt formale Nachweise zur Entlastung. Expertenbewertungen, die auf informellen Testverfahren beruhen, können diese nicht erbringen.

Es kann also geschlussfolgert werden:

Der Nachweis der Beherrschbarkeit zukünftiger FAS wird zukünftig immer stärker durch Tests erbracht werden müssen, in denen Experten oder naive Probanden die Prototypen des FAS in der Rolle des Fahrers testen und bewerten.

Die nachfolgenden Ausführungen dienen der Analyse derartiger Ansätze des Standes der Technik.

Analyse: Nachweis der Beherrschbarkeit durch Test von FAS Prototypen

Wie in Kapitel 3.4.5 beschrieben, werden einzelne Beherrschbarkeits-Kriterien bereits während der Teilsystem-Entwicklung getestet. So werden Teilsystem-Prototypen des mechatronischen Regelsystems in *Hardware-in-the-Loop Tests* auf die Fähigkeit geprüft, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden. Zu diesem Zweck wird Software-Code des mechatronischen Regelsystems auf Rapid Prototyping Steuergeräte-Elektronik implementiert, die Fahrumgebung wie auch der Fahrer werden durch virtuelle Modelle simuliert. Teilsystem-Prototypen der MMS werden mittels *Mensch-Maschine Konzeptsimulation* hinsichtlich Beherrschbarkeits-Kriterien wie beispielsweise der Wahrnehmbarkeit von Systemanzeigen geprüft. Zum Test werden funktionale, im Anzeigen-Prototyping Tool erstellte, Anzeige-Prototypen auf Rapid Prototyping Elektronik implementiert. Die so generierten MMS Prototypen werden entspre-

chend der anthropometrischen und ergonomischen Vorgaben des 3D Modells in statische Sitzkisten, Virtual Reality Umgebungen oder Testfahrzeuge integriert und durch Experten und naive Probanden getestet.

Für den erstmaligen Test der Beherrschbarkeit des vollständigen FAS werden zumeist fahrzeugbasierte Testverfahren wie der *Feldtest*, der *Langzeittest* oder der *Nutzertest im Straßenverkehr* in Testfahrzeugen durchgeführt. Auch Fahrsimulatoren kommen zum Einsatz. Die erstmals dazu verwendeten FAS Prototypen setzen sich wie folgt zusammen: Software-Code des mechatronischen Regelsystems wird auf Rapid Prototyping Steuergeräte-Elektronik implementiert und mit seriennahen Anzeigen und Bedienelementen gekoppelt. Im Test übernehmen Experten aus dem Entwicklungsprozess die Rolle des Fahrers und interagieren mit dem FAS. **Abbildung 59** verortet die ersten Tests der Beherrschbarkeits-Kriterien der Mechatronik sowie der MMS sowie den ersten Beherrschbarkeits-Test des Fahrerassistenzsystems im FAS Entwicklungsprozess.

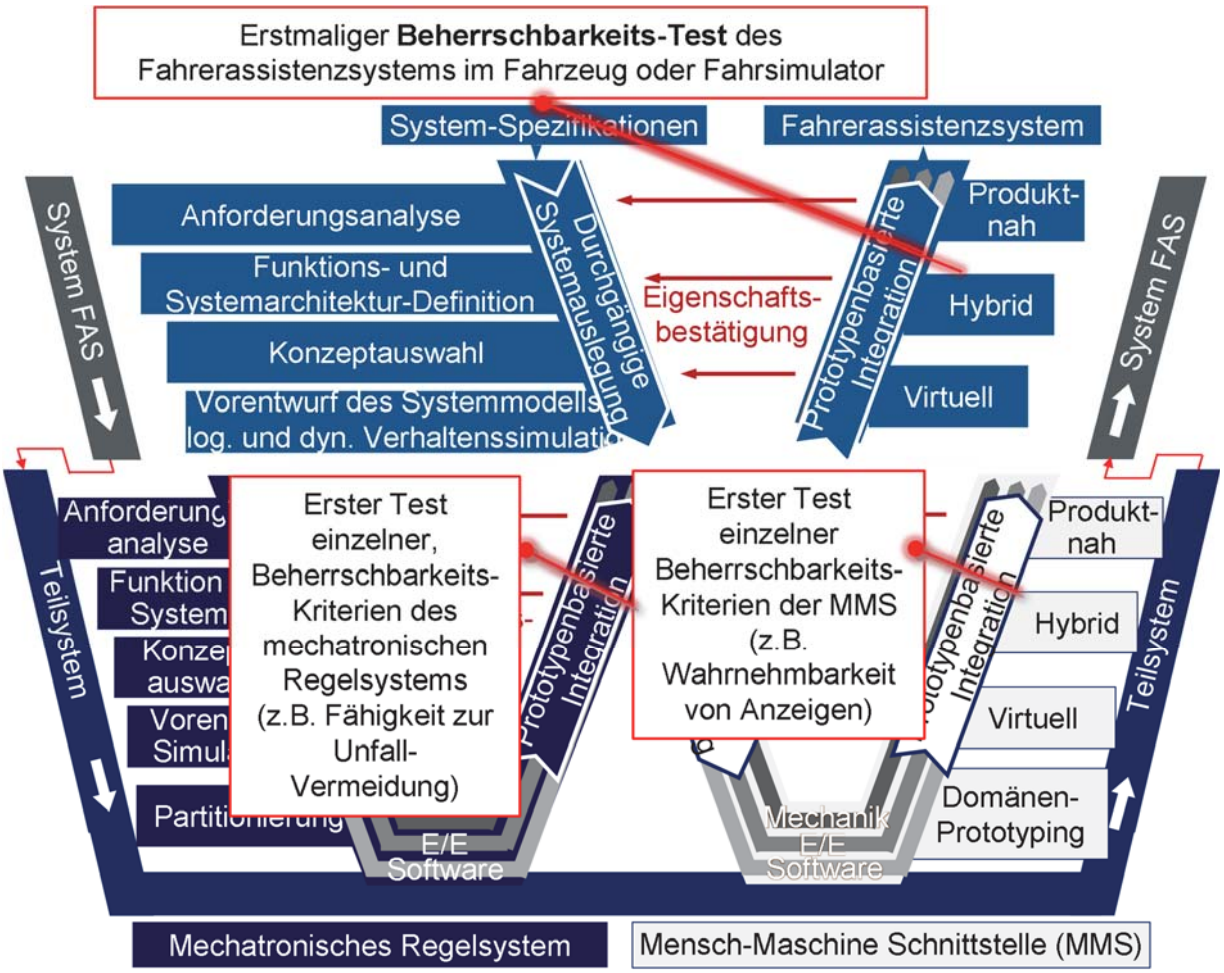


Abbildung 59: Verortung der heutigen Tests zum Nachweis der Beherrschbarkeit im FAS Entwicklungsprozess

Das Vorgehen zum Test der Beherrschbarkeit kann exemplarisch an dem in Kapitel 3.1.4 und 3.4.1 beschriebenen VW Parkassistenzsystems gezeigt werden. **Abbildung 60** zeigt dieses Beispiel.

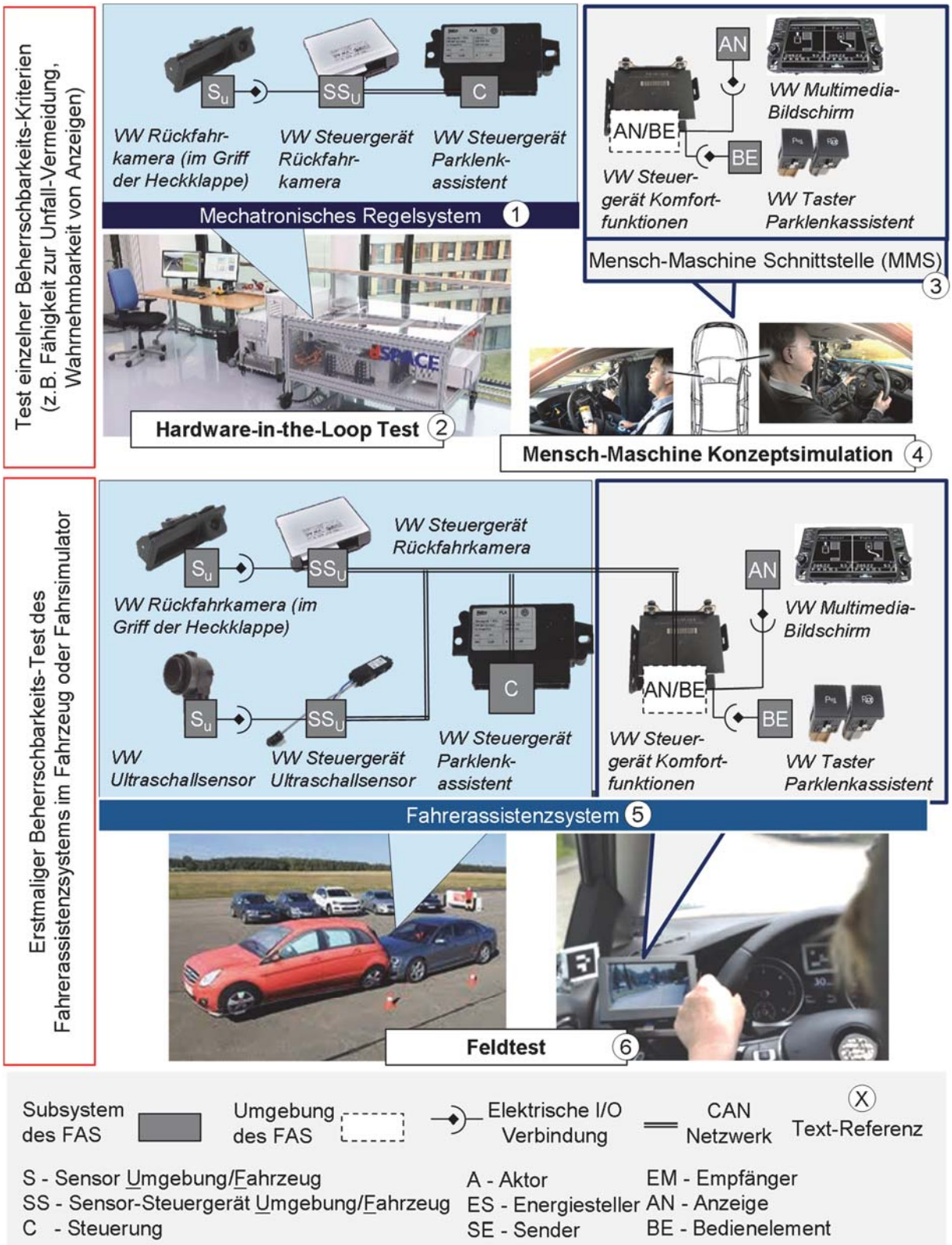


Abbildung 60: Test der Beherrschbarkeit am Beispiel des VW Einpark-Parkassistenzsystems (zusammengestellt aus den Abbildungen 37, 42, 44 und 45)

In der Abbildung ist Folgendes erkennbar: Im *Hardware-in-the-Loop Test* wird das mechatronische Regelsystem (1), bestehend aus der Rückfahrkamera, dem Ultraschallsensor, den zugehörigen Sensor-Steuergeräten sowie dem Steuergerät des Parklenkassistenten, in den Hardware-in-the-Loop Prüfstand (2) integriert und mit dem

virtuellen Fahrzeugmodell gekoppelt. Zur Prüfung der Fähigkeit, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden, wird das virtuelle Fahrzeug durch einen virtuellen Fahrer in verschiedenen Szenarien, in denen Unfallsituationen simuliert werden, durch die virtuelle Fahrumgebung gesteuert. Während des Tests werden Messdaten wie Beschleunigung oder Abstand aufgezeichnet, die im Anschluss an den Test durch den Prüfer ausgewertet werden. Aus verschiedenen Gründen ist der Test der Beherrschbarkeit allein mit X-in-the-Loop Testverfahren, wie dem abgebildeten *Hardware-in-the-Loop Test*, nicht möglich. Zuallererst sind kognitive Modelle des menschlichen Fahrers, die bei in the-Loop Tests die Reaktionen auf Umgebungsreize und die Steuerung des Fahrzeugs definieren, in ihrer Abbildungsqualität des menschlichen Verhaltens eingeschränkt (Hiesgen 2012, S. 71–73; Riener 2017, S. 199; Bubb 2015, S. 230–231). Insbesondere Emotionen, die eine wichtige Rolle für die Akzeptanz des FAS durch den Fahrer spielen, können durch heutige Modelle noch nicht abgebildet werden (Auricht 2014). Heutige X-in-the-Loop Testverfahren haben somit signifikante Schwächen, den nicht-deterministischen Charakter des Gesamtsystems Fahrumgebung, Fahrzeug und Fahrer abzubilden (nach Fischer 2015, S. 37). Darüber hinaus sind derartige Tests stark abhängig von der Abbildungsqualität der verwendeten, synthetisch generierten virtuellen Modelle des Fahrers, des Fahrzeugs und der Fahrumgebung. Die Modellanforderungen an heutige in-the-Loop Maßnahmen zur Qualitätssicherung sind so komplex, dass „eine vollständige Simulation der Realität derzeit noch nicht adäquat möglich ist“ (Rumpe 2006, S. 484). Zudem ist die Validität von Eingangsgrößen virtueller Sensoren stark abhängig von der Kenntnis des Verhaltens der jeweiligen Sensorik, den zugrunde liegenden physikalischen Effekten sowie der Signalverarbeitung durch den modellierenden Entwickler (Fischer 2015, S. 37). Eine hinsichtlich der Sensor-Physik unzureichend modellierte virtuelle Fahrumgebung führt zu fehlerhaften Ergebnissen, welche selbst für Fachexperten nur schwer nachweisbar sind.

Prototypen der Mensch-Maschine Schnittstelle (3) werden in *Mensch-Maschine Konzeptsimulationen*, beispielsweise im dargestellten Wizard-of-Oz Testfahrzeug (4), hinsichtlich ihrer Wahrnehmbarkeit durch den Fahrer getestet. Dazu werden die funktionalen Prototypen der Anzeige auf den bestehenden Bildschirm des Fahrzeugs aufgespielt sowie prototypische Taster installiert. Die Inhalte der Anzeige werden durch den Wizard gesteuert, der Taster sendet bei Aktivierung ein Signal an den Wizard. Sobald der Fahrer die autonome Fahrfunktion über den Taster aktiviert, steuert der Wizard das Fahrzeug mit seinem eigenen Lenkrad in die Parklücke und bremst im Falle eines kritischen Abstandes zum rückwärtigen Fahrzeug. Die prototypischen Teilsysteme werden in ein Testfahrzeug installiert und zum FAS (5) gekoppelt. In Testverfahren wie dem *Feldtest* wird das FAS anschließend durch Experten oder naive Probanden auf abgesperrtem Testgelände (6) hinsichtlich der 107 Beherrschbarkeits-Kriterien geprüft. Wie in Kapitel 4.1 ausgeführt, können mit den Testverfahren der Mensch-Maschine-Schnittstelle, beispielsweise die *Mensch-Maschine Konzeptsimulation,* nur einzelne Kriterien der Beherrschbarkeit getestet werden. Grund ist der fehlende Zusammenhang zwischen Bedieneingaben des Fahrers und der Reaktion des mechatronischen Regelsystems an den Fahrer. Es können nur Beherrschbarkeits-Kriterien geprüft werden, die kein zeitkritisches Feedback des mechatronischen Teilsystems erfordern, beispielsweise die Position oder die zeitliche Gestaltung und Eindeutigkeit der FAS Anzeigen. Denn das erforderliche zeitkritische Feedback kann durch einen menschlichen Wizard nicht zuverlässig und in ausreichender Geschwindigkeit simuliert werden. Daher sind auch funktionale Systemgrenzen des FAS im Test nicht abbildbar,

ein Verständnis der Funktion des Systems und eine darauf basierte fundierte Entscheidungsfindung ist schwierig bis komplett unmöglich (nach Wisselmann et al. 2014, S. 5). Gerade für bedingt und hoch autonome Fahrfunktionen, bei denen eine Übergabe zwischen Fahrer und Fahrzeug stattfindet, ist der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung jedoch eminent wichtig für die Bewertung.

Damit kann zusammengefasst werden:

Der umfassende Test und Nachweis der Beherrschbarkeit eines FAS erfordert zwingend die Zusammenführung der Prototypen des mechatronischen Regelsystems und der Mensch-Maschine Schnittstelle zu einem FAS Prototyp.

Eine Analyse der in Tabelle 10 beschriebenen Beherrschbarkeits-Kriterien zeigt, dass der **vollständige Test aller 107 Beherrschbarkeits-Kriterien nicht möglich** ist mit FAS Prototypen, die auf frühen Software-Prototypen sowie Rapid Prototyping Steuergeräte-Elektronik basieren. Durch die Nutzung von Rapid Prototyping Steuergeräte-Elektronik ist der Test der Fehlerrobustheit des Systems nur sehr eingeschränkt möglich, da viele Fehlertypen mechatronischer Systeme erst durch die Umsetzung in Softwarecode oder im Zusammenspiel von Software und Elektronik auftreten. Ebenso ist der Nachweis von Schutzmaßnahmen gegen externe Manipulationen mit derartigen frühen Prototypen nur sehr eingeschränkt möglich: Hier werden seriennahe Prototypen benötigt. Ein **vollständiger Nachweis der Beherrschbarkeit** erfordert FAS Prototypen, die seriennahen Software-Code, der auf seriennahe Steuergeräte implementiert ist, mit seriennahen Anzeigen und Bedienelementen koppeln. Es werden Testverfahren wie der *Langzeittest* und *Nutzertest im Straßenverkehr* durch Experten im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt. Zum Einsatz kommen seriennahe Testfahrzeuge wie „Produktionsvorbereitungs-Serie“ (PVS) oder „Nullserie“ (0S). Erstmals testen in dieser Phase auch naive Probanden, die nicht am Entwicklungsprozess beteiligt sind. Es kann zusammengefasst werden:

Ohne seriennahe Software- und Elektronik-Prototypen kann der vollständige Test der Beherrschbarkeit nicht durchgeführt werden. Der frühzeitige Test der Beherrschbarkeit eines FAS vor Fertigstellung dieser Prototypen ermöglicht daher nur einen umfangreichen, jedoch keinen vollständigen Test und Nachweis der Beherrschbarkeit.

Sowohl der vollständige wie auch der umfangreiche Test der Beherrschbarkeit werden zumeist mit Fahrzeugen durchgeführt. Die Kernherausforderung von Testverfahren wie dem *Feldtest* resultiert aus dem Einsatz dieser Fahrzeuge: Diese Fahrzeug-Prototypen zeichnen sich durch eine sehr kostenintensive und zeitaufwändige Herstellung und Änderbarkeit aus (Hartfiel et al. 2018, S. 660; Winner et al. 2012, S. 449; Zhou et al. 2016, S. 2; Zander-Nowicka 2008, S. 26; Rumpe 2006, S. 474). Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, basieren die Fahrzeugprototypen Produktionsvorbereitungsserie (PVS) und Nullserie (0S) auf Serienteilen. Deren Herstellung erfordert den Aufbau einer komplexen Kette an Maschinen und Prozessen. Die Einzelfertigung aus Prototypen-Bauteilen hergestellte Vorserien-Freigabe-Fahrzeuge (VFF) zeichnet sich hingegen insbesondere durch sehr hohe manuelle Aufwände der Teilebeschaffung beziehungsweise deren manueller Herstellung aus (Stadler, S. 68). Ein frühzeitiger Test, bei dem Änderungen einfach umgesetzt werden können und idealerweise noch in Form von Anforderungen wieder in den Entwicklungsprozess zurückgespielt werden können, ist wegen der hohen Reife der Fahrzeuge nur schwer möglich (Broy 2010, S. 87; Hartfiel et al. 2018, S. 656). Zudem existieren Limitationen hinsichtlich der Testbarkeit mit diesen Testfahrzeugen, denn die Fahrt in realem Straßenverkehr ist aus rechtlichen Gründen – die FAS sind meist nur prototypisch implementiert und beispielsweise noch nicht zertifiziert – sowie aus Gründen der Geheimhaltung kaum möglich (Hartfiel et al. 2018,

S. 660; Rüger et al. 2014, S. 138). Auf der anderen Seite können oftmals die erforderlichen kritischen Situationen des Straßenverkehrs auf abgesperrten Testgeländen nicht simuliert werden (Hartfiel et al. 2018, S. 660; Zhou et al. 2016, S. 2).

Wie beschrieben wird die Entwicklung zukünftiger, autonomer und teilautonomer FAS jedoch einen vollständigen Nachweis der Beherrschbarkeit erfordern. Sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus zeitlicher Perspektive wäre dies von Automobilherstellern nicht zu bewältigen, würde ausschließlich auf reale Fahrzeugprototypen zurückgegriffen (Gerke und Roggero 2016, S. 28; Glauner et al. 2014, S. 159; Winner et al. 2012, S. 663; Zhou et al. 2016, S. 2). Es kann damit geschlussfolgert werden:

Die zum vollständigen Nachweis der Beherrschbarkeit erforderlichen Testumfänge in der Entwicklung bedingt bis hoch autonomer FAS sind mit Fahrzeugtests aufgrund der Kosten der Testfahrzeuge, deren Einschränkungen der Nutzbarkeit sowie der erforderliche Vorbereitungs- und Aufbauzeit zukünftig nicht mehr erbringbar. Der zukünftige Test und Nachweis der Beherrschbarkeit sollte daher so weit wie möglich ohne Testfahrzeuge erfolgen.

Wie in Kapitel 3.4.5 beschrieben, bildet der **Einsatz von Fahrsimulatoren** eine Möglichkeit, komplette FAS ohne Einsatz von Testfahrzeugen zu testen.

Aber auch Tests die auf Fahrsimulatoren basieren, stehen vor verschiedenen Herausforderungen. Es werden auch hier synthetisch generierte virtuelle Modelle des Fahrzeugs und der Fahrumgebung verwendet: Deren Abbildungsqualität bestimmt die Validität des Tests und der Ergebnisse. Darüber hinaus ist die Komplexität von Fahrsimulatoren zur immersiven Abbildung der Fahrzeugfahrt eine weitere Herausforderung. So müssen die Sicht- und Geräuschsimulationen eine dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen entsprechende Darstellung des Fahrzeugs und der Fahrumgebung ermöglichen. Die Mensch-Maschine Schnittstelle und der Fahrstand müssen die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug hinreichend realistisch abbilden. Die Bewegungssimulation muss die Reize, die die Fahrzeugfahrt auf die kinästhetische Wahrnehmung des Menschen ausübt, synthetisch nachbilden (Negele 2007, S. 38). Dazu stellt die sogenannte Simulatorkrankheit (auch: Kinetose) eine große Herausforderung für den Fahrsimulator-basierten Test dar. Die Simulatorkrankheit resultiert aus Wahrnehmungskonflikten zwischen visueller und haptischer Bewegungswahrnehmung (Bubb 2015, S. 496–497). Diese können beispielsweise durch Latenzunterschiede von Sicht- und Bewegungssystem auftreten. Aber auch fehlende Umweltreize, eine Begrenzung des horizontalen Blickwinkels oder testspezifische Einflüsse wie scharfe Kurven, Stoppen während der Fahrt oder zu lange Tests werden als Einflussfaktor genannt (Reich 2017, S. 32; Slob 2008, S. 4). Die Symptome sind beispielsweise Übelkeit, Kopfschmerzen, Erbrechen sowie eine Änderung der individuellen Leistungsfähigkeit (Kolansinski 1995, S. 4–15). Diese Symptome können insbesondere bei statischen Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem zum Abbruch einer signifikanten Anzahl an Tests führen. Damit kann geschlussfolgert werden:

Der Test im Fahrsimulator bietet eine mögliche Lösung für den frühzeitigen, umfangreichen Beherrschbarkeits-Test, stellt aber verschiedene neue Herausforderungen. Als Kern-Herausforderungen sind die Komplexität sowie die mangelhafte Immersion der Testumgebung Fahrsimulator zu nennen.

Bevor die Potentiale eines solchen Testverfahrens analysiert werden, werden im Folgenden zunächst die Einsatzfelder von Fahrsimulatoren in heutigen industriellen Entwicklungsprozessen betrachtet.

4.2 Heutiger Einsatz von Fahrsimulatoren in industriellen Entwicklungsprozessen

Zur Ermittlung des Einsatzes in industriellen Entwicklungsprozessen werden Fachexperten aus dem Bereich der Fahrsimulation im Rahmen einer Nutzerstudie befragt. Für die Befragung werden folgende **zwei Kernziele** festgelegt:

1. Es soll identifiziert werden, mit welchem Ziel und zu welchem Zeitpunkt im automobilen Produktentwicklungsprozess heute der Einsatz von Fahrsimulatoren stattfindet.
2. Es sollen Potentiale des zukünftigen Einsatzes von Fahrsimulatoren identifiziert werden. Dies inkludiert die Identifikation von Schwierigkeiten, diese Potentiale in heutigen automobilen Produktentwicklungsprozessen zu nutzen.

Zur Erreichung der genannten Ziele wurde der **Expertenfragebogen „Fahrsimulatoren in der Absicherung“** konzipiert. Der Fragebogen richtet sich an Probanden mit Expertenwissen im Bereich der Fahrsimulation und setzt dieses zur Beantwortung der Fragen voraus. Es sind insgesamt 10 Fragen enthalten, die sich in geschlossene und halboffene Fragen aufteilen (nach Porst 2009, S. 54ff). Es werden geschlossene Fragen mit einer Antwortmöglichkeit über ein semantisches Differential gestellt sowie solche mit Möglichkeit der Mehrfachnennung. Für die halboffenen Fragen werden mehrere Antwortmöglichkeiten vorgegeben. Ergänzend besteht eine offene Antwortmöglichkeit über ein Freitextfeld. Der Fragebogen ist dreiteilig aufgebaut: Der erste Teil dient der Erfassung allgemeiner sowie demografischer Angaben. Der zweite Teil dient der Erfassung des Testgegenstandes, des Zeitpunktes des Einsatzes von Fahrsimulatoren im automobilen Produktentwicklungsprozess sowie dem verwendeten Aufbau und der Testmethodik. Der dritte Teil dient der Erfassung des sinnvollen zukünftigen Zeitpunktes des Einsatzes von Fahrsimulatoren im automobilen Produktentwicklungsprozess, heutiger Herausforderungen sowie zukünftiger Anforderungen an Fahrsimulatoren. Der vollständige Fragebogen ist **Anhang B** zu entnehmen.

Die Expertenbefragung wurde im Rahmen der Fachkonferenz „2. Symposium Drive Simulation“ am 30.06.2016 durchgeführt. Es nahmen insgesamt 17 Probanden an der Befragung teil. **Tabelle 14** gibt einen Überblick über die wichtigsten Charakteristika dieser Probandengruppe.

Tabelle 14: Charakterisierung der an der Befragung teilnehmenden Probanden

Geschlecht	Männlich: 15x			Weiblich: 2x	
Alter (in Jahren)	18-24 0x	25-34 8x	35-44 5x	45-64 4x	>65 0x
Fachrichtung des höchsten Ausbildungs-Abschlusses	Informatik 4x		Fahrzeug-technik 4x	technische Kybernetik 1x	Human Factors 1x
	Wirtschafts-ingenieurwesen 1x		Feinwerk-technik 1x	Maschinenbau 3x	Keine Angabe 2x
Branche des Unternehmens	Automobil OEM 3x	Automobil Zulieferer 2x	Software-Entwicklung 4x	„Netzwerk“ 1x	Forschung/ Universität 7x
Dauer der Tätigkeit für das Unternehmen	0-1 Jahr 0x	1-2 Jahre 2x	2-5 Jahre 2x	5-10 Jahre 6x	> 10 Jahre 7x

Wie in Kapitel 3.3.4 ausgeführt, bemisst sich die Qualität einer Befragung an den Kriterien der **Glaubwürdigkeit**, der **internen Validität**, der **Übertragbarkeit** sowie der **Zuverlässigkeit**. Eine Analyse der Probanden hinsichtlich Erfüllung dieser vier Kriterien ergibt die folgenden Ergebnisse:

Die Glaubwürdigkeit wird gemessen an der Qualität, mit der die Probandengruppe die Zielgruppe des FAS Entwicklers abbildet. Die befragte Probandengruppe hat einen Frauenanteil von rund 11%, wohingegen der Anteil weiblicher Ingenieure in der Fahrzeugtechnik im Jahr 2018 bei etwa 18% der Beschäftigten lag (Bundesagentur für Arbeit 2018, S. 9, 2019, S. 7). Die Probandengruppe weist ein Durchschnittsalter von 38 Jahren auf, das Durchschnittsalter von Ingenieuren lag im Jahr 2011 bei rund 41 Jahren und wird nach derzeitigen Trends bis zum Jahr 2020 auf vergleichbarem Niveau verbleiben (Tivig et al. 2013, S. 38). Die Probanden geben überwiegend Ausbildungsabschlüsse aus dem Bereich der Mechanik-Entwicklung (9 von 17 Probanden aus den Fachrichtungen Fahrzeugtechnik, Maschinenbau, Feinwerktechnik, Kybernetik) sowie Software-Entwicklung (4 der 17 Probanden) an. Wie in Kapitel 3.3 ausgeführt, dienen Fahrsimulatoren in der Entwicklung von FAS heute maßgeblich dem Test von Software sowie von anthropometrischen und ergonomischen Gestaltungsparametern und damit den Tätigkeitsfeldern der Mechanik- und Softwareentwicklung. Die durchschnittliche Firmenzugehörigkeit von rund 10 Jahren sowie die Teilnahme an der auf Fahrsimulation spezialisierten Konferenz lässt auf ein hohes Maß an Vorkenntnissen bei den Probanden in diesem Bereich schließen. Zusammenfassend bildet die Probandengruppe die Geschlechter- und Altersstruktur der Zielgruppe eingeschränkt ab, das Qualifikations- und Erfahrungsprofil wird hingegen gut abgebildet. Es wird daher eine hinreichende Glaubwürdigkeit der Probandengruppe angenommen.

Die interne Validität der Studie wird durch die Minimierung von Störgrößen sichergestellt. Bei dem Design des Fragebogens wird darauf geachtet, auf die Nomenklatur des automobilen Produktentwicklungsprozesses angepasste Fragestellungen und Antwortmöglichkeiten zu stellen. Störgrößen werden durch die Befragung in örtlich separierten Befragungsbereichen minimiert. Das maßgebliche Kriterium für die Zuverlässigkeit der Befragung ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Größe der Stichprobe im Test ausreicht, um aus deren Aussagen auf die Aussagen der referenzierten Grundgesamtheit zu schließen. Um im vorliegenden Fall eine Wahrscheinlichkeit von 95% zu erreichen, müssten 200 bis 300 Probanden befragt werden (nach Bartlett et al. 2001, S. 48). Mit 17 Probanden kann dagegen nur eine Wahrscheinlichkeit von 75% erreicht werden (basierend auf einer Berechnung mit SurveyMonkey Inc. 2019). Die Befragung und die erreichbaren Ergebnisse haben demnach eine nur eingeschränkte Zuverlässigkeit. Es kann zusammengefasst werden:

Die Probandengruppe ist in Ihrer Zusammensetzung eingeschränkt glaubwürdig, bildet das Qualifikations- und Erfahrungsprofils der Zielgruppe jedoch gut ab. Die Nutzerstudie kann als intern valide und übertragbar sowie hinsichtlich ihres Setups als glaubwürdig angenommen werden. Aufgrund der geringen Probandenzahl ist die Zuverlässigkeit der Nutzerstudie eingeschränkt. Ergebnisse sowie Anforderungen, die aus den Ergebnissen der Nutzerstudie abgeleitet sind, müssen daher kritisch hinterfragt werden.

Im Rahmen der Beantwortung des ersten Teils des Fragebogens geben 14 der 17 Probanden an, dass Sie in Ihrer Tätigkeit einen Fahrsimulator einsetzen oder an der Entwicklung eines Fahrsimulators beteiligt sind. Diese 14 Probanden beantworteten im Folgenden den zweiten Teil des Fragebogens. Es werden zunächst die Anwen-

dungsfelder, in dem die 14 Probanden Fahrsimulatoren einsetzen oder einsetzen wollen, identifiziert. Es können ein oder mehrere Anwendungsfelder angegeben werden, entsprechend ist die Anzahl der Nennungen höher als die der Probanden. Der Fahrsimulator wird oder soll für den folgenden Verwendungszweck genutzt werden:

- Absicherung von FAS (14 Nennungen)
- Absicherung von Ergonomie (7 Nennungen)
- Absicherung von Komfortsystemen und Mensch-Maschine Schnittstellen (6 Nennungen)
- Absicherung von Lenksystemen (2 Nennungen)

Bei der Identifikation des heutigen Einsatzzeitpunkts des Fahrsimulators im automobilen Produktentwicklungsprozess geben Probanden mehrheitlich die Prozessschritte der Serienentwicklung und -vorbereitung an. Bei der Einschätzung des sinnvollen zukünftigen Einsatzes von Fahrsimulatoren werden im Gegensatz dazu mehrheitlich die Phasen Konzept, Konzeptabsicherung und Serienentwicklung angegeben. **Abbildung 61** zeigt die Verteilung der Nennungen über die insgesamt fünf Prozessschritte.

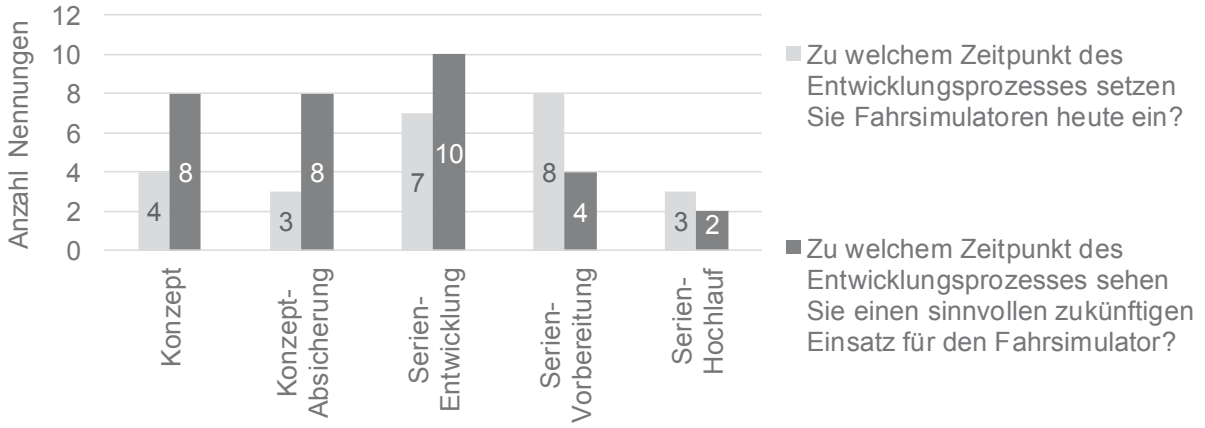


Abbildung 61: Ergebnis Expertenbefragung - Heutiger und sinnvoller (zukünftiger) Einsatz von Fahrsimulatoren in der Absicherung

Im Anschluss wurden die Probanden nach einer Einschätzung über die Gründe gefragt, die den Einsatz von Fahrsimulatoren in frühen Entwicklungsprozess-Phasen in heutigen automobilen Produktentwicklungsprozessen verhindern. Die Antworten der Probanden sind in der nachfolgenden **Tabelle 15** dargestellt.

Tabelle 15: Gründe für den Nicht-Einsatz von Fahrsimulatoren in frühen Entwicklungsphasen des automobilen Produktentwicklungsprozesses

		Alle Probanden N=14	**Nur Industrie-Probanden N=7**	**Nur Probanden aus Forschung N= 7**
1	Fehlende Aussagekraft der Modelle/ Prototypen	14%	17%	13%
2	Zu testende Modelle/Prototypen noch nicht verfügbar	29%	33%	25%
3	Kosten der Prototypen zu hoch	18%	8%	25%
4	Fahrsimulator nicht flexibel genug	21%	17%	25%
5	Fehlende Fahrsimulator-Kapazität	18%	25%	13%

Die von 100% abweichenden Gesamtsummen ergeben sich aus der Rundung auf ganzzahlige Prozentzahlen. Es ergibt sich ein unterschiedliches Bild zwischen Probanden aus der Industrie und aus der Forschung. So bewerten die Probanden aus der Industrie die Nichtverfügbarkeit der Modelle als größtes Hindernis des heutigen frühen Einsatzes, gefolgt von fehlender Kapazität. Darüber hinaus werden fehlende Aussagekraft und Flexibilität genannt. Dahingegen bewerten die Probanden aus der Forschung die fehlende Flexibilität, die zu hohen Kosten sowie die Nichtverfügbarkeit der Modelle als die wichtigsten Gründe des heutigen Nicht-Einsatzes von Fahrsimulatoren im frühen automobilen Produktentwicklungsprozess.

Anschließend werden alle 17 Probanden – also auch die drei, die bisher keinen Fahrsimulator einsetzen oder an der Entwicklung eines solchen beteiligt sind – zu einer für Anwender als akzeptabel eingeschätzte Änderungszeit von einer Hardware sowie einer Software-Konfiguration in eine andere befragt. Die nachstehende **Abbildung 62** zeigt die Aussagen der Probanden.

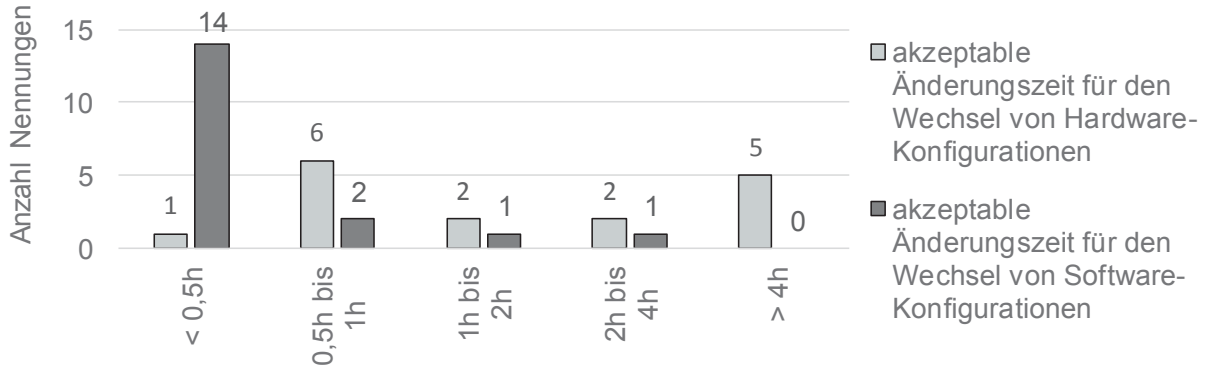


Abbildung 62: Ergebnis Expertenbefragung – Akzeptable Änderungszeiten im Umbau einer Hard- und Software-Konfiguration auf eine Andere

Die **Ergebnisse der Befragung** lassen sich wie folgt zusammenfassen: Heutige Fahrsimulatoren werden maßgeblich in den Teil-Prozessschritten „Serien-Entwicklung“ und „Serien-Absicherung“ des automobilen Produktentwicklungsprozesses eingesetzt. Die befragten Fachexperten geben einen Bedarf des **Frontloading der Absicherungstests** mit Fahrsimulatoren in die Teil-Prozessschritte „Konzept“ und „Konzept-Absicherung“ des Fahrzeug-Entstehungsprozesses an.

Als Gründe für diese Lücke zwischen heutigem und angestrebtem zukünftigen Einsatzfeld von Fahrsimulatoren wurden die in Kapitel 4.1 ausgearbeiteten Herausforderungen heutiger FAS Entwicklungsprozesse durch die Aussagen der Fachexperten bestätigt. So werden insbesondere die identifizierten Aspekte der **fehlenden Verfügbarkeit von frühen testbaren Prototypen**, der **zu hohen Bereitstellungs- und Änderungskosten der heutigen, späten Prototypen** sowie der zu **hohen Komplexität heutiger Fahrsimulatoren** als Haupttreiber ausgemacht. Dazu werden die Aspekte einer **unzureichenden Flexibilität heutiger Fahrsimulatoren** sowie deren **fehlende Verfügbarkeit im Unternehmen** festgestellt. Beide Aspekte können auf die zuvor ausgeführte hohe Komplexität des Testwerkzeuges Fahrsimulator zurückgeführt werden. Darüber hinaus wird die fehlende Flexibilität durch verschiedene Angaben aus der Literatur bestätigt: So sind heutige Entwicklungsprozesse durch eine nur punktuell vorhandene Durchgängigkeit und fehlende Schnittstellen zwischen den Werkzeugen gekennzeichnet (Broy 2010, S. 109; Bringmann und Krämer 2008, S. 486). Es sind damit viele zeitaufwändige und fehleranfällige manuelle Anpassungsschritte vor einem Test notwendig. Heutige Testverfahren sind darüber hinaus oft nur unzureichend definiert,

es fehlt eine Systematik und Durchgängigkeit in Test und Absicherung (Fischer 2016, S. 37). Statt einheitlicher Standards werden unterschiedlichste Methoden, Prozesse und Werkzeuge eingesetzt (Kasoju et al. 2013, S. 1238). Die Herausforderungen heutiger FAS Entwicklungsprozesse, die in der Befragung von den Probanden erhoben wird, lassen sich trotz eingeschränkter Glaubwürdigkeit der Probandengruppe und Zuverlässigkeit der Befragung hinreichend durch andere Quellen stützen.

Die Probanden geben darüber hinaus Bedarfe hinsichtlich der für den Umbau der Testumgebung und des Prototyps akzeptablen Zeit an. So wird ein **Auf- beziehungsweise Umbau der Test-Hardware** in einer Zeit zwischen 0,5h und 1,0h gefordert, für die **Test-Software** dagegen eine Zeit von weniger als 0,5h. Es kann damit zusammengefasst werden:

Die Befragung zeigt einen klaren Bedarf an frühzeitigen, Fahrsimulator-basierten Testverfahren im automobilen Produktentwicklungsprozess. Diese Testverfahren müssen den flexiblen und durchgängigen Einsatz von Fahrsimulatoren im automobilen Produktentwicklungsprozess gewährleisten.

Ein neuartiges Testverfahren, das frühe Prototypen der FAS Entwicklung koppelt und in Fahrsimulator-basierten Tests hinsichtlich ihrer Beherrschbarkeit testen kann, bietet damit große Potentiale für die FAS Entwicklung. Nachfolgend werden diese beleuchtet.

4.3 Potentiale eines Testverfahrens für den früheren Test der Beherrschbarkeit

Zur Analyse der Potentiale neuartiger Testverfahren muss zunächst bestimmt werden, welches die **frühestmöglichen Prototypen** der Entwicklung sind, die eingesetzt werden können, um die Beherrschbarkeit von FAS zu testen.

Zur zuverlässigen Abbildung der Funktionen des Systems in ausreichender Geschwindigkeit müssen diese Prototypen maschinenausführbar sein. Im heutigen Vorgehen zur Integration und Test des mechatronischen Regelsystems werden, wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben, erste Beherrschbarkeits-Test eines Teilsystems mit Rapid Prototyping Elektronik, auf denen Teilsystem-Softwarecode eingebettet ist, mit Hardware-in-the-Loop Testverfahren durchgeführt. Die Rapid Prototyping Elektronik stellt auch die ersten mit dynamischen – und damit maschinenausführbaren – Testverfahren testbareren Elektronik-Prototypen bereit. Der erste maschinenausführbare Prototyp der Software, das im CASE-Tool erstellte Verhaltensmodell, wird jedoch bereits früher im Model-in-the-Loop Test dynamisch getestet. Entsprechend kann angenommen werden, dass die **Rapid Prototyping Elektronik** und das **Verhaltensmodell der Software** die **frühesten maschinenausführbaren Prototypen in der Entwicklung des mechatronischen Regelsystems** sind. Der erste funktionale Teilsystem-Prototyp der Mensch-Maschine Schnittstelle bilden die mit Anzeigen Prototyping (AP) Tools erstellten digitalen Anzeigeinhalte, aufgespielt auf Rapid Prototyping Elektronik der Anzeigen und Bedienelemente. Es kann angenommen werden, dass diese Kombination den **frühesten maschinenausführbaren Prototypen in der Entwicklung der Mensch-Maschine Schnittstelle darstellt.** Damit kann geschlussfolgert werden:

Der früheste domänenbasierte FAS Prototyp besteht aus maschinenausführbaren Verhaltensmodelle der Software, aufgespielt auf Rapid Prototyping Elektronik. Dieser Teilsystem-Prototyp wird mit maschinenausführbaren digitalen Anzeigeinhalten der MMS Entwicklung, die auf Rapid Prototyping Elektronik der Anzeigen und Bedienelemente aufgespielt sind, gekoppelt.

Abbildung 63 verortet das Testverfahren mit diesem **frühesten domänenbasierte FAS Prototyp** auf Systemebene des FAS Entwicklungsprozesses. Im Vergleich ist der in Abbildung 59 beschriebene, erstmalige Beherrschbarkeits-Test des Standes der Technik dargestellt.

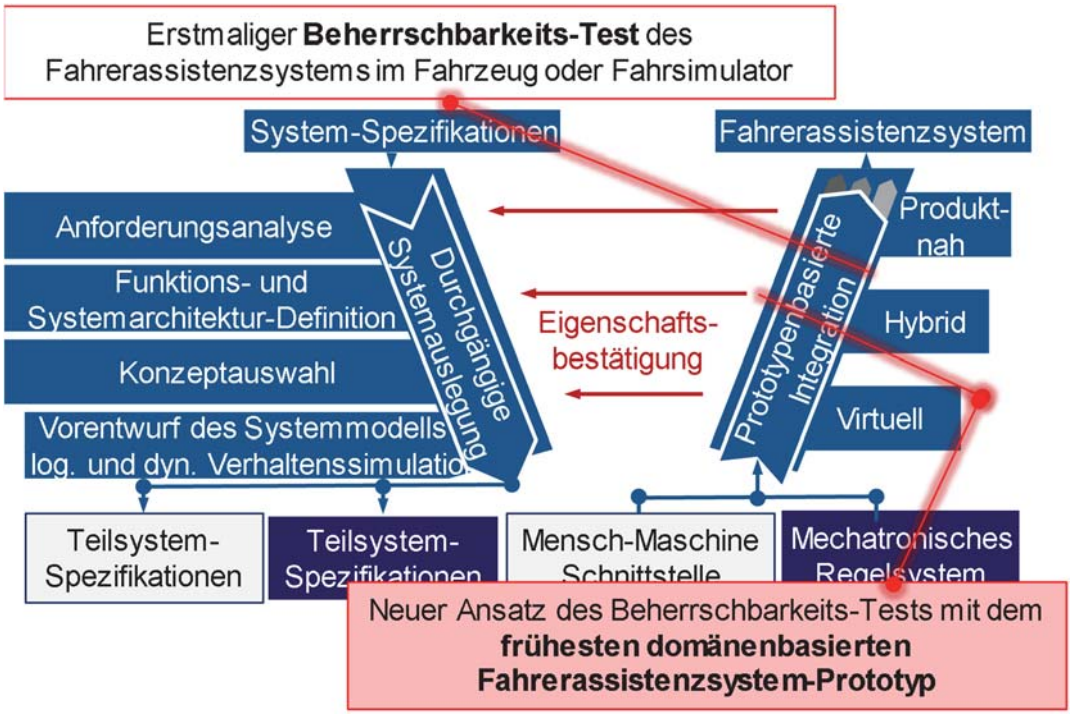


Abbildung 63: Verortung des Beherrschbarkeits-Tests mit dem frühesten domänenbasierten FAS Prototyp im FAS Entwicklungsprozess (auf Systemebene)

Im Vergleich zwischen dem neuen Testverfahren und der Referenz des Standes der Technik zum erstmaligen Beherrschbarkeits-Tests, lässt sich folgendes erkennen: Das bisherige wie auch das neue Testverfahren finden im Prozessschritt „Hybrid“ der prototypenbasierten Integration statt. Im neuen Testverfahren werden gegenüber dem Referenztestverfahren frühere Domänen-Prototypen auf Teilsystem-Ebene zu Teilsystem-Prototypen integriert. Diese Prototypen können entsprechend früher auf Beherrschbarkeit getestet werden.

Das vollständige Frontloading-Potential dieses Testverfahrens ist durch diese Abbildung nicht gut abschätzbar. Erst durch die Projektion in den in Kapitel 3.2.1 vorgestellten automobilen Produktentwicklungsprozess mit seinen typischen Meilensteinen und Teil-Entwicklungsprozessen ist eine besser Abschätzung möglich. **Abbildung 64** stellt diese Projektion dar. Obwohl eine genaue Quantifizierung auf Basis der aus Kapitel 3.2.1 verfügbaren Informationen nicht möglich ist, kann die Abschätzung wie folgt erfolgen: Im heutigen, zumeist fahrzeugbasierten Test der Beherrschbarkeit, markiert der Prozessschritt „VFF/PVS/0S“ des Fahrzeugtests den ersten Zeitpunkt, in dem ein Testfahrzeug für den Beherrschbarkeits-Test verfügbar ist. Der früheste domänenbasierte FAS Prototyp resultiert als Ergebnis aus den folgenden Prozessschritten: Die maschinenausführbaren digitalen Anzeigeinhalte werden im Prozessschritt „Modellierung“ der Design-Entwicklung erstellt. Das erste 3D Modell, welches die Vorgaben für anthropometrischen und ergonomischen Installation der Anzeigen und Bedienelemente ins Fahrzeug bereitstellt, wird im Prozessschritt „Aufbau digitaler Prototypen“ der Mechanik-Entwicklung erstellt. Die maschinenausführbare Rapid Prototyping

Elektronik wird im Prozessschritt „Prototyping & Test“ der Elektrik/Elektronik-Entwicklung erstellt. Das maschinenausführbare Software-Verhaltensmodell wird im Prozessschritt „RCP (Rapid Control Prototyping)“ der Software-Entwicklung erstellt. Die Prozessschritte des „Prototyping und Test“ der Elektrik/Elektronik-Entwicklung sowie der Prozessschritt „VFF/PVS/0S“ des Fahrzeugtests begrenzen den in Frage kommenden, potentiell einsparbaren Zeitraum. Unter der konservativen Abschätzung, dass erste Testfahrzeuge für den Beherrschbarkeits-Test bereits zu Beginn des Prozessschrittes „VFF/PVS/0S“ verfügbar sind und nur weit entwickelte Rapid Prototyping Elektronik eingesetzt wird, lässt sich also ein **Frontloading-Potential von 6 bis 12 Monaten** abschätzen.

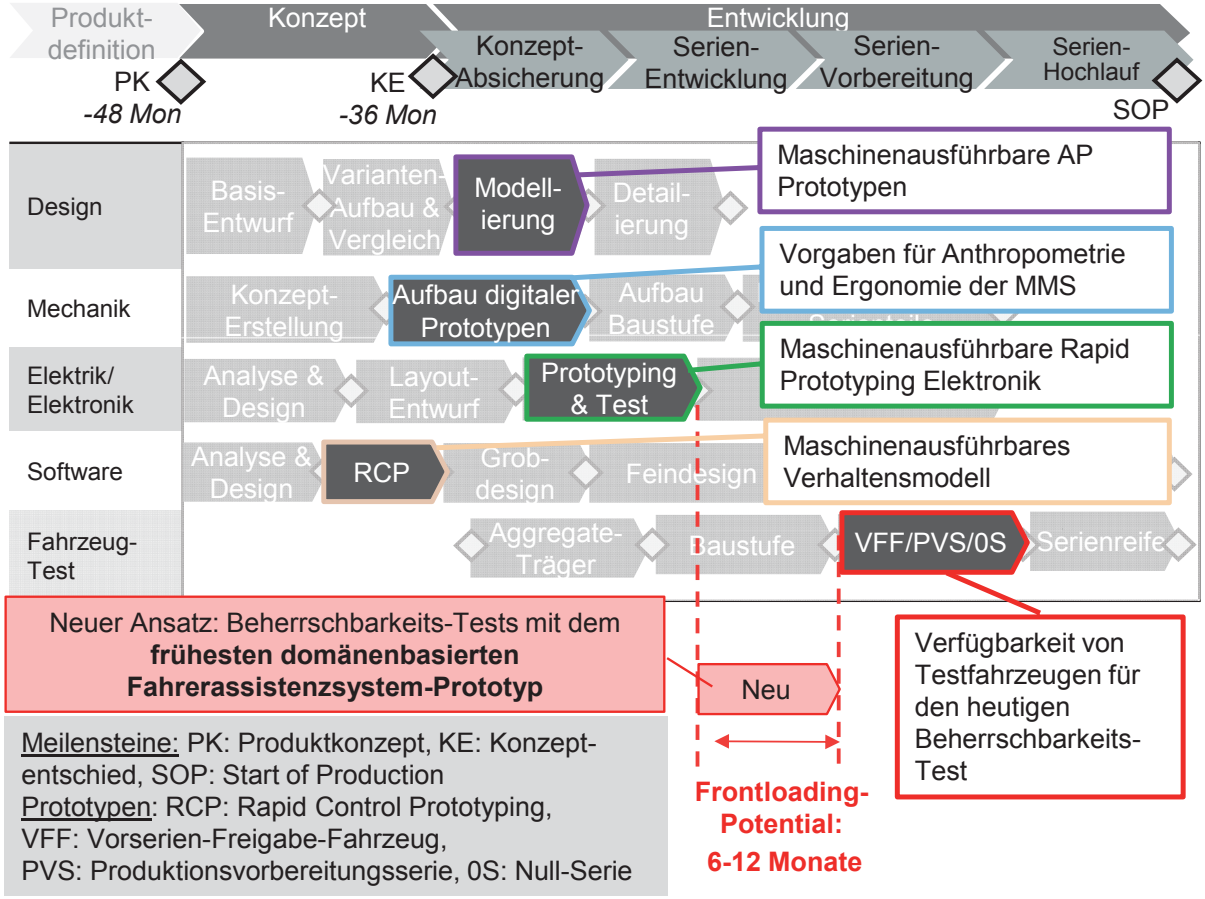


Abbildung 64: Verortung des Potentials des Beherrschbarkeits-Tests mit dem frühesten domänenbasierten FAS Prototyp im automobilen Produktentwicklungsprozess

Wie in **Abbildung 64** erkennbar, limitiert die Bereitstellung passender Elektronik-Prototypen das Frontloading-Potential. Der **Einsatz generischer Elektronik und MMS-Hardware** für den Aufbau des frühesten, maschinenausführbaren FAS Prototyps bietet das Potential eines weiteren Frontloading des Beherrschbarkeits-Tests.

Die Zusammenarbeit mit verschiedenen Zulieferern findet, wie in Kapitel 3.2.2 ausgeführt, maßgeblich in den Prozessschritten der Entwicklung, also der Konzeptabsicherung, Serienentwicklung, Serienvorbereitung und Serienhochlauf statt. Die Zulieferer entwickeln entsprechend der Anforderungen und Spezifikationen des Auftraggebers die Komponenten und Teilsysteme des FAS. Verschiedene Autoren fordern daher eine **frühzeitig und möglichst unabhängig von der Implementierung durchführbare Analyse des Systems** hinsichtlich Qualitätseigenschaften vor Übergabe an die Zulieferer (Wisselmann et al. 2014, S. 7; Hartfiel et al. 2018, S. 663; Broy 2010, S. 107).

Ein prototypenbasierter Test der Spezifikationen beim Fahrzeugentwickler kann bereits im Entwicklungszyklus Schwächen des Prototypen, aber auch Schwierigkeiten in dessen Integrationsprozess aufzeigen (Rumpe 2006, S. 484). Nicht nur die Entwicklung von Qualitätseigenschaften des FAS, sondern auch dessen Entwicklung hinsichtlich Beherrschbarkeit kann von einer solchen frühzeitigen Prüfung der Spezifikationen vor Übergabe an den Zulieferer profitieren. Die **Simulation auf Basis logischer und dynamischer Verhaltensmodelle**, wie sie in der durchgängigen Systemauslegung des MBSE Prozessmodells des Fraunhofer IPK und der TU Berlin vorgesehen sind, stellt ein Testverfahren einer frühzeitigen, integrierten Qualitätsprüfung dar. So simulieren in System-Simulationstools modellierte, funktionale Systemmodelle des FAS dessen Gesamtsystemverhalten. Durch Kopplung mit einem Umgebungsmodell können diese Modelle im Model-in-the-Loop Test auf ihre Outputs in Reaktion auf Inputs getestet werden. Ebenso können auch Teile dieser Modelle separat geprüft werden.

Einen möglichen Lösungsansatz zur Nutzung dieser funktionalen Systemmodelle im FAS Entwicklungsprozess wird durch Auricht beschrieben (Auricht 2018). **Das Testverfahren zur „erlebbaren Absicherung von Fahrerassistenzsystemen“** sieht die Einbindung und den Test des modellierten, funktionalen Systemmodells des FAS im Fahrsimulator vor. Es können Systemfunktionen des mechatronischen Teilsystems vor der Übergabe der spezifizierenden Systemarchitektur an den Zulieferer fahrerzentriert getestet und frühzeitig Korrekturen vorgenommen werden. Der Ansatz der „erlebbaren Absicherung von Fahrerassistenzsystemen“ ermöglicht damit den Test von Beherrschbarkeits-Kriterien wie beispielsweise der Fähigkeit des FAS, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden, mit einem menschlichen Fahrer. Im Stand der Technik werden diese wie beschrieben mit X-in-the-Loop Testverfahren und einem virtuellen Fahrermodell getestet. Ein umfassender Test der Beherrschbarkeit ist aber nicht möglich, denn es fehlt das Teilsystem Mensch-Maschine Schnittstelle. Wie in Kapitel 3.3.5 ausgeführt, werden zur Modellierung der funktionalen Systemmodelle Tools wie MATLAB/Simulink oder Dymola eingesetzt – teilweise dieselben Tools, die auch in der Modellierung der Verhaltensmodelle der Softwareentwicklung eingesetzt werden. Diese funktionalen Systemmodelle werden jedoch nicht von Entwicklern der Fachdomäne Software, sondern von Systemarchitekten erstellt (nach Weit e.V. 2017, S. 137). Das Fähigkeitsprofil für diese Rolle beinhaltet Kenntnisse über Anwendung, Rahmenbedingungen und Einsatzgebiete, verschiedene Architekturprinzipien und Schnittstellen zu dessen Umsetzung sowie die Werkzeuge und Methoden der Entwicklung (Weit e.V. 2017, S. 242). Im Gegensatz zum Hard- oder Softwareentwickler sind keine Kenntnisse über spezifische Entwicklungsumgebungen, Entwicklungsstandards oder gängige Technologien vorauszusetzen (nach Weit e.V. 2017, S. 229ff). Entsprechend zeichnen sich funktionale Systemmodelle durch eine im Vergleich zum Software-Verhaltensmodell wesentlich geringere Modellierungstiefe hinsichtlich der Umsetzbarkeit von Funktionen und Erfüllbarkeit von Anforderungen aus. Es kann zusammengefasst werden:

Ein Testverfahren der „erlebbaren Absicherung von Fahrerassistenzsystemen“ ermöglicht den Test mit dem realen anstelle dem virtuellen Fahrer bereits vor Beginn der Domänen-Entwicklung. Mangels Mensch-Maschine Schnittstelle können jedoch nur einzelne Beherrschbarkeits-Kriterien des mechatronischen Regelsystems getestet werden. Die Ergebnisqualität, die in einem Test funktionaler Systemmodelle erreicht werden kann, ist gegenüber dem Test mit späteren, im CASE-Tool modellierter Verhaltensmodelle der Software, stark eingeschränkt.

Ein neuartiges Testverfahren, welches auf Prototypen, die funktionalen Systemmodelle der durchgängigen Systemauslegung mit einem **funktionalen Prototyp der**

Mensch-Maschine Schnittstelle koppeln basiert, bietet trotz der eingeschränkten Ergebnisqualität verschiedene Potentiale für den Test der Beherrschbarkeit. So könnten mit einem derartigen Testverfahren bereits vor der Domänen-Entwicklung wichtige Kriterien der Fahrer-FAS-Interaktion getestet werden, beispielsweise die Arbeitsbelastung und Erlernbarkeit des Systems für den Fahrer. Auch die Vorhersagbarkeit des Systems wie auch die Verständlichkeit dessen Systemgrenzen durch den Fahrer kann frühzeitig erprobt werden. Darüber hinaus ermöglicht das Testverfahren eine frühe Bewertung durch Entscheidungsträger sowie eine verbesserte Kommunikation mit Zulieferern, denn erstmals kann das gesamte FAS auch für den Laien verständlich gezeigt und erlebt werden. Selbst bei Nutzung generischer Elektronik und MMS Hardware steht die Bereitstellung eines passenden, in der durchgängigen Systemauslegung verfügbaren MMS Prototyps vor einer **großen Herausforderung**: Die in Kapitel 3.1 beschriebenen, vordefinierten digitalen Anzeigeinhalte zur Darstellung komplexer visueller, akustischer und haptischer Anzeigen sind in heutigen FAS Entwicklungsprozessen vor Beginn der Domänenentwicklung noch nicht verfügbar. Für den Test der genannten Beherrschbarkeits-Kriterien sind zudem verschiedene anthropometrische und ergonomische Aspekte wichtig, beispielsweise die Position und Lage von Anzeigen. Auch diese sind heute vor Beginn der Domänenentwicklung noch nicht verfügbar.

Für den Beherrschbarkeits-Test eines FAS vor der Domänen-Entwicklung müssen funktionale Systemmodelle mit neuartigen Prototypen der Mensch-Maschine Schnittstelle gekoppelt werden. Dazu sind neue Ansätze zur Bereitstellung vordefinierter digitaler Anzeigeinhalte sowie der geometrischen Gestaltung, Position und Lage der Anzeigen und Bedienelementen im Fahrzeug vor Beginn der Domänen-Entwicklung erforderlich.

Ein solches Testverfahren bedingt einen komplett neuen Prozessschritt in der durchgängigen Systemauslegung: Die Tests werden auf Basis der Funktions- und Systemarchitektur vor der Domänenentwicklung durchgeführt. Ein solcher Prozessschritt einer „**erlebbaren Absicherung des Systemmodelles“** kann nach Auricht im MBSE Prozessmodell nach dem Prozessschritt „Vorentwurf des Systemmodells, logische und dynamische Verhaltenssimulation“ verortet werden (Auricht 2018, S. 99). **Abbildung 65** visualisiert den modifizierten FAS Entwicklungsprozess und verortet den Beherrschbarkeits-Test eines FAS vor der Domänen-Entwicklung in diesem. Der durch Abbildung 59 beschriebene erstmalige Beherrschbarkeits-Test des Standes der Technik ist vergleichend dargestellt. **Abbildung 66** visualisiert das Frontloading-Potential eines derartigen Testverfahrens im automobilen Produktentwicklungsprozess.

Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.2.1 und 3.4.1 kann die dynamische Verhaltenssimulation des funktionalen Systemmodells im Prozessschritt „Produktdefinition“ verortet werden: Es werden die funktionalen Details des FAS definiert. Wie beschrieben kann im Stand der Technik der zumeist fahrzeugbasierte Test der Beherrschbarkeit erstmals im Prozessschritt „VFF/PVS/0S“ des Fahrzeugtests durchgeführt werden. Gegenüber diesem ergibt sich also ein Frontloading-Potential für einen ersten Test der Beherrschbarkeit von **bis zu 36 Monaten**. Gegenüber dem zuvor vorgestellten Testverfahren auf Basis des frühestmöglichen, domänenbasierte FAS Prototyps, ist ein Frontloading **von 24-30 Monaten** möglich**,** allerdings bei stark eingeschränkter Ergebnisqualität.

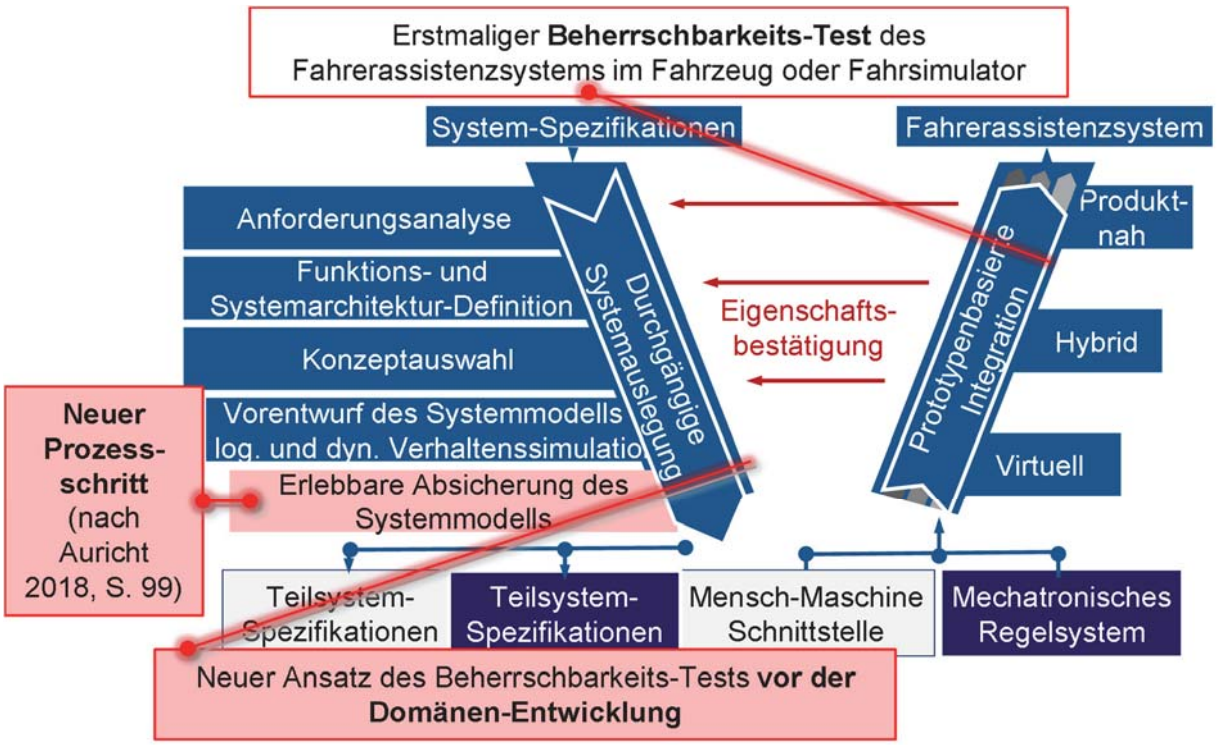


Abbildung 65: Verortung des Beherrschbarkeits-Tests vor der Domänen-Entwicklung im modifizierten FAS Entwicklungsprozess (Systemebene)

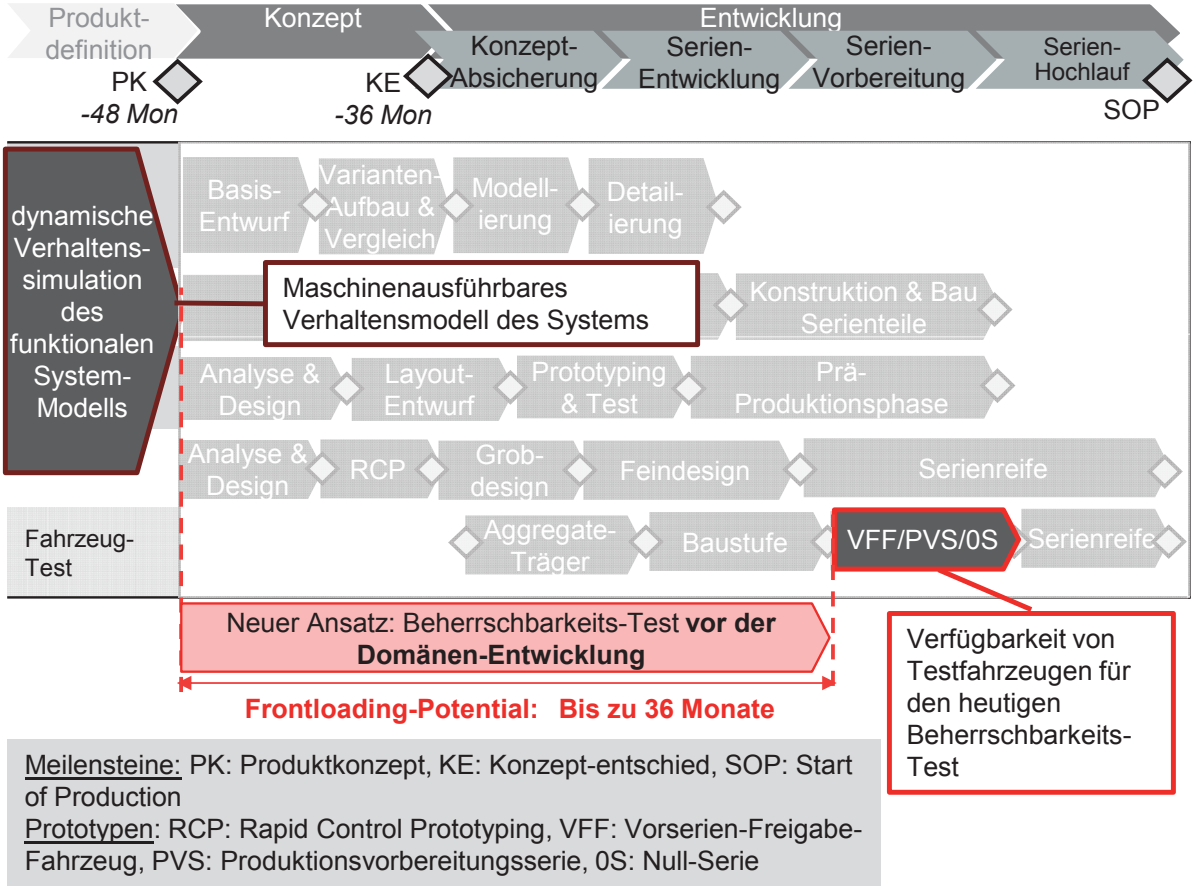


Abbildung 66: Verortung des Potentials des Beherrschbarkeits-Tests eines FAS vor der Domänenentwicklung im automobilen Produktentwicklungsprozess

4.4 Ableitung der Forschungsfragen und Eingliederung in die Arbeit

Wie gezeigt, hat der Einsatz neuartiger FAS Prototypen, die einen früheren Test der Beherrschbarkeit als im Stand der Technik ermöglichen, großes Potential für die Entwicklung zukünftiger FAS. Entsprechend sollen daher nachfolgend die Forschungsfragen der Arbeit abgeleitet werden.

Die **erste Forschungsfrage F I.**, die in der vorliegenden Arbeit beantwortet werden soll, wird wie folgt formuliert:

F I. Wie kann das Fahrerassistenzsystem so durch Prototypen abgebildet werden, dass ein umfassender Test der Beherrschbarkeit früher als im Stand der Technik durchgeführt werden kann?

Kapitel 5 dient der Herleitung und Entwicklung eines Testverfahrens zur Beantwortung dieser ersten Forschungsfrage und stellt den **ersten Teil der Lösungsfindung** dar.

Eine erfolgreiche Lösungsfindung führt zur Frage, wie diese im industriellen FAS Entwicklungsprozess umgesetzt werden kann. Nach den in Kapitel 2 aufgezeigten Zusammenhängen beschreibt der Begriff der Methodik „eine planmäßige Verfahrensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels oder der Lösung einer theoretischen oder praktischen Aufgabenstellung“. Die **zweite Forschungsfrage F II.** wird daher wie folgt formuliert:

F II. Wie muss eine Methodik gestaltet sein, die den frühzeitigen, umfassenden Test der Beherrschbarkeit des Fahrerassistenzsystems in industriellen Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozessen ermöglicht?

Kapitel 6 dient der Herleitung und Entwicklung der Methodik und stellt den **zweiten Teil der Lösungsfindung** in der Arbeit dar.

Abbildung 67 visualisiert das **Vorgehen in der Arbeit zur Lösungsfindung** anhand der aus **Abbildung 6** eingeführten Darstellung. Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage F I. muss ein geeigneter FAS Prototyp zur Abbildung des FAS zum Zweck des frühen Beherrschbarkeits-Tests gefunden werden. Ziel ist die Erlangung von Erkenntnissen über das FAS durch einen frühen Beherrschbarkeits-Test von dessen Prototyp. Die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage F II. erfordert die Definition einer Methodik zur Durchführung des frühen Beherrschbarkeits-Tests mit dem FAS Prototyp. Das Vorgehen zum Aufbau und Test dieser Prototypen wird durch einen Prozess beschrieben. Das konkrete, detaillierte Vorgehen in diesem Prozess, welches durch Einsatz von Werkzeugen gekennzeichnet ist, wird durch Methoden beschrieben.

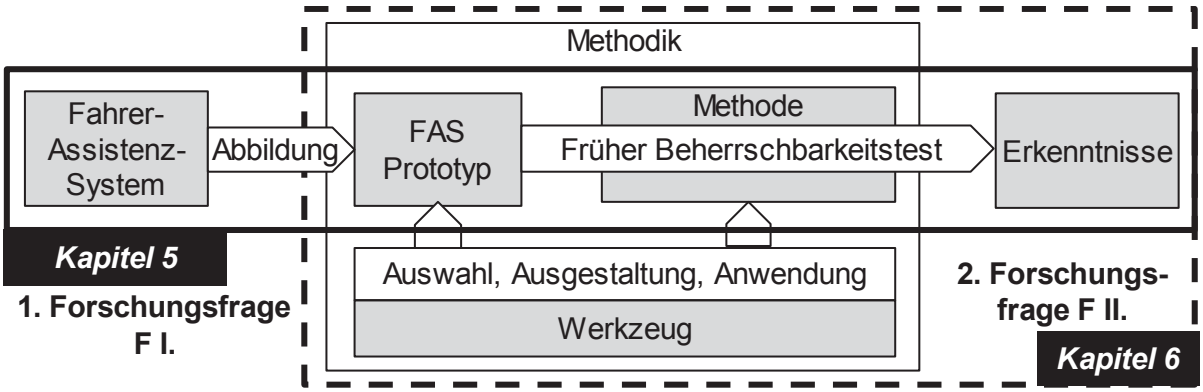


Abbildung 67: Vorgehen im Rahmen der Arbeit zur Beantwortung der Forschungsfragen F I. und F II.

Kapitel 5

Neues Testverfahren zum frühen Beherrschbarkeits-Test von Fahrerassistenzsystemen

The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not "Eureka" but "That's funny…".

(Asimov 1984)

5 Neues Testverfahren zum frühen Beherrschbarkeits-Test von Fahrerassistenzsystemen

Das vorliegende Kapitel dient der Beantwortung der **ersten Forschungsfrage:**

F I. Wie kann das Fahrerassistenzsystem so durch Prototypen abgebildet werden, dass ein umfassender Test der Beherrschbarkeit früher als im Stand der Technik durchgeführt werden kann?

Abbildung 68 zeigt die Verortung des Kapitels in den Kontext der Arbeit.

Abbildung 68: Verortung des Kapitels „5. Neues Testverfahren zum frühen Beherrschbarkeits-Test von Fahrerassistenzsystemen“ in der Arbeit

Die Überlegungen in Kapitel 4.3 zeigen Eigenschaften derartiger Prototypen: Für eine zuverlässigen Abbildung der Funktionen des Systems in ausreichender Geschwindigkeit müssen die Prototypen maschinenausführbar sein. Der früheste FAS Prototyp sollte daher auf den ersten maschinenausführbaren Teilprototyen der FAS Entwicklung basieren: Den Verhaltensmodellen der Software und den maschinenausführbaren digitalen Anzeigeinhalten der MMS Entwicklung. Ein früher Test der Beherrschbarkeit erfordert den Einsatz einer Testumgebung, die eine Interaktion des FAS mit dem menschlichen Fahrer, dem Fahrzeug und der Fahrumgebung ermöglicht. Zu diesem Zweck können sowohl Testfahrzeuge als auch Fahrsimulatoren eingesetzt werden. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, werden Fahrsimulatoren in heutigen automobilen Produktentwicklungsprozessen früher als Testfahrzeuge für den Test von FAS Prototypen eingesetzt. Der Test des frühen, maschinenausführbaren FAS Prototypen im Fahrsimulator bietet damit eine mögliche Lösung der ersten Forschungsfrage. Daher sollen zunächst bestehende Ansätze, die den Test früher maschinenausführbarere FAS Prototypen im Fahrsimulator ermöglichen, hinsichtlich des Potentials für eine Lösung der ersten Forschungsfrage untersucht werden.

5.1 Ansätze des frühen Fahrsimulator-basierten Tests

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, dienen Fahrsimulatoren der Bereitstellung verschiedener interaktiver Elemente der Sicht,- Geräusch und Bewegungssimulation. Ziel ist es, den menschlichen Fahrer mit der Datenbasis und Verkehrssimulation multimodal interagieren zu lassen. Die Datenbasis und Verkehrssimulation beinhaltet das virtuelle Fahrzeug, die virtuelle Fahrumgebung sowie virtuelle Fremdfahrzeuge und Infrastruktur. **Abbildung 69** visualisiert das Zusammenspiel eines FAS Prototyps und eines Fahrsimulators in den beiden Regelkreisen der Fahrerassistenzsystem-Interaktion:

- Für den Test im **Regelkreis der Mechatronik** erfasst und evaluiert das mechatronische Regelsystem Informationen des durch den Fahrsimulator bereitgestellten virtuellen Fahrzeugs, der virtuellen Fahrumgebung sowie der virtuellen Fremdfahrzeuge und Infrastruktur. Diese Informationen werden verarbeitet, gegebenenfalls findet ein Aktor-Eingriff auf das virtuelle Fahrzeug statt.
- Über die Mensch-Maschine Schnittstelle des FAS werden Anzeigen multimodal, also visuell, akustisch oder haptisch an den Fahrer übermittelt. Für den Test im

Regelkreis der Fahrer-FAS-Interaktion kann der Fahrer seinerseits das FAS multimodal über dessen Bedienelemente visuell, akustisch oder haptisch bedienen.

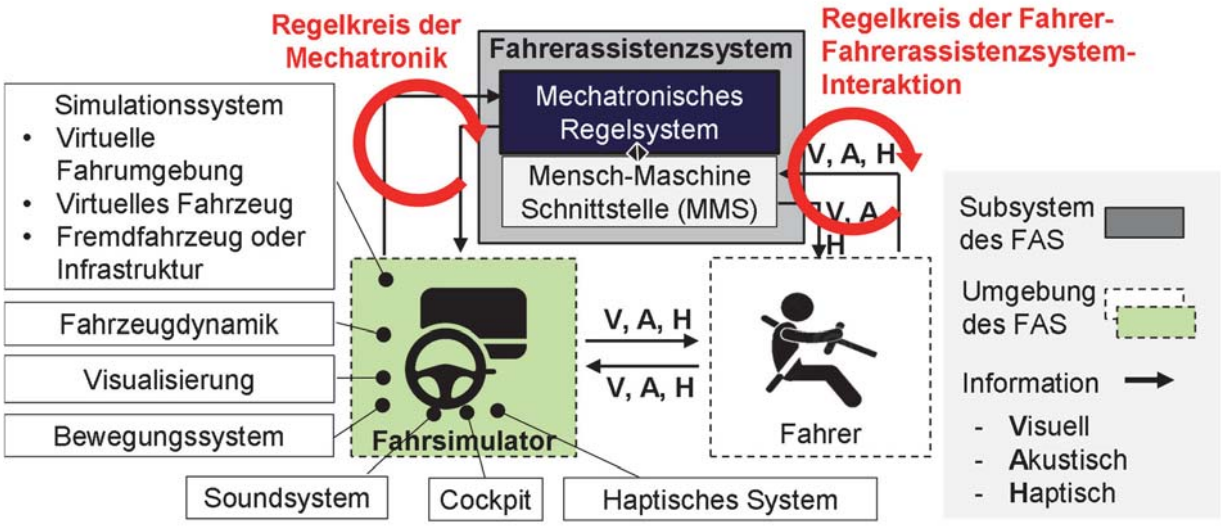


Abbildung 69: Zusammenspiel zwischen FAS Prototyp, Fahrer und Fahrsimulator im Fahrsimulator-basierten Testverfahren

In der Analyse bestehender Ansätze des Tests früher maschinenausführbarere FAS Prototypen im Fahrsimulator soll zunächst der in Kapitel 4.3 beschrieben Ansatz der Arbeit von Auricht zur „erlebbaren Absicherung von Fahrerassistenzsystemen“ untersucht werden. Das FAS im Anwendungsfall der Arbeit ist das Verhaltensmodell eines Stauassistenzsystems, welches sowohl einen adaptiven Geschwindigkeitsregler, einen Spurhalteassistenten sowie ein Start/Stopp System zur Unterstützung des Fahrers in Längs- und Querführung in Stausituationen beinhaltet (nach Auricht 2018). Es wird in MATLAB/Simulink modelliert und ist mit der Fahrsimulationssoftware dSpace ASM gekoppelt. Die Integration in den Functional Drive Fahrsimulator des Fachgebietes Industrielle Informationstechnik der TU Berlin ermöglicht die Durchführung eines Probandentests, bei dem Probanden mit verschiedenen Parametersetups des FAS interagierten und mit UX Methoden bewerteten. **Abbildung 70** zeigt die Systemarchitektur der Testumgebung.

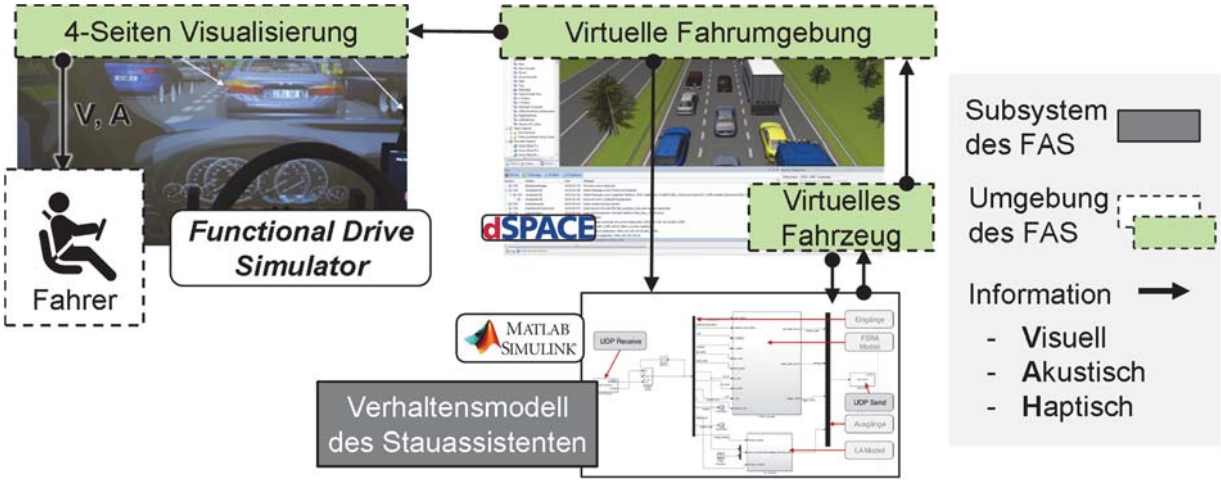


Abbildung 70: Systemarchitektur zum Test des in MATLAB/Simulink modellierten Stauassistenten (nach Auricht 2018)

Wie erkennbar, beinhaltet der Prototyp keine Mensch-Maschine Schnittstelle des FAS. Den Ausführungen in Kapitel 3.3.3 folgend können mit dieser Systemarchitektur Model-in-the-Loop Tests durchgeführt werden: Das mechatronische Regelsystem wird im Regelkreis der virtuellen Fahrumgebung und des virtuellen Fahrzeugs getestet. Das FAS beeinflusst das virtuelle Fahrzeug, eine direkte Interaktion zwischen Fahrer und FAS findet dagegen nicht statt.

Andere Autoren beschreiben Architekturen für den Test von FAS in beiden Regelkreisen: Abdelgawad beschreibt eine Integration verschiedener, in MATLAB/Simulink modellierter Simulationsmodelle mit einem skalierbaren Framework in einen Fahrsimulator (Abdelgawad 2014, S. 15). Der erste von zwei beschriebenen Anwendungsfällen beschreibt einen Notbremsassistenten. Dieses FAS nutzt eine mehrstufige visuelle und akustische Anzeige, um den Fahrer ab einer bestimmten, geschwindigkeitsabhängigen Distanz vor einer Kollision mit einem anderen, beweglichen Objekt zu warnen. Sobald eine kritische Distanz unterschritten ist, übernimmt ein mechatronischer Regler die Kontrolle und bremst das Fahrzeug auf Stillstand ab. Der zweite Anwendungsfall „Notlenkassistent“ nutzt hingegen ein System, das mit einem Lenkeingriff auf eine drohende seitliche Kollision während einer Kurvenfahrt reagiert und das Fahrzeug automatisch vom anderen, beweglichen Objekt weglenkt. Nach der Einbindung in den Simulator wird das Verhalten der Systeme mit einer Gruppe an Testpersonen evaluiert (Abdelgawad 2014, S. 16). So können die Effektivität, der ordnungsgemäße Betrieb sowie die Akzeptanz des FAS durch den Fahrer evaluiert werden.

Der Autor Dass Jr. beschreibt den Aufbau und den Test verschiedener Anzeigen eines Spurhalteassistenzsystems in einem Fahrsimulator (Dass Jr et al. 2013, S. 259). Auch hier wird ein mechatronisches Regelsystem in MATLAB/Simulink modelliert und mit einem Fahrsimulator und einer akustischen sowie einer haptischen Anzeige gekoppelt. Die haptische Anzeige nutzt im Fahrersitz integrierte Vibrationsmotoren, die auditive Anzeige verschiedener Tonfolgen, um den Fahrer bei Verlassen seiner Spur zu warnen. Ein Vergleichstest beider Anzeigevarianten mit Probanden zeigt eine vergleichbare Ausführungsqualität des Spurhaltens nach erfolgter Warnung. In einer anschließenden Befragung mittels Fragebögen gaben die Probanden zudem eine (subjektive) Präferenz der haptischen gegenüber der akustischen Anzeige an.

Hiesgen beschreibt die Entwicklung eines menschzentrierten Querführungsassistenten mit einem Fahrsimulator (Hiesgen 2012). Das mechatronische Regelsystem setzt sich aus einem Bahnführungs-, Spurverlassens- und Spurwechselassistenten zusammen (Hiesgen 2012, S. 47). Es dient dazu, bei Spurwechseln vor Gefahren zu warnen oder den Spurwechsel durch Lenkeingriff sogar zu unterbinden (Hiesgen 2012, S. 27–36). Die Mensch-Maschine Schnittstelle stellt visuelle, haptische und akustische Anzeigen für die Warnungen bereit (Hiesgen 2012, S. 105–111). Das System ist in den Fiesta-Fahrsimulator der Universität Duisburg-Essen eingebunden. Der Simulator verbindet ein stereoskopisches 240° Visualisierungssystem mit einem Echtzeitsimulationssystem und koppelt dieses mit einem Realfahrzeug und dessen Mensch-Maschine Schnittstellen (Hiesgen 2012, S. 122). Die Regelung des mechatronischen Regelsystems wird in MATLAB/Simulink modelliert, die Mensch-Maschine Schnittstelle wird durch die im Fahrzeug vorhandenen Anzeigen – Visuelle 7 Zoll LCD Anzeige im Instrumentencluster, auditive Ausgabe über die Fahrzeug-Lautsprecher, Vibrationsmotoren im Lenkradkranz – sowie durch zusätzliche LEDs an den Außenspiegeln umgesetzt (Hiesgen 2012, S. 122–123). Die Systemarchitektur von Hiesgen ist in **Abbildung 71** dargestellt. In einer Probandenstudie konnte gezeigt werden, dass durch Einsatz des Systems die Bahnführung sowie die mittlere Spurabweichung während der

Fahrt signifikant gegenüber dem Nicht-Einsatz verbessert werden kann. In Fragebögen gaben die Probanden dazu positives Feedback zur Gestaltung und Nutzbarkeit der Anzeigen.

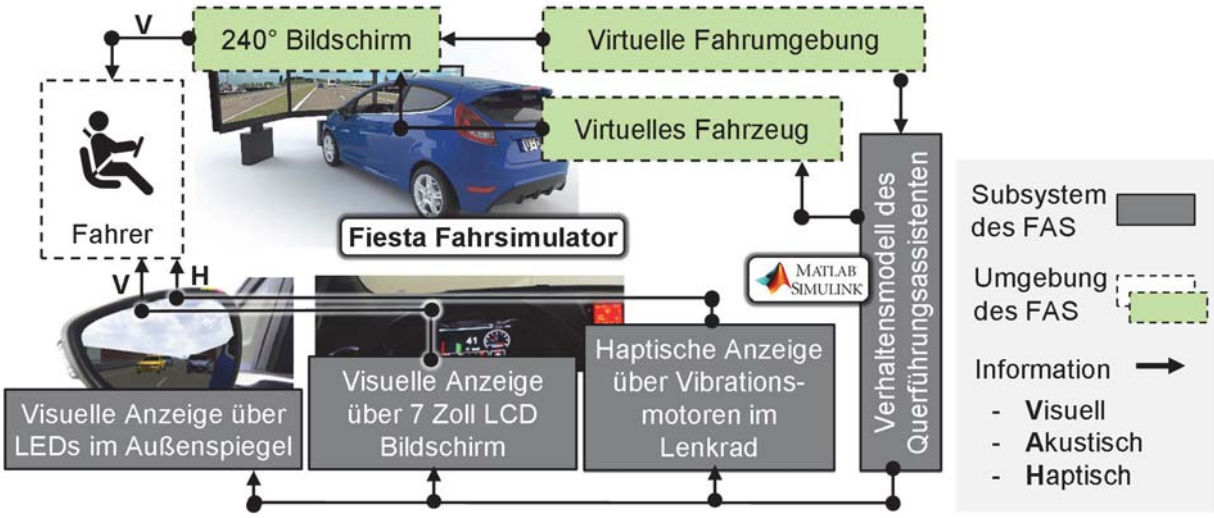


Abbildung 71: Systemarchitektur zum Test des in MATLAB/Simulink modellierten Querführungsassistenten (nach Hiesgen 2012)

Düser entwickelt in seiner Forschungsarbeit mit dem X-in-the-Loop Framework ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung (Düser 2010). Zur Evaluation dieser Architektur werden verschiedene Test-Setups aufgebaut. Neben der Entwicklung einer energieeffizienten Fahrstrategie, dem automatisierten Betrieb und der Analyse von Hybridfahrzeugen sowie einem manöverbasierter Test im Realversuch werden zwei FAS in den Fahrsimulator des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) implementiert (Düser 2010, S. 120ff). Die nachfolgende **Abbildung 72** zeigt die Systemarchitektur dieses Setups.

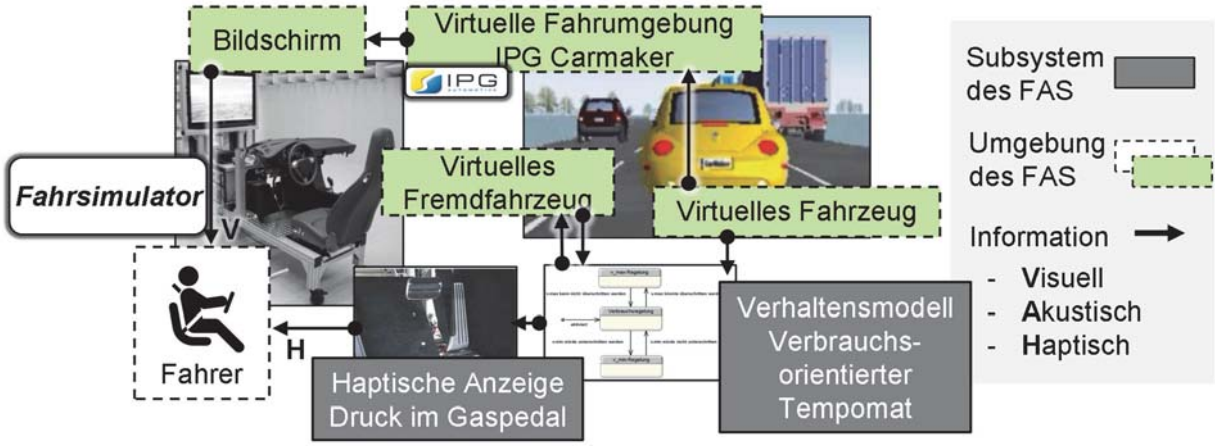


Abbildung 72: Systemarchitektur der Testumgebung zum Test eines in SysML modellierten Tempomaten (nach Düser 2010)

Die Architektur wird für den „verbrauchsorientierten Tempomaten“ beschrieben. Dieser dient zur Anleitung des Fahrers, durch einen bestimmten Winkel am Gaspedal im verbrauchsoptimalen Bereich zu fahren. Das mechatronische Regelsystem, das die Soll- und Ist-Stellung des Pedals vergleicht und gegebenenfalls ein Signal an das Pedal sendet, ist in SysML Notation (statisch) modelliert und in der Programmiersprache C++ in ausführbare Software umgesetzt. Das Pedal ist mit einem mechatronischen Aktuator

ausgerüstet, der eine Veränderung des Druckpunktes ermöglicht. Nach Regeleingriff wird der Fahrer durch eine haptische Anzeige bei der Einhaltung der verbrauchsoptimalen Fahrweise unterstützt. Die Einsparung kann durch die Kopplung mit einem Car2X-System verstärkt werden (Albers et al. 2010, S. 63). Dieses sendet Positions- und Geschwindigkeitsinformationen an umgebende Fahrzeuge, die sich innerhalb eines bestimmten Radius um das Fahrzeug befinden. Ebenso werden Informationen dieser Fahrzeuge empfangen. Das Car2X System wird direkt in der Simulationssystem IPG Carmaker umgesetzt (Albers et al. 2010, S. 64). Die Umsetzung für die Evaluation eines weiteren FAS wird durch Düser erwähnt, jedoch nicht im Detail beschrieben. Hier wird für ein Kollisionswarnsystem eine visuelle sowie akustische Anzeige eingebaut, im Setup analog zu Hiesgen (Düser 2010, S. 146–149). Dazu kommt eine haptische Anzeige, bei der ein zusätzliches Moment auf das Lenkrad gegeben wird. Diese Anzeigen warnen den Fahrer bei kritischer Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug. In exemplarischer Anwendung können für beide FAS die Möglichkeit zum funktionalen Test und daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen an die Entwicklung gezeigt werden. So können beispielsweise durch Veränderung des Pedaldrucks ein verbrauchsoptimales Kennfeld für den verbrauchsorientierten Tempomaten erarbeitet werden.

Bauer et al. beschreiben ein Testsetup der Firma BMW für den Test vollständiger FAS (Bauer et al. 2015). Der Verbund aus IPG Carmaker zur Umgebungs- und Fahrzeugsimulation sowie der stereoskopischen Visualisierung über RTT DeltaGen dient als Steuergerät-übergreifende Integrationsplattform (Bauer et al. 2015, S. 114). An diese Plattformen können sowohl Steuergeräte für Hardware-in-the-Loop Tests als auch in MATLAB/Simulink erstellte Verhaltensmodelle angekoppelt werden. Die Anzeigen werden direkt in das 3D CAD-Modell und auf einer dreiseitigen Leinwand projiziert. Die Systemarchitektur ist in der nachfolgenden **Abbildung 73** dargestellt.

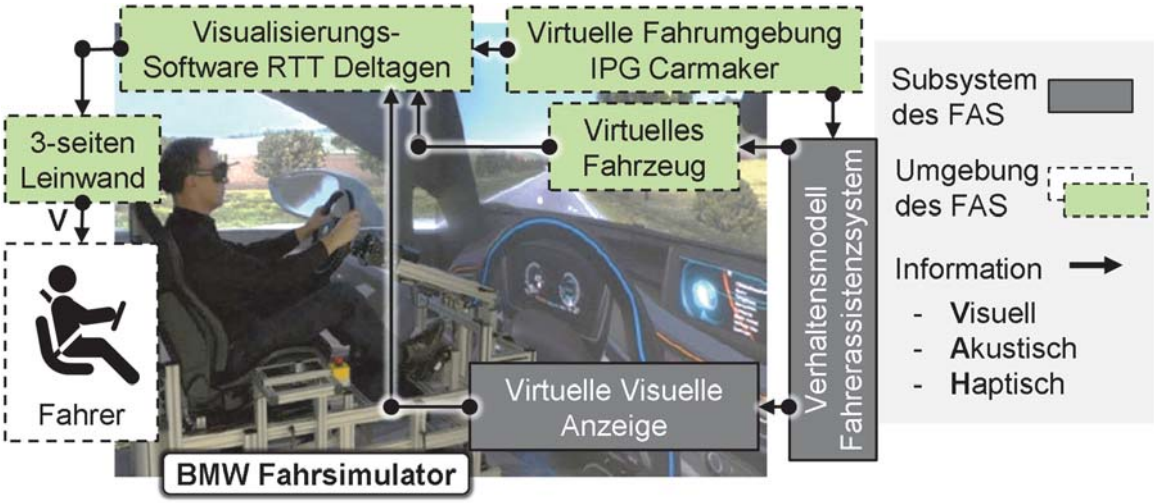


Abbildung 73: Systemarchitektur zum Test von in MATLAB/Simulink modellierten FAS (nach Bauer et al. 2015, S. 115)

Allen beschriebenen Testverfahren ist gemein, dass das FAS seine Funktion im Kontext der virtuellen Fahrumgebung und dem virtuellen Fahrzeug für den menschlichen Fahrer erlebbar ausübt. Die nachfolgende **Abbildung 74**, die auf der in Abbildung 21 eingeführten Systemdarstellung von FAS basiert, fasst die Gemeinsamkeiten der untersuchten Testsetups zusammen.

Es wird zwischen dem Fahrerassistenzsystem-Prototyp sowie der zu dessen Test erforderlichen Testumgebung wie folgt unterschieden:

Fahrerassistenzsystem-Prototyp, bestehend aus:

- Dem **virtuellen Verhaltensmodell der Steuerung (C)** für Verarbeitung der eingehenden Informationen aus virtueller Fahrumgebung und virtuellem Fahrzeug sowie der Berechnung der Ansteuersignale für die Aktoren oder der Ansteuerung von Anzeigen.
- Hybride Mensch-Maschine Schnittstellen, bestehend aus **Anzeigen (AN)** und **Bedienelementen (BE)**, für die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug. Es werden physische Anzeige- und Bedienelement-Hardware mit virtuellen Modellen zur Darstellung und Auswertung gekoppelt.

Hybride Testumgebung Fahrsimulator, bestehend aus:

- Dem **virtuellen Fahrzeugmodell**, zur Simulation des Verhaltens des Fahrzeugs sowie dessen Interaktion mit Fahrer und Fahrumgebung.
- Der **virtuellen Fahrumgebung**, die Umgebung, Fremdfahrzeuge sowie die Infrastruktur und deren Verhalten darstellt.
- Den **Elementen der Sicht-, Geräusch- und Bewegungssimulation** sowie dem **Fahrstand und der Mensch-Maschine Schnittstelle (MMS)** des Fahrsimulators zur Interaktion mit dem Fahrer. Neben den primären Fahrer-Fahrzeug-Schnittstellen Lenkung, Fahrpedal und Bremspedal, können weitere sekundäre und tertiäre Fahrer-Fahrzeug-Schnittstellen, beispielsweise Schalter oder Bildschirme, eingebunden sein.

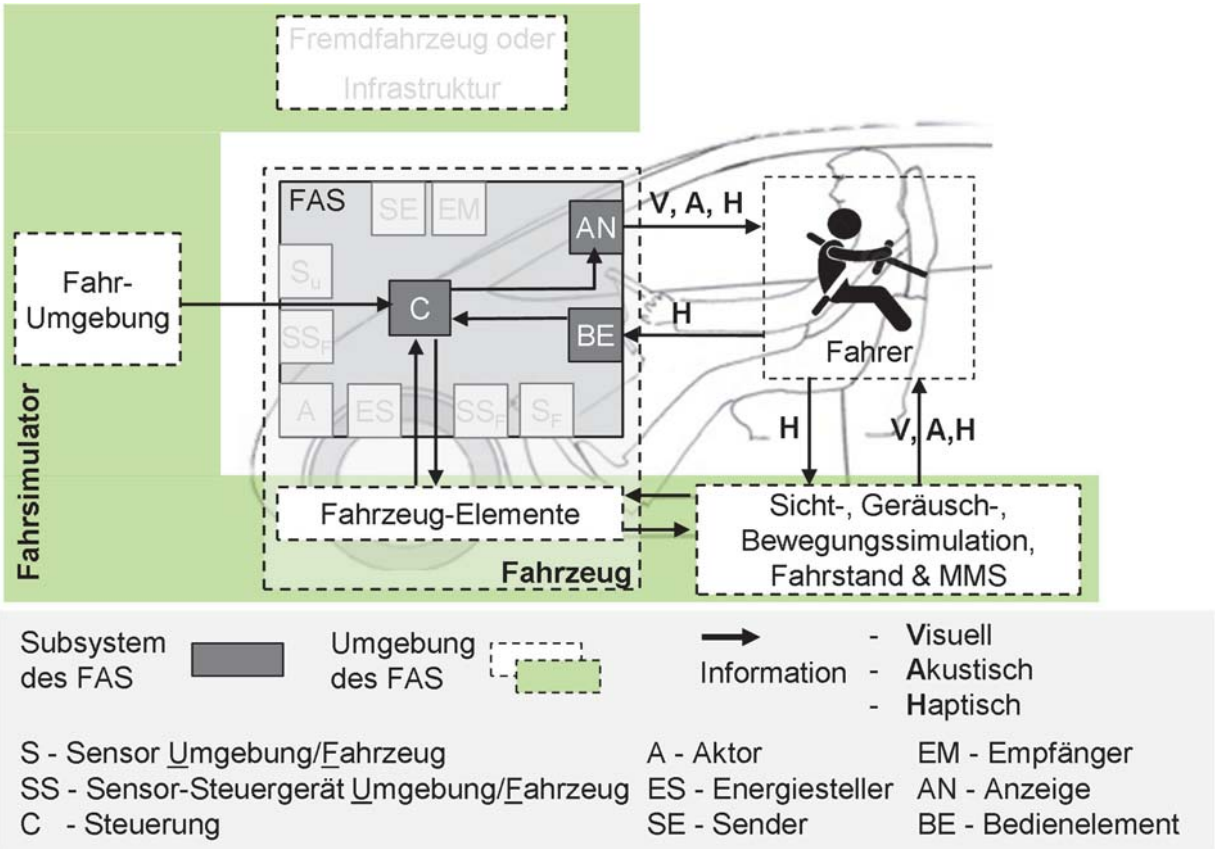


Abbildung 74: Systemaufbau des Fahrsimulator-basierten Tests von FAS

In den untersuchten Testverfahren und -setups wurde **gezeigt, dass FAS Prototypen,** die aus in CASE-Tools modellierten Prototypen des mechatronischen Regelsystems sowie mit diesen verbundenen Anzeigen bestehen, **im Fahrsimulator implementiert und getestet werden können**. Die Umgebung sowie das Fahrzeug werden durch den Fahrsimulator mittels virtueller Modelle bereitgestellt. Dazu stellt der Fahrsimulator Elemente zur Interaktion des Fahrers mit dem virtuellen Fahrzeug bereit. Verschiedene Probandentests zeigen die Nutzbarkeit für den Test der Beherrschbarkeit von FAS: So kann die Fähigkeit des mechatronischen Regelsystems geprüft werden, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden oder das Fahrzeug in der Spur zu halten. Auch die Nutzbarkeit visueller, akustischer oder haptischen Anzeige konnten durch Probanden getestet und bewertet werden. Damit ist die Voraussetzung für einen Test von Beherrschbarkeits-Kriterien wie Vorhersagbarkeit, Wahrnehmbarkeit, Vertrauen, Erlernbarkeit oder Akzeptanz des FAS gegeben.

Keiner der untersuchten Ansätze betrachtet ein vollständiges FAS entsprechend der in Abbildung 21 eingeführten Systemdarstellung**.** So fehlt in allen untersuchten Ansätzen die Beschreibung einer vollständigen Sensorik entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.1.2: Ein Sensor, der Messgrößen der virtuellen Fahrumgebung oder des virtuellen Fahrzeugs erfasst sowie ein Sensor-Steuergerät zur Signalaufbereitung, -wandlung und -verarbeitung des Messsignals. Ebenso fehlt die Beschreibung des Aktors, zusammengesetzt aus dem Energiesteller und Energiewandler, und die des Car2X Systems, bestehend aus Sender und Empfänger. Für die Anzeige- und Bedienhardware der Teilsystem-Prototypen der Mensch-Maschine Schnittstelle wird Rapid Prototyping Elektronik eingesetzt, beispielsweise das durch Düser beschriebene aktive Gaspedal. Weiterhin alte Fahrzeug-Hardware, wie die Anzeige in der Mittelkonsole oder die Vibrationsmotoren im Lenkrad im Ansatz von Hiesgen. Beide Ansätze ermöglichen den frühzeitigen Test entsprechend der Überlegungen in Kapitel 4.3. Eine visuelle, akustische und haptische Anzeige wird damit ermöglicht. Der Aufbau der digitalen Anzeigeinhalte, die Schnittstellen und die Bereitstellung der dazu erforderlichen Modelle sind durch die Ansätze nicht beschrieben. Wie Kapitel 3.1 ausgeführt, werden insbesondere bildbasierte visuelle Anzeigen zunehmende Bedeutung für zukünftige FAS erlangen. Der Aufbau von Bauer zeigt eine mögliche Lösung: Die Nutzung funktionaler Anzeigen, die im 3D Modell eingebettet direkt visualisiert werden können. Auch hier fehlt eine Beschreibung des Aufbaus und der Schnittstellen der eingesetzten Prototypen. In allen Ansätzen fehlen Bedienelemente. Gerade im Falle von Trends wie der zunehmenden Implementierung von Touch-Flächen, der Einbindung von Mobilelektronik oder neuartiger Bedienkonzepte wie Gestensteuerung ist die Betrachtung von Bedienelementen jedoch hoch relevant für die zukünftige FAS Entwicklung. Darüber hinaus erfordert der vollständige Nachweis der Beherrschbarkeit den Test von Kriterien wie dem Fehlbenutzungs-Potential, bei dem unter anderem auf fehlerhafte Bedienung geprüft wird. Oder dem Kontrollproblem, das beispielsweise die Fähigkeit des Fahrers prüft, das FAS zu übersteuern und mit dessen unbeabsichtigter Aktivierung oder Deaktivierung umzugehen. Es kann zusammengefasst werden:

Die Untersuchungen der bestehenden Ansätze haben die prinzipielle Eignung des Tests eines frühen, maschinenausführbaren FAS Prototypen im Fahrsimulator für den frühen Beherrschbarkeits-Test aufgezeigt. Ein umfassender Beherrschbarkeits-Test entsprechend der Ausführungen in Kapitel 4.3 kann wegen verschiedener Einschränkungen der heutigen FAS Prototypen in keinem der betrachteten Ansätze des Standes der Technik durchgeführt werden. Für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage sind daher Erweiterungen erforderlich.

Für den Test der Beherrschbarkeit ist eine bidirektionale Interaktion zwischen Fahrer und FAS erforderlich. Der effiziente Beherrschbarkeits-Test im frühen FAS Entwicklungsprozess erfordert darüber hinaus den schnellen Aufbau der Prototypen der Mensch-Maschine Schnittstelle. Für die Erweiterung der Prototypen soll nachfolgend ein Ansatz für den Aufbau und Test einfacher Prototypen zur multimodalen Mensch-Technik Interaktion untersucht werden: Der Ansatz des **Hybrid Prototyping.**

5.2 Analyse des Hybrid Prototyping Ansatzes zum frühen Test einer Mensch-Maschine-Interaktion mit gekoppelten Prototypen

Der Ansatz des **Hybrid Prototyping** (auch: Mixed Prototyping) beschreibt die Erstellung und den Test von gemischten beziehungsweise **hybriden Prototypen**, bestehend aus virtuellen und physischen Komponenten (vergl. Bordegoni et al. 2009, S. 177; Barbieri et al. 2013, S. 310; Stark et al. 2009). Dazu werden visuell darstellbare Geometriemodelle mit Verhaltensmodellen sowie physischen Komponenten gekoppelt. So wird ein zeitgleich visuell und haptisch, multimodal in seinen Funktionen erlebbarer Prototyp geschaffen (Barbieri et al. 2013, S. 310–311; Bruno et al. 2011, S. 107; Bordegoni et al. 2009, S. 180; Filippi und Barattin 2012, S. 148; Auricht et al. 2013, S. 4). Die visuell darstellbaren Geometriemodelle, zumeist CAD oder DMU Modelle, werden mit Virtual Reality oder Augmented Reality Visualisierungstechnologien angezeigt (Stark et al. 2009; Barbieri et al. 2013, S. 311). Ziel ist die Ermöglichung eines multimodalen und domänenübergreifende Erlebens sowie einer Beurteilbarkeit von virtuellen Prototypen und deren Funktionen durch den Nutzer in frühen Phasen der Produktentstehung (vergl. Bordegoni et al. 2009, S. 177; Barbieri et al. 2013, S. 310; Stark et al. 2009).

Die Autoren Bruno et al. beschreiben die Umsetzung verschiedener Hybrid Prototyping Setups mit Augmented Reality Visualisierung (Bruno et al. 2011). Es wird ein Setup bestehend aus einer physischen Attrappe sowie einem virtuellen Geometriemodell über Video Tracking Verfahren miteinander gekoppelt. Video Tracking Verfahren nutzen (Bezugs-) Marker, über Bilderfassungsverfahren automatisiert erfass- und interpretierbare Symbole, zur Synchronisierung der physischen und virtuellen Elemente des Prototyps. Im Anwendungsfall „Mobiltelefon“, der in **Abbildung 75 (Links)** dargestellt ist, wird eine physische Attrappe eines Mobiltelefons mit einem DMU verknüpft und dem Nutzer über ein AR HMD visualisiert. Der Nutzer kann die passive Oberflächenhaptik des Mobiltelefons in Kopplung mit dessen Bild multimodal evaluieren. Ott et al. beschreiben den Aufbau des haptischen Feedback-Systems „Haptic Workstation“ (Ott et al. 2007). Dieses besteht aus einem mechatronischen Exo-Skelett, das Kräfte auf die Finger und Händen eines Nutzers ausüben sowie deren Bewegung sensorisch erfassen kann. Das physische Gerät ist mit einem Augmented Reality Headset, das ein stereoskopisches Bild in das Sichtfeld des Nutzers überlagert gekoppelt. Ott beschreibt die Durchführung von Montagesimulationen mit diesem Setup, dargestellt in **Abbildung 75 (Rechts).** Ein virtuelles Geometriemodell einer Montagestation wird mit physikalischen Parametern einer Haptischen Rendering Software angereichert (Ott et al. 2007, S. 845–846). Damit ist es möglich, geometrische Interaktionen wie Kollisionen zwischen physischen und virtuellen Elementen haptisch erlebbar anzuzeigen.

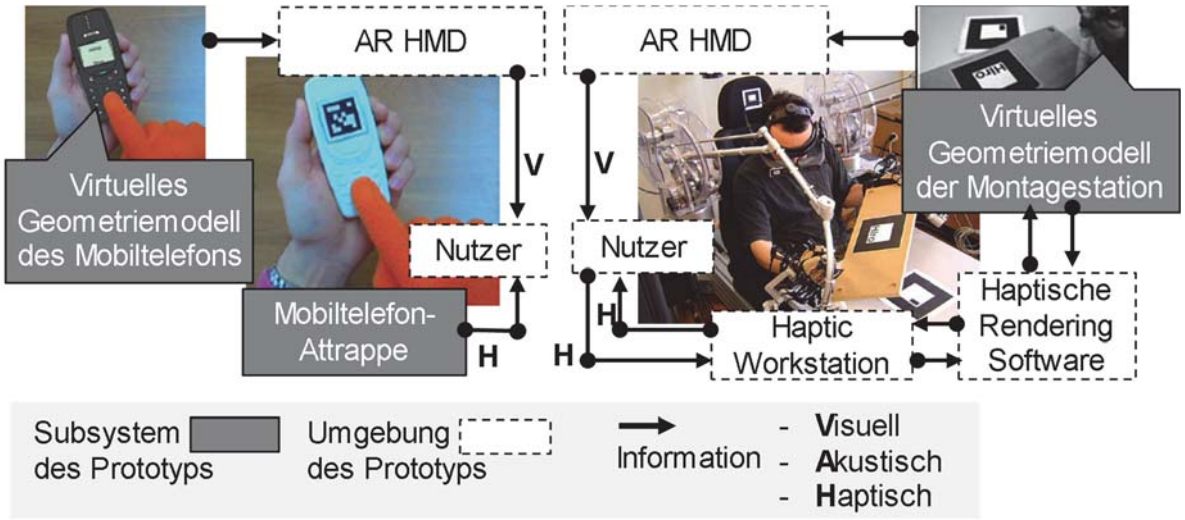


Abbildung 75: (Links) Hybrides Mobiltelefon (nach Bruno et al. 2011, S. 111), (Rechts) Montagesimulation mit der Haptic Workstation (nach Ott et al. 2007, S. 845)

Buchholz et al. beschreiben die mehrachsige „Haptik Zelle“, bestehend aus insgesamt drei motorgetriebenen Linearmodulen, die auf einen Endeffektor Kräfte in alle drei Raumrichtungen ausüben können (Buchholz et al. 2017a). Der Nutzer interagiert haptisch mit dem Endeffektor: Es werden die wirkenden translatorisch Betätigungskräfte angezeigt und der kann Effektor translatorisch bedient werden. Gekoppelt ist ein virtuelles Geometriemodell, das dem Nutzer mittels Virtual Reality Headset synchronisiert dargestellt wird. Wie bei Ott et al. wird auch hier eine haptische Rendering Software eingesetzt, um das Geometriemodell mit physikalischen Parametern anzureichern. Die Haptik Zelle kann beispielsweise für die für die Evaluation eines manuellen Montageprozesses in einer Montagezelle eingesetzt werden (Buchholz et al. 2017a, S. 551). Die Systemarchitektur ist in **Abbildung 76** zu sehen.

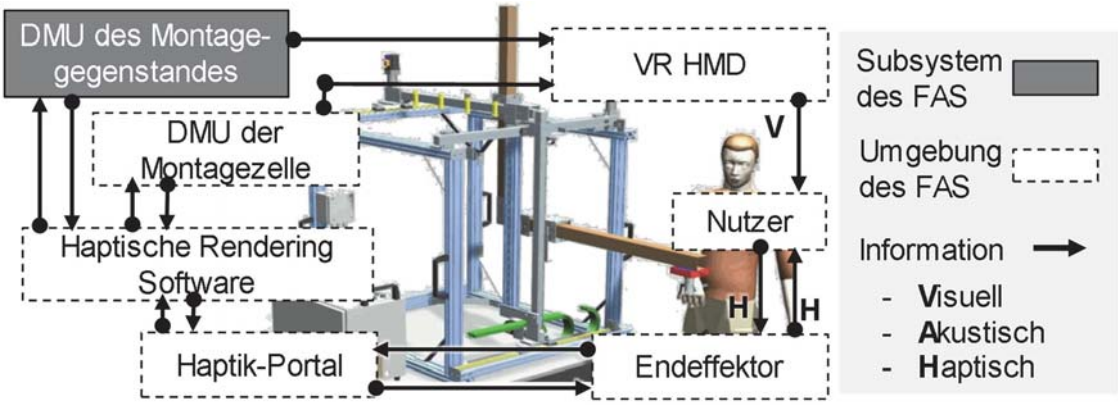


Abbildung 76: Montagesimulation mit Haptik Zelle (nach Akrap 2016, S. 30; Buchholz et al. 2017a, S. 551)

Bordegoni et al. beschreiben die Entwicklung eines Mixed Prototyping Gerätes unter Nutzung von Virtual Reality Technologie (Bordegoni et al. 2009). Als programmierbare Interaktionsgeräte werden verschiedene Drehknöpfe, Schalter und Schieberegler mit einem 3D Modell einer Waschmaschine funktional verbunden (Bordegoni et al. 2009, S. 183ff). Dem mit diesen Bedienelemente interagierenden Nutzer wird die Zustandsänderung der entsprechenden Bedienelemente des virtuellen 3D Modells über ein VR Head Mounted Display visuell angezeigt. **Abbildung 77 (Rechts**) zeigt die zugehörige

Systemarchitektur. Barbieri et al. nutzen den selben Anwendungsfall der Waschmaschine, setzen jedoch auf einen gegenüber Bordegoni erweiterten physischen Prototypen-Teil (Barbieri et al. 2013). Wie in **Abbildung 77 (Links)** dargestellt, installieren sie durch Potentiometer auslesbare Schalter und Drehknöpfe an einen aus Aluminium-Standardprofilen hergestellten, modularen Rahmen. Dieser bietet die Möglichkeit, verschiedene an heutigen Waschmaschinen gängige Bedienelemente anzubinden und ermöglichen damit sowohl taktile als auch kinästhetische Informationen anzuzeigen (Barbieri et al. 2013, S. 312). Der mit diesen Bedienelemente interagierende Nutzerbekommt deren Zustandsänderung im gekoppelten 3D Modell visuell überlagert über ein AR Head Mounted Display angezeigt.

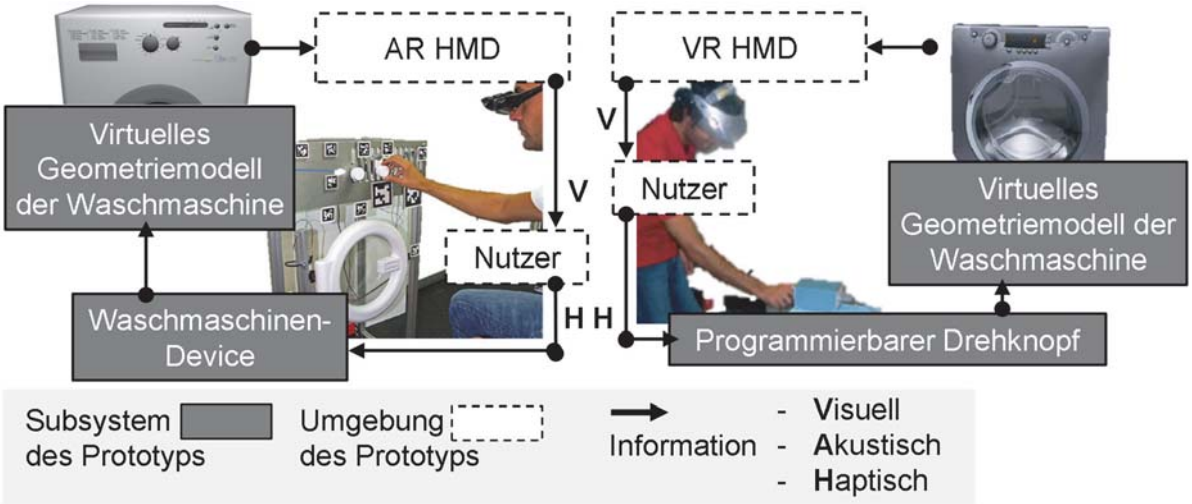


Abbildung 77: (Links) Hybrider Prototyp Waschmaschine (nach Barbieri et al. 2013, S. 314), (Rechts) Hybrider Prototyp Waschmaschine (nach Bordegoni et al. 2009, S. 184)

Auricht et al. beschreiben den Aufbau des „Tailgate-Devices“, einem hybriden Prototyp zur Simulation von mechatronischen Heckklappen (Auricht et al. 2012b; Auricht et al. 2012a). Der Prototyp dient zur Konzeptvalidierung des Smart Hybrid Prototyping Ansatzes zur Multimodalen Erlebbarkeit virtueller Prototypen in der Produktentstehung (Stark et al. 2009). Der virtuelle Teil des hybriden Prototyps besteht aus einem DMU des Fahrzeugs und einem davon entkoppelten DMU der Heckklappe. Sowie einem Verhaltensmodell, modelliert im Tool Dymola. Das Verhaltensmodell beinhaltet Parameter wie das Heckklappen-Gewicht, das geometrische Verhalten des Öffnungsprozesses sowie die applizierten Kräfte. In einer Co-Simulation gekoppelt bilden diese zwei Modelle das sogenannte Functional Digital Mock Up (FDMU), ein funktionales, virtuelles Modell (vergleiche Kapitel 3.3.1). Die Ansteuerung des Elektromotors und einer damit gekoppelten Heckklappen-Attrappe ermöglicht eine haptische Anzeige und Bedienung des Heckklappe-Verhaltens durch den Nutzer (Auricht et al. 2012b). Dieses „Feedback-Device“ besteht aus der Heckklappen-Attrappe, zwei durch ein Gelenk verbundenen Trägern, einer Platte als Endeffektor sowie einem Elektromotor (Auricht et al. 2012b). Für die Kommunikation zwischen den virtuellen Elementen sowie mit der Hardware verwendet das System das Datenprotokoll User Datagram Protocol (UDP). Für den Test wird das FDMU stereoskopisch visualisiert (vergleiche Auricht et al. 2012b; Buchholz et al. 2018b). Somit wird eine multimodale Interaktion zwischen Mensch und mechatronischem Heckklappen-Prototypen umgesetzt.

Der hybride Prototyp „Tailgate-Device“ wird in zwei Testfällen eingesetzt: Erstens zur **Absicherung eines Dämpfer-Kennfeldes für eine neue Heckklappe** (Auricht et al. 2012b). Das Kennfeld definiert die Geschwindigkeit und das Moment für jede Position der Heckklappe und dient so der Auslegung der Dämpfer, die den Nutzer bei Öffnungs- und Schließvorgängen unterstützen. Zweitens zur **Absicherung eines individualisierbaren, automatischen Heckklappen-Öffnungssystems (ATG)** (Buchholz et al. 2018b). Das System ATG, in dieser Form beispielsweise beim Autombilhersteller Volvo im Einsatz (Volvo Car Support USA 2018), ermöglicht dem Nutzer eine Programmierung der oberen Halteposition der Heckklappe. Für die Testfälle werden unterschiedliche Setups verwendet. **Abbildung 78** zeigt die Systemarchitektur für die zwei Testfälle.

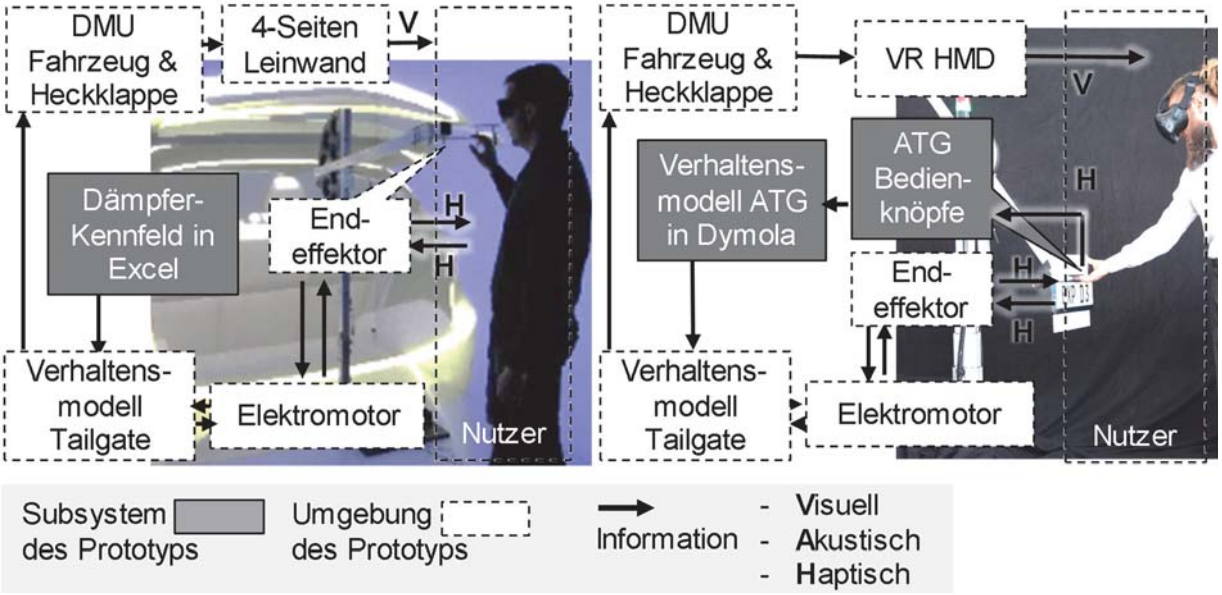


Abbildung 78: (Links) Hybrides Tailgate Device im Testfall Dämpfer-Kennfeld (nach Auricht et al. 2012b), (Rechts) im Testfall ATG Prototyp (nach Buchholz et al. 2018b)

In **Testfall 1** besteht der zu untersuchende Prototyp aus dem tabellarischen Kennfeld, welches durch das Verhaltensmodell des hybriden Tailgate Device interpretiert wird. In **Testfall 2** besteht der zu untersuchende hybride Prototyp aus Bedienknöpfen, die auf dem Endeffektor des Tailgate Device angebracht sind (nach Buchholz et al. 2018b). Die Bedieneingaben werden an das Verhaltensmodell des automatischen Heckklappen-Öffnungssystems, das die eigentliche Steuerung des Systems darstellt, weitergeleitet. Dieses gibt Steuersignale an das Tailgate-Verhaltensmodells, das wiederrum über den Elektromotor die Heckklappen-Attrappe ansteuert.

Die **Erkenntnisse aus der Analyse der Ansätze des Hybrid Prototyping** können wie folgt zusammengefasst werden:

Es wird der Aufbau eines mechatronischen Regelsystems, bestehend aus Sensorik, Steuerung und Aktorik, beschrieben. So erfassen im Simulationssystem virtuelle Sensoren Messgrößen der Testumgebung. Diese Informationen werden in CASE-Tools erstellten Prototypen der Sensor-Steuergeräte aufbereitet, gewandelt und verarbeitet. Eingriffe der Steuerung werden im Prototypen des Energiestellers, der im CASE-Tool erstellt ist, in ein für die Testumgebung lesbares Dateiformat gewandelt und dort durch einen virtuellen Energiewandler ausgeführt. Dieses Setup ist geeignet, das mechatro-

nische Regelsystem eines FAS entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.1.2 abzubilden. **Abbildung 79** zeigt den resultierenden Aufbau des nach den **Ansätzen des Hybrid Prototyping aufgebauten mechatronischen Regelsystems eines FAS**.

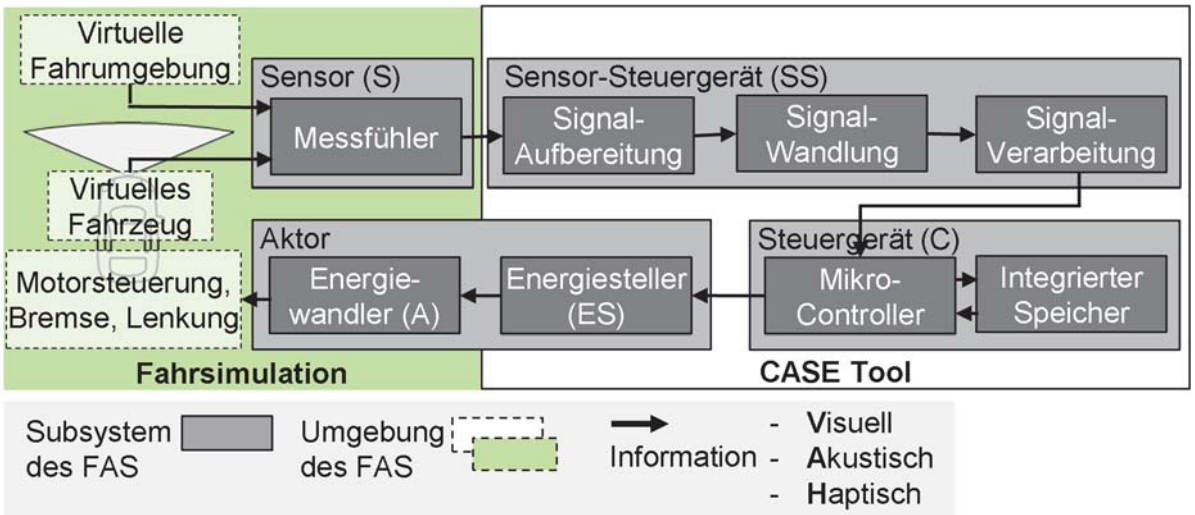


Abbildung 79: Mechatronisches Regelsystem, zusammengesetzt nach den Ansätzen des Hybrid Prototyping

Die Sensormodelle, modelliert im Simulationssystem des Fahrsimulators, erfassen Informationen der virtuellen Fahrumgebung sowie des virtuellen Fahrzeugs. Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, bilden diese Modelle den realen Sensor entweder rein funktionsbasiert, über geometrische oder physikalische Vergleichsmodelle oder über physikalische CAE Simulationen ab. Zur Auswertung der Informationen dienen im CASE-Tool modellierte, virtuelle Sensor-Steuergeräte. Die ausgewerteten Informationen werden durch das im CASE-Tool modellierte Steuergerät interpretiert. Wenn erforderlich, wird ein Ansteuersignal an den Aktor gegeben. Der im CASE-Tool modellierte Energiesteller dient der Aufbereitung und Wandlung des Ansteuersignals in eine für den im Simulationssystem modellierten, virtuellen Energiewandler verständliche Signalform. Der virtuelle Energiewandler führt den Eingriff in die Fahrzeugsteuerung durch. Dieses Zusammenspiel entspricht dem in Kapitel 3.3.3 beschriebenen **Model-in-the-Loop Testverfahrens**, welches die Interaktion eines mit CASE Tools erstellten Funktionsmodells mit einem Umgebungsmodell auf einem Entwicklungsrechner bezeichnet.

Als Datenschnittstelle zwischen den Prototypen wird in mehreren Ansätzen der **User Datagram Protocol (UDP) Standard** eingesetzt. Bei einer UDP Verbindung werden Nachrichten vom Sender in Pakete zerlegt, übertragen und beim Empfänger wieder zusammengesetzt zerlegt (Grote und Antonsson 2009, S. 456). Die Nutzung des verbindungslosen Datenprotokolls UDP anstelle des in der Netzwerktechnik gängigen TCP/IP-Protokolls erlaubt den kontinuierliche und damit schnellere Datenübertragung, da keine Bestätigung des Empfangs und der Konsistenz durch das Empfänger-Element stattfinden muss (Schnabel). Bei der Nutzung des Datenprotokolls UDP ist damit nicht sichergestellt, dass die Daten zeitgerecht oder überhaupt beim Empfänger ankommen. In der Regel wird UDP für Prototyping-Anwendungen und Dienste wie Audio- und Video-Streaming verwendet, die entweder mit Paketverlusten umgehen können oder sich durch Prüfroutinen um das Verbindungsmanagement kümmern (Schnabel; Etrality GmbH). Auch im Online-Spielbereich wird UDP für eine Verringerung der Latenzzeiten und die damit einhergehende Geschwindigkeits-Verbesserung der Spielverbindung eingesetzt (Etrality GmbH). Mögliche Paketverluste werden in beiden An-

wendungsbereichen zugunsten der Geschwindigkeit akzeptiert: So können zwar Verzerrungen in der Bild- und Audiodarstellung auftreten, die Geschwindigkeit der Wiedergabe bleibt aber hoch. Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, zeichnet sich der Model-in-the-Loop Test früher Verhaltensmodelle durch eine Toleranz gegenüber einer Überschreitung von Zeitbedingungen, beispielsweise bei dem periodische Auslesen eines Sensors oder während der Bildgenerierung eines Visualisierungssystems, aus. Durch die nicht sicherstellbare Datenkonsistenz können Beherrschbarkeitskriterien wie die Fehlerrobustheit des Systems oder der Nachweis von Schutzmaßnahmen gegen externe Manipulationen, die auf echtzeitfähige Software mit zuverlässiger Datenkonsistenz angewiesen sind, jedoch nicht nachgewiesen werden. Wie in Kapitel 4.3 ausgeführt, gilt dies aber im Allgemeinen für ein Testverfahren, welches den frühestmöglichen FAS Prototyp einsetzt: Es ist ein gegenüber dem Stand der Technik wesentlich umfangreicherer, jedoch kein vollständigen Test und Nachweis der Beherrschbarkeit möglich. Die Nutzung der schnellen und einfach umzusetzenden **UDP Datenverbindung erscheint somit als geeigneter Baustein** für einen frühzeitigen Test von FAS auf Basis von im CASE-Tool erstellten Prototypen im Regelkreis mit einem Umgebungsmodell.

Den Testsetups ist gemein, dass **physische, prototypische Bedienelemente zur Steuerung virtueller, CAD-Modell basierter Anzeigen** eingesetzt werden. Zu deren Visualisierung werden zu etwa gleichen Teilen **Augmented** und **Virtual Reality Visualisierungstechnologien** eingesetzt. Ziel ist es, nur die tatsächlich mit dem Nutzer haptisch interagierenden Elemente des Prototyps physisch abzubilden, den Rest jedoch virtuell. Durch Überlagerung der virtuellen über die physischen Elemente ist damit für die physischen Elemente keine hohe visuelle Abbildungsqualität und Abbildungsumfang erforderlich: Es können in Form und Gestalt wenig detaillierte Mechanik und Elektronik- Prototypen eingesetzt werden. Die Autoren Bruno und Auricht, die physische Elemente des Prototyps in Ihrem System implementiert haben, basieren diese auf mit Rapid Prototyoing Verfahren hergestellten, einfachen physische Attrappen. Barbieri, Bordegoni und Buchholz beschreiben den Einsatz von mit Rapid Prototyping Verfahren hergestellter Elektronik und elektronischen Standard-Bedienelementen. Dies ermöglicht den schnellen und effizienten Aufbau aktiver wie passiver haptischer Anwendungsfall-spezifischer Anzeigen und Bedienelemente, beispielsweise der der Mobilfonattrappe oder das automatischen Heckklappen-Öffnungssystem. Der Aufbau der Mensch-Maschine Schnittstelle des FAS nach den Ansätzen des hybriden Prototyping, also aus mehrheitlich virtuellen Prototypen und Rapid Prototyping Hardware mit geringem Abbildungsumfang und -qualität, ermöglicht signifikante Einsparungen von zeit- und kostenaufwändigen physischen Prototyping-Schritten. Damit kann ein signifikantes Frontloading von Testaktivitäten einer Fahrer-Fahrzeug Interaktion im FAS Entwicklungsprozess stattfinden. Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, ermöglicht der Einsatz von Virtual Reality Technologie die realitätsnahe Gestaltung und Positionierung visueller Anzeigen im Fahrzeug-Cockpit. Der Virtual Reality Technologie einsetzende hybride FAS Prototyp ermöglicht damit den vollständigen Tests der Anthropometrie und Ergonomie im Rahmen der Geometrieanalyse.

Damit kann zusammengefasst werden:

Hybrid Prototyping bietet eine Lösung zum effizienten und schnellen Aufbau von Anzeige- und Bedienprototypen, die zur frühzeitigen multimodalen Interaktion zwischen Fahrer und FAS genutzt werden können. Zur Lösung der ersten Forschungsfrage wird daher ein neues Testverfahren konzipiert, welches den Fahrsimulator-basierten Test und den Hybrid Prototyping Ansatz zusammenführt.

Dieses, auf der Zusammenführung beider Ansätze basierende neue Testverfahren, erweitert den in **Abbildung 74** beschriebenen Systemaufbau des Fahrsimulator-basierten Tests von FAS um verschiedene Elemente des Hybrid Prototyping Ansatzes. Die drei Kernelemente der Erweiterung sind zum Ersten der Aufbau des mechatronischen Regelsystems aus Verhaltensmodellen im CASE-Tool, gekoppelt mit Sensor- und Aktormodelle im Fahrsimulationsmodell. Zum Zweiten ist es der Einsatz desRapid Prototyping. Zum Dritten der Einsatz von Virtual Reality Technologie.

Der neue, gekoppelte Ansatz beinhaltet damit die folgenden Lösungselemente:

- Die Nutzung von **CASE-Tools** für die Erstellung von Verhaltensmodellen des mechatronischen Regelsystems: Der Steuerung, des Sensor-Steuergerätes und des Energiestellers.
- Die Abbildung von Sensoren und Energiewandler durch **Sensor- und Aktormodelle** in einem (Fahr-) Simulationsmodell.
- **Rapid Prototyping** zum Aufbau aktiver und passiver elektronischer und mechanischer Anzeige- und Bedienhardware.
- **Virtual Reality** zur positions- und lagegetreuen Darstellung CAD-basierter Anzeigen. Sowie zur Überlagerung mechanischer Anzeige- und Bedienhardware geringer Abbildungsqualität.
- **Fahrsimulatoren** für die Darstellung virtuellen Fahrumgebung, dem virtuellen Fahrzeug und Fremdfahrzeugen und Infrastruktur. Sowie zur Bereitstellung von Anzeige- und Bedienhardware für die Fahrer-Fahrzeug Interaktion.

Die Kopplung der Verhaltensmodelle, der Modelle in der Fahrsimulation, der 3D CAD Modelle und der Rapid Prototyping Elektronik wird mit **UDP Verbindungen** umgesetzt. Auch in dem gekoppelten Testverfahren verbleiben **verschiedene Lücken**, die den Aufbau eines **vollständigen FAS** nach Definition aus Kapitel 3.1 behindern.

- **Lücke 1:** Es fehlen Ansätze zum Aufbau von Prototypen des Car2X-Systems für die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur.
- **Lücke 2:** Es fehlen Ansätze zur Bereitstellung der vordefinierten, digitalen Anzeigeinhalte für die Darstellung komplexer visueller, akustischer und haptischer Anzeigen.

Das nachfolgende Kapitel dient der Beschreibung der Lösungsansätze zur Umsetzung dieser zwei Lücken und der Beschreibung des neuen Testverfahrens.

5.3 Konzeption eines neuen Testverfahrens für den frühzeitigen Beherrschbarkeits-Test

Der in Kapitel 5.1 beschriebene Ansatz von Düser zeigt eine mögliche Lösung für die Umsetzung der **Lücke 1**, **dem Aufbau eines Car2X-Systems**: Die Kommunikation zwischen virtuellem Fahrzeug und Fremdfahrzeug wird innerhalb des Simulationssystems umgesetzt. Das umgesetzte Modell entspricht einem Funktionsmodell des Sensors und Empfängers: Die Position und Geschwindigkeit der Fremdfahrzeuge wird direkt aus der Fahrsimulation übernommen. Detailliertere Car2X Modelle nutzen geometriebasierte Ansätze, in denen das Abstrahlverhalten von Sendern und Empfängern über geometrische Aspekte simuliert wird (Eichberger et al. 2017, 3). Sowie über physikalische Simulationen, die das physikalische Verhalten von Sender und Empfänger deterministisch beschreiben (Eichberger et al. 2017, 3). So werden beispielsweise Modelle basierend auf der Maxwell-Gleichung zur Beschreibung des Verhaltens elektrischer und magnetischer Felder in Interaktion eingesetzt. Wie erkennbar ist, besteht

eine starke Analogie zu der in Kapitel 3.3.3 beschrieben Modellierung von Sensoren und Aktoren, der Aufbau der Car2X Elemente kann damit wie folgt umgesetzt werden:

Sender und Empfänger des Car2X Systems werden durch Modelle im (Fahr-) Simulationsmodell abgebildet. CASE-Tools werden für die Erstellung von Car2X Verhaltensmodellen zur Auswertung der durch den Empfänger empfangenen Informationen eingesetzt. Weiterhin werden CASE-Tools zur Aufbereitung und Wandlung von Signalen der Steuerung in ein für das Sender-Modell verständliches Format eingesetzt.

Ein Ansatz zum Schluss der **zweiten Lücke** ist die Nutzung von Anzeigen Prototyping (AP) Tools zur **Bereitstellung der vordefinierten, digitalen Anzeige-Inhalte**. Wie in Kapitel 3.4.4 ausgeführt, stellen AP Tools in der heutigen FAS Entwicklung die erste computergestützten Modellierungswerkzeuge für den Aufbau und den empirischen Test von digitalen Anzeigeinhalte eingesetzt. Diese Prototypen werden zudem bereits in gekoppelten Tests im Rahmen von Mensch-Maschine Konzeptsimulationen eingesetzt und dazu auf prototypische Elektronik der Anzeigen implementiert. Zur Evaluation der Nutzbarkeit von in AP Tools erstellten, digitalen Anzeigeinhalte, wurden die in **Abbildung 80** dargestellte zwei Testsetups aufgebaut.

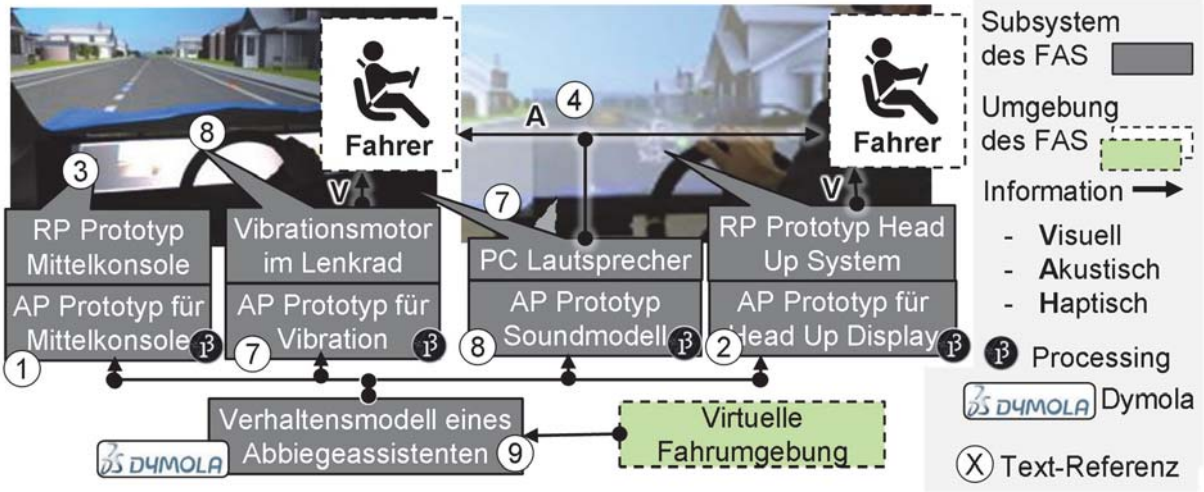


Abbildung 80: Systemarchitektur zur Evaluation der Nutzbarkeit im AP Prototypen erstellten digitalen Anzeigeinhalte im Test von FAS – (Links) Mittelkonsole, (Rechts) Head-Up Display (nach Buchholz et al. 2017b).

Im den Testsetups wurden ein AP-Prototyp einer Mittelkonsole (1) sowie einer Head-Up-Displays (2) im AP-Tool Processing erstellt und jeweils auf einer mit Rapid Prototyping Methoden hergestellten visuellen Anzeige (3, 4) dargestellt. Ebenso wurde ein Modell einer Audio-Anzeige im AP Tool Processing modelliert (5) und über konventionelle PC Lautsprecher (6) angezeigt. Und es wurde ein Vibrationssignal einer haptischen Anzeige im AP Tool Processing modelliert (7) und über Vibrationsmotoren im Lenkradkranz (8) angezeigt. Die digitalen Anzeigeinhalte sind mit einem im CASE Tool Dymola modellierten Verhaltensmodell (9) über eine UDP Verbindung gekoppelt. Dieser gekoppelte FAS Prototypwurde in den bereits durch Auricht beschriebenen Functional Drive Fahrsimulator des Fachgebietes Industrielle Informationstechnik der TU Berlin eingebunden (vergleiche Kapitel 5.1). Mit diesem Setup wurden explorative Versuche mit Probanden durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die visuelle, akustische und haptische Anzeige in Abhängigkeit zu einem virtuellen Objekt situationskonforme visuelle, akustische und haptische Entfernungs-Anzeigen und Warnungen wiedergeben kann und damit den Aufbau maschinenausführbarer, gekoppelter

FAS Prototypen ermöglicht. Wie in Kapitel 3.3.4 ausgeführt, können die digitalen Anzeigeinhalte sowohl auf 2D Bildmedien als auch durch Virtual Reality Visualisierungstechnologie wiedergegeben werden. Darüber hinaus können AP Prototypen zur Auswertung der haptischen Bedienung von Touch-Flächen eingesetzt werden.

Die Nutzung und Integration von AP-Prototypen für das Prototyping digitaler Anzeige-Inhalte für komplexe visuelle, akustische und haptische Anzeigen sowie von Touch-Bedienflächen in den hybriden FAS Prototyp wird damit als zweites Lösungselement eingesetzt.

Damit kann das neue Testverfahren zum frühen Test der Beherrschbarkeit von FAS auf Basis der folgenden sechs Lösungselemente erstellt werden:

1. Die Nutzung von **CASE-Tools** für die Erstellung von Verhaltensmodellen des mechatronischen Regelsystems: Der Steuerung, des Car2X-Systems, des Sensor-Steuergerätes und des Energiestellers.
2. Die Abbildung von Sensoren, Sender, Empfänger und Energiewandler durch **Sensor-, Car2X- und Aktormodelle** in einem (Fahr-) Simulationsmodell.
3. **Rapid Prototyping** zum Aufbau aktiver und passiver elektronischer und mechanischer Anzeige- und Bedienhardware.
4. **Anzeigen Prototyping** für die Bereitstellung vordefinierter, digitaler Anzeige-Inhalte für die Darstellung komplexer visueller, akustischer und haptischer Anzeige-Inhalte sowie von Touch-Bedienflächen.
5. **Virtual Reality** zur positions- und lagegetreuen Darstellung digitalen Anzeigeinhalte. Sowie zur Überlagerung mechanischer Anzeige- und Bedienhardware geringer Abbildungsqualität.
6. **Fahrsimulatoren** entsprechend der erarbeiteten, technischen Gestaltungsparameter-Konfiguration für die Darstellung virtuellen Fahrumgebung, dem virtuellen Fahrzeug und Fremdfahrzeugen und Infrastruktur. Sowie zur positions- und lagegetreuen Einbindung der elektronischen und mechanischen Anzeige- und Bedienhardware entsprechend der Vorgaben des 3D CAD Modells und zur Bereitstellung von Anzeige- und Bedienhardware für die Fahrer-Fahrzeug Interaktion.

Die Kopplung der Software-Tools und der Rapid-Prototyping Elektronik wird mit **UDP Datenschnittstellen** umgesetzt. Das in **Abbildung 81** visualisierte Zusammenspiel dieser Lösungselemente ermöglicht den Test des hybriden FAS Prototyps in den zwei Regelkreisen der Fahrer-FAS-Interaktion und damit den umfassenden Test der Beherrschbarkeit.

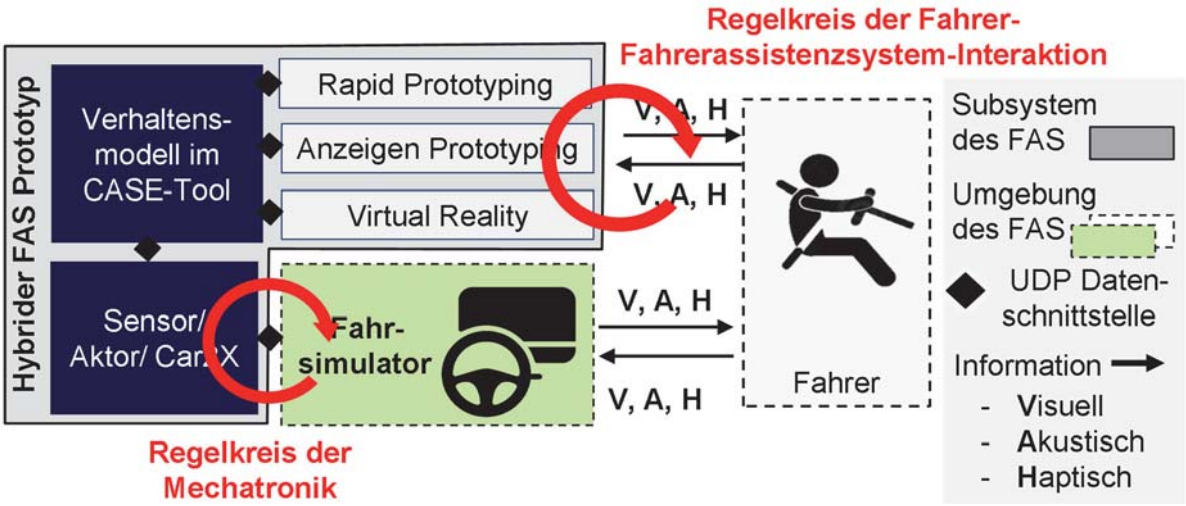


Abbildung 81: Zusammenspiel der Lösungselemente des Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Testverfahrens für den frühen Beherrschbarkeits-Test

Die Struktur des hybriden FAS Prototyps wird durch die nachfolgende **Abbildung 82** gezeigt. Dazu sind die Tools abgebildet, in denen die jeweiligen Teil-Prototypen umgesetzt und getestet werden. Es handelt sich um das Simulationssystem, das CASE-Tool, das AP Tool und das VR Tool. Die Tools sind mit UDP Datenverbindungen gekoppelt. Dazu kommen die mit Rapid Prototyping Verfahren hergestellten Anzeigen und Bedienelemente der Mensch-Maschine Schnittstelle.

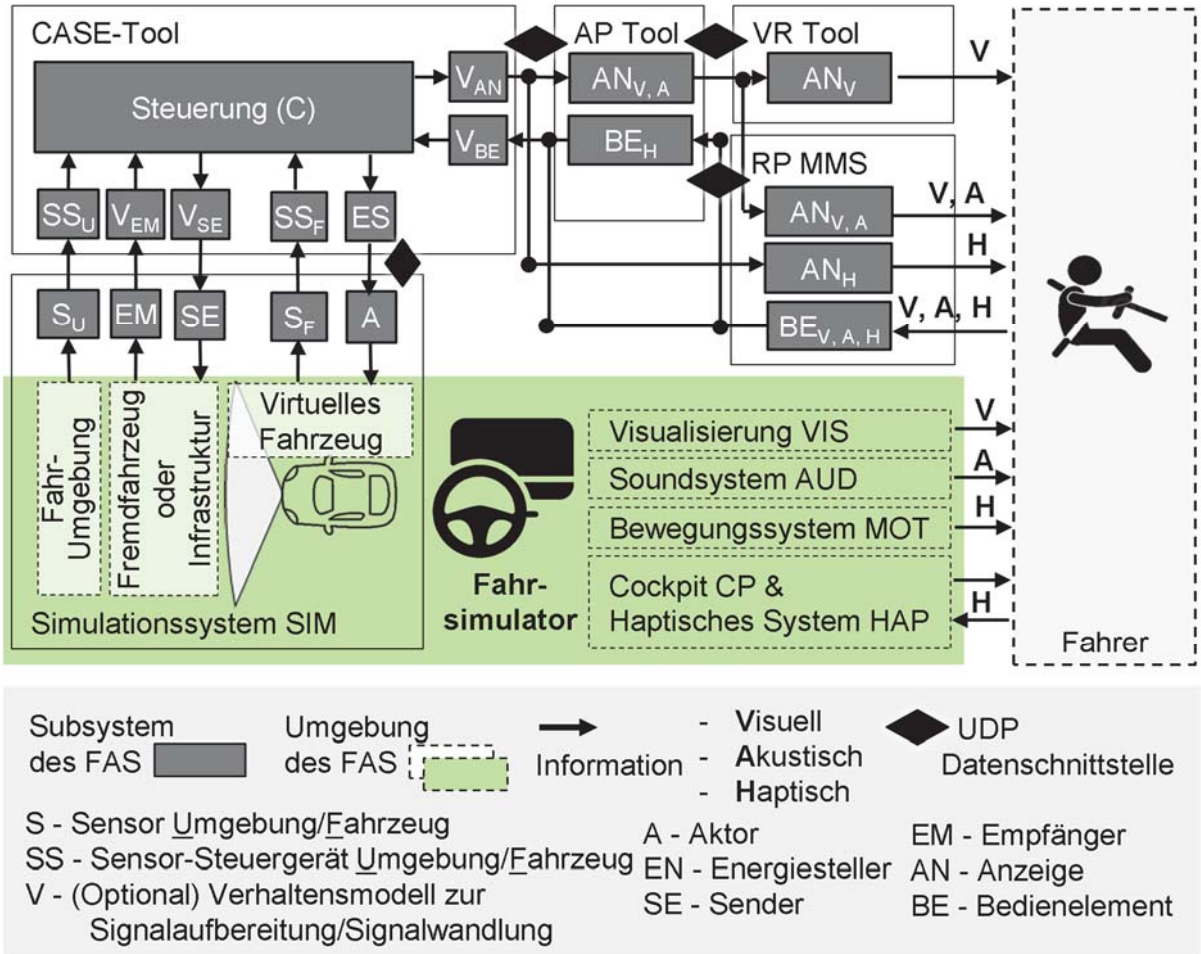


Abbildung 82: Systemarchitektur des hybriden FAS Prototyps zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit im Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren

Das abgebildete Setup stellt eine Erweiterung des durch Abbildung 79 beschriebenen Model-in-the-Loop Testverfahrens dar: Das Funktionsmodell der Software des zu testenden Systems, das mit CASE Tools erstellt wurde, wird um Mensch-Maschine Schnittstellen zu einem hybriden Prototyp erweitert. Und in Interaktion mit einem Umgebungsmodell und dem Fahrer in einem Fahrsimulator getestet.

Das neue Testverfahren soll daher im Folgenden als **Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Testverfahren** bezeichnet werden. Das HPiL Testverfahren dient dem Nachweis der Beherrschbarkeit des Fahrerassistenzsystems durch Test dessen hybriden Fahrerassistenzsystem-Prototyps in den zwei Regelkreisen der FAS-Interaktion.

Wie die Ausführung in Kapitel 3.3.3 zeigen, resultiert die Testumgebung Fahrsimulator aus einer Zusammenstellung verschiedener Interaktiver Elemente. Einige der möglichen Kombinationen wurden bereits in Kapitel 5.1 dargestellt: So kommen 2D wie auch 3D Sichtsimulationen zum Einsatz. Zur Bewegungssimulation werden mehrachsig verfahrbare Simulatoren, aber auch rein statische Sitzkisten eingesetzt. Und zur Abbildung von Mensch-Maschine Schnittstelle und Fahrstand kommen sowohl einsitzige,

modulare Sitzkisten als auch komplette Vollfahrzeuge mit bis zu fünf Sitzplätzen zum Einsatz. Die Bereitstellung und Änderung dieser so verschiedenen Fahrsimulatoren ist durch unterschiedlich hohe zeitliche und finanzielle Aufwände gekennzeichnet. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, erfordert der Test früher Prototypen eine hohe Flexibilität und Veränderbarkeit der im Test eingesetzten Testumgebung: Eine möglichst einfacher Fahrsimulator ist daher anzustreben. Anderseits muss die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug hinreichend realistisch abgebildet werden, um immersive und damit gut auf die Realität übertragbare Test zu ermöglichen sowie die Simulatorkrankheit zu reduzieren. Es stellt sich die Frage, welche Fahrsimulator-Konfiguration tatsächlich für den Test von FAS erforderlich ist. Das nachfolgende Kapitel beschreibt daher die zielorientierte Ausgestaltung der Testumgebung Fahrsimulator für den HPiL Test.

5.4 Zielorientierte Ausgestaltung der Testumgebung Fahrsimulator

Zur Erhebung der Anforderungen, die der heutigen FAS Entwicklungsprozess an Fahrsimulatoren stellt, wurden im Projekt „Fahrsimulatorlandkarte“ repräsentative Fachexperten des Fahrzeugherstellers Volkswagen aus den relevanten Entwicklungsabteilungen ausgewählt und in Experten-Interviews befragt (Hartfiel et al. 2018, S. 662-663). In den Interviews wurden die folgenden vier Fragen gestellt:

1. Wie ist das heutige Vorgehen für den Test des in der Fachabteilung zu entwickelnden Systems?
2. Was sind die Limitationen dieses Vorgehens?
3. Wie werden zukünftige Vorgehens- und Arbeitsweisen in der Entwicklung des Systems aussehen?
4. Was sind Ihre spezifischen Anforderungen an Fahrsimulatoren?

Aus den Antworten der Entwickler konnten die **Tabelle 16** gezeigten Anforderungen an Fahrsimulatoren für den Test von FAS extrahiert werden.

Tabelle 16: Anforderungen an Fahrsimulatoren für Test von FAS (Hartfiel et al. 2018, S. 663)

Nr.	Anforderung	Nr.	Anforderung
1	Hoher Immersivitätsgrad der simulierten Fahrt	8	Ermöglichung der Testbarkeit des FAS auf Funktion & Feedback
2	Minimierung der Ausfälle von Probanden durch die Simulatorkrankheit	9	Prototypische Bedienelemente und Anzeigen modular integrierbar
3	Integration einer hochauflösender Virtual Reality Visualisierung	10	Schnelle Variation der Anzeige- und Bedienelemente und des Fahrerstands
4	Virtual Reality mit Arm-/Hand-Tracking für den Test mit Nicht-Experten	11	Realistisches Feedback der primären Bedienhardware des Fahrzeugs
5	Einfacher Datenaustausch mit anderen Entwicklungsdomänen	12	Offenheit für Szenario-Datenbanken (OpenDrive, OpenScenario,…)
6	Integration des Fahrsimulators in die Toolkette der Entwicklung	13	Quantitative Messwerkzeuge: Blickdatenerfassung, Biodatenerfassung,…
7	Einsatz standardisierter Fragenkataloge		

Diese **13 Anforderungen sollen im Folgenden analysiert** werden:

In verschiedenen Probandenversuchen kann Virtual Reality Visualisierungstechnologie hinsichtlich Abbildungsumfang und Abbildungsqualität als die im Vergleich höchstwertigste Visualisierungstechnologien eingeschätzt werden (Hou 2009, S. 126; Reich et al. 2017, S. 437). Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz von den Nutzer einschließenden Visualisierungstechnologien wie großflächigen VR-Visualisierungen und VR Head Mounted Displays den umfänglichen Ausschluss von Umgebungseinflüssen (Regenbrecht 2004, S. 24). Wird die in Anforderung 3 geforderte Virtual Reality Visualisierung zur Darstellung der simulierten Fahrt eingesetzt, sind bereits drei der vier in Kapitel 2.4 gestellten Kriterien einer immersiven Testumgebung erfüllt: Ein hoher Abbildungsumfang und eine hohe Abbildungsqualität der unterstützten Sinnesmodalitäten sowie die Fähigkeit der computerbasierten Anzeige, die umgebende Realität auszuschließen. Ein Fahrsimulator, der Virtual Reality Visualisierungstechnologie einsetzt, kann einen hohen Immersionsgrad der virtuellen Fahrt entsprechend Anforderung 1 ermöglichen. Zur Erfüllung des fehlenden vierten Kriteriums an eine Immersion, der hohen Anzahl der unterstützten Sinnesmodalitäten, erfordert neben einer Visualisierung auch eine Geräusch- und Bewegungssimulation. So existiert beispielsweise der Bedarf nach hochdynamischen Fahrsimulatoren, die eine Beurteilung ermöglichen, ob der Fahrer die Fahrzeugkontrolle auch bei Erreichung der Systemgrenze übernehmen kann (Brandenburg et al. 2017, S. 286). Und auch Bewegungssimulation zur synthetischen Nachbildung der Reize, die die Fahrzeugfahrt auf die kinästhetische Wahrnehmung des Menschen ausübt, wird als wichtig angesehen (Negele 2007, S. 38). Ein realistisches Feedback der primären Bedienhardware des Fahrzeugs ist daher ein weiteres wichtiges Element zur Erzeugung eines Fahrsimulators, der eine hochimmersive Fahrt ermöglicht.

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, resultiert die in Anforderung 2 benannte „Simulatorkrankheit“ aus Wahrnehmungskonflikten zwischen visueller und haptischer Bewegungswahrnehmung. Obwohl die Wahrnehmungsmechanismen, die zu Symptomen wie Übelkeit, Kopfschmerzen oder Erbrechen führen, noch nicht vollständig verstanden sind, zeigen verschieden Studien positive Auswirkungen des Einsatzes von Bewegungssimulationen, des Einsatzes von Visualisierung mit hohem Abbildungsgrad und Abbildungsumfang, sowie einer geringen Latenz zwischen Visualisierung und Bewegungssystem (Reich 2017, S. 93; Kolansinski 1995, S. 4). Studien zeigen darüber hinaus reduzierte Symptome der Simulatorkrankheit wenn Probanden Vorerfahrungen im Simulator haben (Kolansinski 1995, S. 19). Werden Virtual Reality Head Mounted Displays für die Visualisierung genutzt, ist der eigene Körper für den Probanden nicht sichtbar. Dies limitiert die Immersion der virtuellen Szene für den Probanden. Darüber hinaus limitiert die fehlende Sichtbarkeit der Extremitäten die Beurteilbarkeit von Bedienvorgängen insbesondere für Nicht-Experten. Anforderung 4 fordert ein Hand- sowie Arm-Tracking zur sensorischen Aufnahme der betreffenden Extremitäten und Einspielung dieser mit einer virtuellen Repräsentanz in die virtuelle Szene. Ziel ist es, die die sonst durch das Head Mounted Display verdeckten Extremitäten für den Fahrer sichtbar zu machen.

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, sind heutige Entwicklungsprozesse durch fehlende Systematik, Durchgängigkeit und Standardisierung von Testmethoden und -werkzeugen gekennzeichnet. Der durch die Anforderungen 5 und 6 beschriebene einfache Datenaustausch mit anderen Entwicklungsdomänen sowie eine Integration des Fahrsimulators in die Toolkette der Entwicklung sind mögliche Lösungselemente, diesen Herausforderungen zu begegnen. Die durch Anforderung 12 geforderte Nutzung stan-

dardisierter Testfälle, wie sie Szenario-Datenbanken wie OpenDrive oder OpenScenario zur Verfügung stellen, stellt eine weitere Unterstützung der Formalisierung und Standardisierung der Fahrsimulator-Nutzung dar. OpenDrive ist ein offenes Format zur Beschreibung von Straßen-Netzwerken (vergleiche Dupuis et al. 2010; VIRES Simulationstechnologie GmbH 2018a). OpenScenario dient der Beschreibung von dynamischen Inhalten in Fahrsimulations-Anwendungen (VIRES Simulationstechnologie GmbH 2018b). Dies beinhaltet alle für den Aufbau von Fahrszenarien relevanten Informationen: Standardkataloge zur Bereitstellung von dynamischen Objekten wie Umgebungsfahrzeugen oder Fußgängern, von Wettereinflüssen sowie der Fahrmanöver, der Startbedingungen, Routen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Objekte, die zu kritischen Verkehrssituationen führen.

Die Herausforderung einer fehlenden Flexibilität von Fahrsimulatoren ist mit den Anforderungen 9 und 10 verknüpft. Ein Lösungsansatz ist der Einsatz modular integrierbarer Anzeigen und Bedienelemente. Wie in Kapitel 3.1.3 ausgeführt, bezeichnet Modularität die Zerlegung eines Systems in einzelne unabhängige Subsysteme mit klar definierten Schnittstellen und ermöglicht die unabhängige Subsystem-Entwicklung sowie die einfache Integration der Subsysteme in das Gesamtsystem. Die schnelle Variation der Anzeige- und Bedienelemente und des Fahrerstands ermöglicht mit den großen Änderungen anthropometrischer und ergonomischer Gestaltungsmerkmale in frühen Entwicklungsphasen umzugehen.

Es wird die Anforderung der Integration quantitativer Messwerkzeuge gestellt. Die Erfassung quantitativer Daten ist beispielsweise durch Blickdatenerfassung mittels Eye Tracking Technologie (vergleiche Bubb 2015, S. 630ff) oder der Erfassung von Biodaten wie Herzfrequenz, Haut- oder Hirnaktivität über entsprechendes, spezialisiertes Messequipment (vergleiche Auricht 2018, S. 63ff) möglich. Aber auch die Erfassung von Fahrdaten wie Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Lenkwinkel aus der Fahrsimulationsumgebung oder die Aufnahme von Videodaten fällt in diese Kategorie. Dazu sollen standardisierte Fragenkataloge genutzt werden. Wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, sind verschiedene, standardisierte Fragebögen gebräuchlich: Beispielsweise der „NASA TLX Questionaire“ zur Erhebung der Beanspruchung durch eine Aufgabe (Hart und Staveland 1988) oder der Fragebogen zur „Wahrgenommenen Nützlichkeit und Nutzbarkeit einer Informationstechnologie“ (Davis 1989).

Zuletzt verdeutlicht die Anforderung 8 „Ermöglichung der Testbarkeit des Fahrassistenzsystems auf Funktion & Feedback“ noch einmal den Bedarf nach einer Lösung, wie sie in der vorliegenden Arbeit angestrebt wird. Diese sollte in einem Fahrsimulator stattfinden, der eine modulare Integration und Variation prototypischer Bedienelemente und Anzeigen ermöglicht, sowie des Cockpits, um so mit frühen Prototypen und deren hohem Veränderungsgrad umgehen zu können.

Zur Erfüllung der 13 Anforderungen wurde im Projekt „Fahrsimulatorlandkarte“ die in **Abbildung 83** dargestellte Fahrsimulator-Konfiguration erarbeitet (Hartfiel et al. 2018, S. 664). Vier Fidelity-Stufen „Kein (K)“, „Generisch (G)“, Repräsentativ (R)“ und „Spezifisch (S)“ bilden die Grundlage der Konfiguration, wobei Stufe K die kleinste Ausprägung und Stufe S die größte Ausprägung darstellt. **Anhang C** beinhaltet die detaillierten Spezifikationen der vier Fidelity-Stufen.

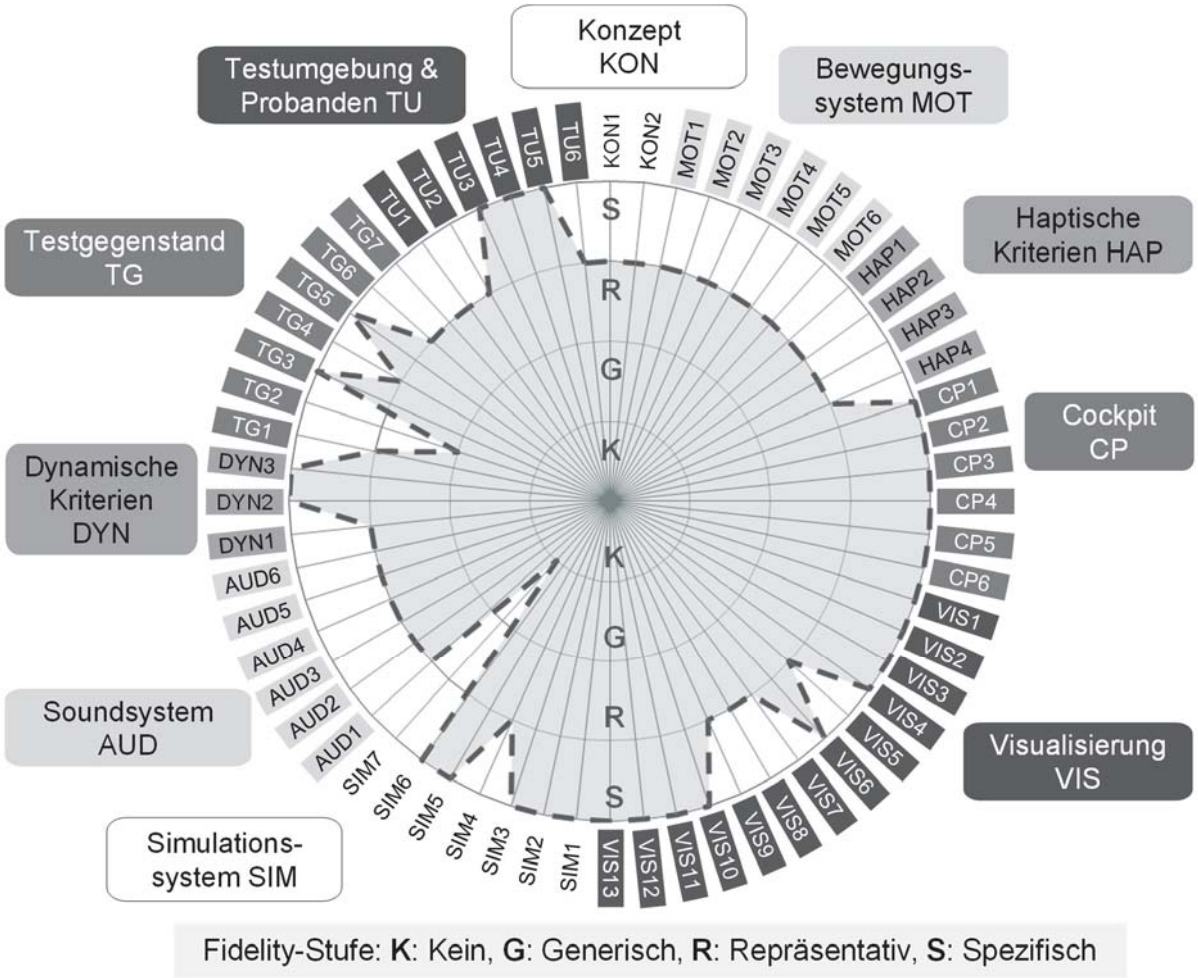


Abbildung 83: Gestaltungsparameter-Konfiguration eines Fahrsimulators für den Test von FAS (nach Hartfiel et al. 2018, S. 664)

Die Konfiguration lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. **Konzept** (KON1, KON2): Fest installierter Fahrsimulator mit allen Sitzreihen.
2. **Visualisierung** (VIS1-VIS13): Sichtfeld, Sichtweite, Auflösung, Echtzeitfähigkeit, 3D Effekte und Qualität identisch zum Original. Leichte Einschränkungen sind akzeptabel hinsichtlich Farben, Bewegungseffekten, atmosphärischen Effekten sowie der Framerate der Visualisierung.
3. **Bewegungssystem** (MOT1-MOT6): Repräsentatives Bewegungssystem, welches Amplitude, Bewegungsrichtung und Frequenzen mit kleinen Abweichungen vom Original darstellt.
4. **Soundsystem:** Fahrzeug- und Umgebungsgeräusche werden ohne wahrnehmbare Störgeräusche des Simulators exakt, aber nicht vollständig realistisch in 360° dargestellt. Dynamische Soundeffekte sind nicht relevant.
5. **Cockpit (**CP1-CP6): Spezifisches Cockpit, welches das Original exakt repliziert und vollständig variierbar wiedergibt.
6. **Haptisches System** (HAP1-HAP4): Lenkrad und verschiedene Shaker geben die Kräfte und Vibrationen im Cockpit realistisch wieder. Abweichungen zur Realität sind zulässig.
7. **Fahrzeugdynamik** (DYN1-DYN3): Detailliertes, für den gesamten Arbeitsbereich validiertes Fahrdynamik-Modell. Die Validierung basiert zum Teil auf Realversuchen.

8. **Simulationssystem** (SIM1-SIM7): Größtenteils spezifisches Simulationsmodell, welches hochwertige Umgebungsmodelle mit hohem Detailgrad und reaktiven Fremdverkehr beinhaltet. Die Szenarien sind von hoher Komplexität, eine Anpassung ist während des Versuchs möglich. Ein virtuelles Fahrermodell ist nicht erforderlich.
9. **Testgegenstand** (TG1-TG7): Prototypischer Softwarecode sowie alte Geräte, Elektronik-Baukastenelemente oder Standardelemente gekoppelt mit Functional Digital Mock Ups des virtuellen Prototyps. Es gelten harte Echtzeitanforderungen, die Prototypen sind mit mittlerem Aufwand einzubinden. Ein Datenaustausch mit der IT Umgebung findet über dedizierte Schnittstellen statt.
10. **Testumgebung** (TU1-TU6): Es werden wiederverwendbare und vollumfängliche Aufnahmemethoden der auf nach ISO-Standards vorbereiteten Szenarien durchgeführten Tests eingesetzt. Das Feedback der ausgewählten Probanden wird mit standardisierten Methoden ausgewertet.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit weicht jedoch von dem Projekt „Fahrsimulatorlandkarte“ ab. Wo in diesem ein vollumfänglicher Test des FAS ermöglicht werden soll, liegt der Fokus der Arbeit auf dem Test dessen Beherrschbarkeit. Dieser Test soll dazu früher als im Stand der Technik stattfinden.

Entsprechend zeigt eine Analyse der durch das Projekt vorgeschlagenen Konfiguration folgende **Einschränkungen**:

Im Gegensatz zum vollumfänglichen Test von FAS erfordert der Test der Beherrschbarkeit **nicht alle Sitzreihen, es wird lediglich der Fahrersitz** benötigt: Der **Konzept-Gestaltungsparameter KON2** muss daher angepasst werden. Die Nutzung von Verhaltensmodellen anstatt Software-Code führt zu einer Anpassung der Gestaltungsparameter **Reifegrad des Software-Prototyps (TG1)** und **Echtzeit-Anforderung des Prototypen Tests (TG7)**. Wie die Ausführungen zum Model-in-the-Loop Test in Kapitel 3.3 zeigen, erfüllen Verhaltensmodell-basierte Testverfahren keine harten, sondern nur weiche Echtzeitanforderungen. Eine Überschreitung von Zeitbedingungen, beispielsweise bei dem periodischen Auslesen eines Sensors oder während der Bildgenerierung eines Visualisierungssystems, ist bis zu einem bestimmten Umfang akzeptabel. Für die positions- und lagegetreue virtuelle Darstellung visueller Anzeigen sowie die Überlagerung von haptischen Anzeigen durch eine stereoskopisch visualisierte Repräsentation muss der Fahrsimulator Virtual Reality Visualisierungstechnologie unterstützen**.** Ein Fahrsimulator, der diese Anforderung vollständig umsetzt, reduziert das physische MockUp auf ein Minimum und bildet das komplette Innenraummodell virtuell ab (Lindemann 2016, V-4.9.7). Entsprechend wird die Ergonomie des Fahrsimulators, beschrieben durch den **Parameter CP6**, für das neue Testverfahren nur für im Versuch relevante Elemente vollständig abgebildet. Im hybriden Prototyp bilden die visuellen Anzeigen ihre realen Gegenstücke nur funktional und grafisch ab. Haptische und auditive Anzeigen wie auch Bedienelemente werden so weit wie möglich abstrahiert. Die Parameter **CP1 (Realismus Anzeige)** und **CP2 (Realismus Bedienelement)** des Fahrsimulators für das neue Testverfahren müssen entsprechend angepasst werden. Es kann zusammengefasst werden:

Es ist eine vom Projekt „Fahrsimulatorlandkarte“ abweichende Gestaltungsparameter-Konfiguration eines Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit erforderlich.

Diese resultierende **Gestaltungsparameter-Konfiguration** ist in **Abbildung 84** mit einer durchgehenden Linie markiert dargestellt. Die Gestaltungsparameter-Konfigura-

tion des Projektes „Fahrsimulatorlandkarte“ ist zum Vergleich eingebettet. Die vollständige Beschreibung der Gestaltungsparameter der Fahrsimulator-Konfiguration für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit ist **Anhang C** zu entnehmen.

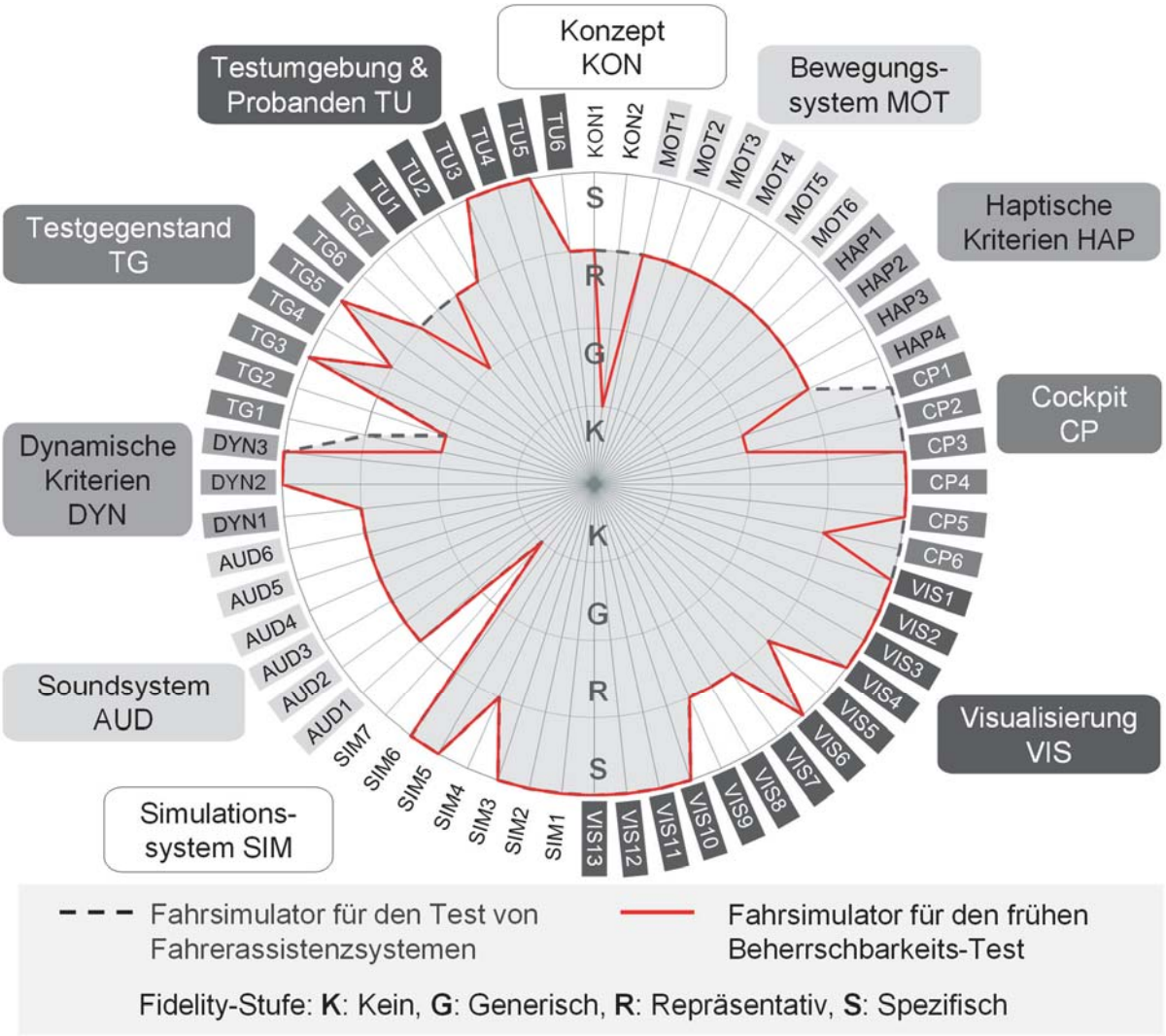


Abbildung 84: Gestaltungsparameter-Konfiguration des Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit

Die Gestaltungsparameter, im Detail in **Anhang C** beschrieben, sind jedoch zu unspezifisch um direkt in ein technisches Setup umgesetzt zu werden. Um einen für den Beherrschbarkeits-Test nutzbaren Fahrsimulator aufbauen zu können, müssen die Gestaltungsparameter daher in spezifische, technische Parameter übersetzt werden:

Es muss eine Transformation der Gestaltungsparameter-Konfiguration in eine technische Gestaltungsparameter-Konfiguration stattfinden.

Die **Visualisierung** soll durch Virtual Reality Technologie hoher Abbildungsqualität und von hohem Abbildungsumfang umgesetzt werden. Um die Lesbarkeit von Verkehrsschildern zu ermöglichen, erfordert eine hohe Visualisierungsqualität eine Auflösung von mindestens 1 Bogenminuten/Pixel (Negele 2007, S. 30). Zur Darstellung eines Bildwechsels unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle ist eine Framerate (Bildwiederholrate) von 60Hz erforderlich (nach Negele 2007, S. 32). Ist die Framerate geringer, nimmt der Mensch Latenzen im Bildaufbau wahr. Das Bild wird durch ein Sichtfeld „identisch zum Original“ abgebildet. Den Ausführungen in Kapitel 2.4 folgend, muss ein Sichtfeld dazu 180° bis 220°, idealerweise 360° horizontalem

Sichtbereich umfassen. Das vertikale Sichtfeld des Fahrsimulators bestimmt die Immersion: Es muss so gestaltet sein, dass der Proband nicht über dieses hinaus die Umgebung wahrnehmen kann. Da die Höhe der Fahrzeug-Frontscheibe den vertikalen Sichtbereich des Fahrers beschränkt, kann bei Nutzung eines umfänglichen physischen Fahrzeug-Cockpits oder eines Realfahrzeugs für eine Darstellung der Fahrumgebung eine entsprechend limitierte Höhe von 40°-60° visualisiert werden (Negele 2007, S. 23). Bei einer vollständig virtuellen Darstellung des Fahrzeugs ist jedoch auf eine vertikal umfassende Visualisierung des Fahrzeug-Innenraumes zu achten. Daher ist eine Visualisierung der 150° des Sichtfeldes eines einzelnen Auges erforderlich. Die Sichtweite kann in Halte- und Überholsichtweite aufgeteilt werden und umfasst je nach Szenario von 185m (Haltesichtweite) bis zu 600m (Überholsichtweite) (Vetters 2012, S. 77ff). Die empfohlene Helligkeit für Fahrsimulatoren beträgt 10.000 cd/m2 (Reich et al. 2017, S. 435). Ein Dolby Surround **Soundsystem**, bestehend aus fünf um den Fahrer angeordneten Lautsprechern sowie zwei Subwoofern wird als geeignet angesehen, einzelne Fahrzeugs- und Umgebungssounds exakt wiederzugeben (Reich et al. 2017, S. 442). Störgeräusche, beispielsweise des Bewegungssystems, müssen durch technische Maßnahmen wie Noice Cancelling, also die aktive Unterdrückung von Geräuschen durch überlagerte Schallwellen, ausgeblendet werden.

Das **Bewegungssystem** muss die translatorischen sowie rotatorischen Bewegungen des Fahrzeugs skaliert, aber realitätsnah abbilden. Das dafür erforderliche Bewegungssystem basiert typischerweise auf einem Hexapod mit sechs Freiheitsgraden (DOF), der eine Aufbau-Bewegungsfrequenz von bis zu 1,5Hz und eine Auslenkung des Aufbaus von 25 Grad umsetzen kann (Negele 2007, S. 38–49). Das Bewegungssystem sollte Beschleunigungen von 2,5m/s² in Längsrichtung, 6m/s² in Querrichtung sowie eine Auslenkung von 150mm in Hochrichtung umsetzen können (Negele 2007, S. 43). Sowohl die primären Anzeigen und Bedienelemente Lenkrad und Pedalerie wie auch die nicht zum FAS Prototyp gehörigen sekundären und tertiären Anzeigen und Bedienelemente im **Cockpit** müssen hinsichtlich Funktion und Form vergleichbar zu realen Instrumenten ausgeführt sein. Lenkrad und Pedalerie müssen eine teilweise exakte Replikation ihrer Gegenstücke hinsichtlich Oberflächenbeschaffenheit, Form, Lage und Kraft-Weg Verlauf sowie ihrer Reaktionen auf Bedieneingaben sein. Die Hard- und Software der sekundären und tertiären Anzeigen und Bedienelemente müssen originalen modular austauschbar sein. Die für den Test wichtige Ergonomie wird in hoher Abbildungsqualität nah dem realen Gegenstück, der Rest mittels Rapid Prototyping Hardware, hybriden Prototypen oder vollständig durch virtuelle Elemente abgebildet. Der Fahrersitz muss sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ergonomisch dem Original vergleichbar sein. Ein 3-Punkt Gurt ist erforderlich.

Für das **haptische System** des Fahrsimulators sind Shaker an Pedalen, im Fußraum sowie am Lenkrad zur Anzeige der Vibrationen des Fahrzeugs an den Fahrer erforderlich. Zusätzlich wird ein Lenksystem mit Force Feedback eingesetzt. Dieses muss für die Abbildung der PKW Normalfahrt geeignet sein und dazu eine schnelle Regelung von über 200Hz, die Darstellung von hochfrequenten fahrbahn- oder fahrzeuginduzierten Schwingungen sowie ein Nenndrehmoment von mehr als 7Nm ermöglichen (Negele 2007, S. 56). Das grundlegende **Konzept** des Fahrsimulators wird maßgeblich durch drei Gestaltungselemente bestimmt: Dem Bedarf nach der Einbindung nur des Fahrersitzplatzes anstatt allen Sitzreihen, dem Bewegungssystem und der Visualisierung. Speziell die Größe eines Hexapod mit sechs Freiheitsgraden sowie die dort wirkenden Kräfte erfordern eine feste Installation des Fahrsimulators, gegebenenfalls sogar in speziellen Räumlichkeiten. Das der **Fahrzeugdynamik** zugrundeliegende

Fahrdynamikmodell muss detailliert und im Arbeitsbereich validiert sein, die Validierung muss teilweise auf Realfahrttest basieren. Das **Simulationsmodell** erfordert einen hohen Detailgrad. So müssen Szenario und Umgebung mit realistischem Straßenverlauf, Verkehr und Umgebung in hoher Komplexität hinsichtlich Längs- und Querdynamik bis hin zu kompletten Städten abgebildet werden. Szenariodatenbanken wie OpenScenario und OpenDrive stellen dafür die Elemente bereit. Zur Abbildung der Reaktion der abgebildeten Verkehrsteilnehmer, sowohl der Fahrzeuge als auch der Menschen, sind regelungstechnische Mensch-Modelle entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.3.3 erforderlich. Das gesamte Szenario muss während des Versuchs veränderbar sein. Die **Testumgebung** muss die Aufnahme quantitativer Daten des Tests sowie des Probanden ermöglichen, es müssen Fahrdaten wie Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Lenkwinkel sowie Videodaten erfasst werden können. Zu Erhebung qualitativer Daten sind darüber hinaus wiederverwendbare Fragebogen bereitzustellen. Als Probanden werden ausgewählte Testpersonen eingesetzt.

Abbildung 85 fasst die **technische Gestaltungsparameter-Konfiguration** des Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit zusammen.

Abbildung 85: Technische Gestaltungsparameter-Konfiguration des Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit

Die technische Gestaltungsparameter-Konfiguration erlaubt den Beherrschbarkeits-Test vollständiger FAS, in denen alle Systemelemente entsprechend der in Abbildung 21 eingeführten, technischen Systemdarstellung von FAS enthalten sind. Der Test weniger komplexer, unvollständiger FAS, stellt gegebenenfalls geringe Anforderungen an die technischen Gestaltungsparameter. So beinhaltet beispielsweise das in Kapitel 5.1 durch Auricht beschriebene Stauassistenzsystem keine Anzeigen und Bedienelemente. Ein Test der Beherrschbarkeit dieses nur aus dem mechatronischen Regelsystem bestehenden FAS erfordert keine physische Anzeige und Bedien-Elektronik sowie keine CAD-basierte, virtuelle Anzeige. Auch eine geringere Komplexität des Einsatzbereiches kann zu verringerten Anforderungen an die Testumgebungen führen. So ist das Stauassistenzsystem nur für den Anwendungsfall der Autobahnfahrt ausgelegt, die den Ausführungen in Kapitel 4.1 folgend die im Vergleich geringste Komplexität aufweisen. Die Anforderungen an die Gestaltungsparameter des Simulationsmodelles, beispielsweise Passanten, Szenario- und Umgebungsmodell oder Komplexität des Streckenverlaufs, sind entsprechend geringer.

Geringere Szenariokomplexitäten können darüber auch Anforderungen an die anderen Elemente reduzieren. Insbesondere für die konzeptbestimmenden Systemelemente, das Bewegungs-und das Visualisierungssystem, ist eine solche Reduktion wünschenswert, da Kosten und Installationsaufwand signifikant reduziert werden können. Beispielsweise stellt das Szenario Autobahnfahrt keine signifikanten Anforderungen an eine Querbeschleunigung. Und auch die 360° Visualisierung ist nicht erforderlich. Die erarbeitete technische Gestaltungsparameter-Konfiguration stellt daher die **maximale Ausprägung** des Fahrsimulators für den frühen Beherrschbarkeits-Test dar. Je nach spezifischen Testgegenstand und Testszenario können aber auch **skalierte Ausprägungen des Fahrsimulators für den frühen Beherrschbarkeits-Test**, die keine vollumfänglichen Tests aller möglichen FAS erlauben, im Beherrschbarkeits-Test eingesetzt werden.

Das nachfolgende Kapitel dient der Analyse des neuen HPiL Testverfahrens hinsichtlich der Umsetzung der in Kapitel 4.3 skizzierten Potentiale.

5.5 Analyse des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens und Synthese zur ersten Forschungshypothese

Die nachstehende **Abbildung 86** zeigt den Systemaufbau des hybriden FAS Prototyps im Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens entsprechend der in Abbildung 21 eingeführten Konventionen zur Darstellung eines vollständigen FAS.

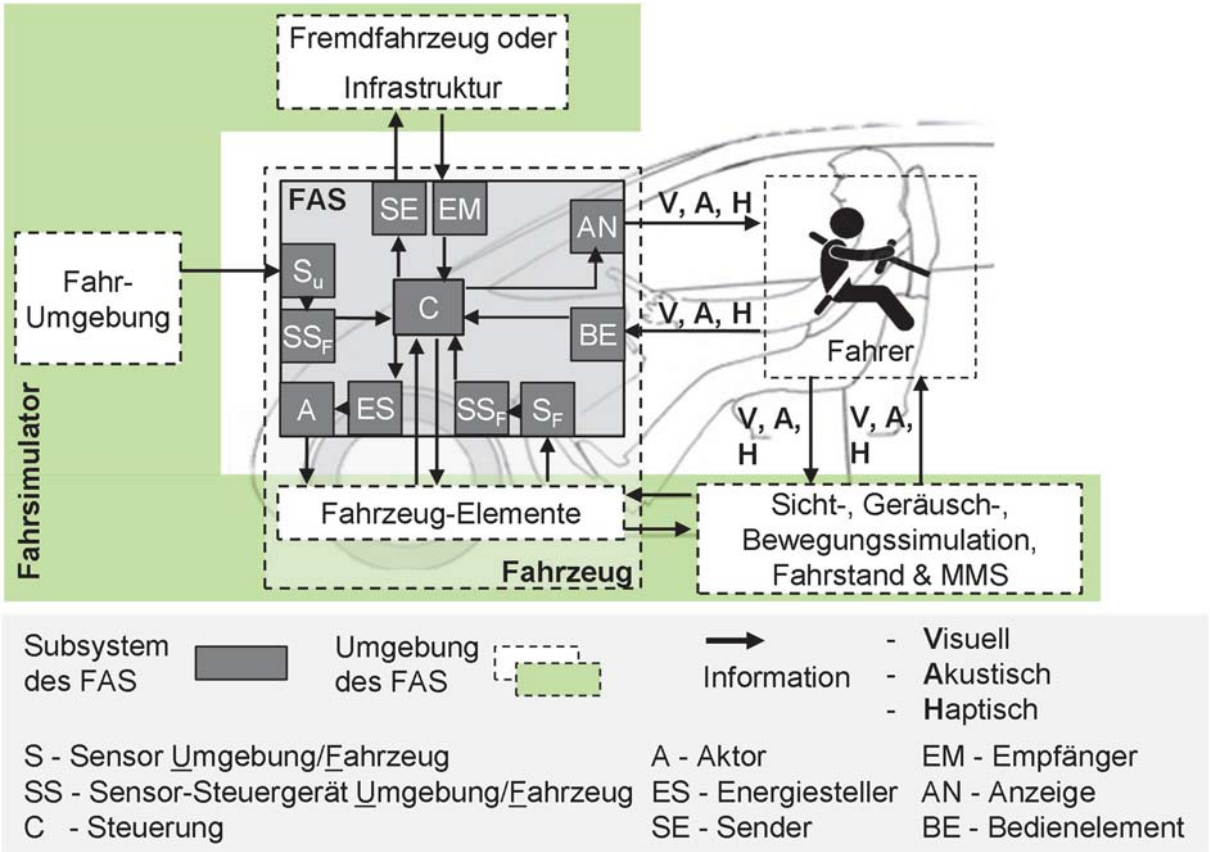


Abbildung 86: Systemaufbau des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens für den frühen Beherrschbarkeits-Test von FAS

Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.3 setzt sich der **hybride Fahrerassistenzsystem-Prototyp** aus den folgenden Elementen zusammen:

- Dem durch Verhaltensmodelle im CASE-Tool dargestelltem **virtuellen Steuerungsprototyp (C)** für die Verarbeitung der eingehenden Informationen von Sensoren, Bedienelementen, Empfängern und anderen Fahrzeug-Elementen, der Interpretation dieser Informationen sowie der Berechnung der Ansteuersignale für die Aktoren, der Ansteuerung von Anzeigen und Sendern oder der Informationsweitergabe an andere Fahrzeug-Elemente.
- Der virtuellen Fahrzeug- und Umfeld-Sensorik für die Erfassung und Evaluation des virtuellen Fahrzeugs und dessen Verhalten sowie der virtuellen Fahrzeug-Umgebung. Der **Messfühler (S)** ist durch Sensorsimulationsmodelle abgebildet, die zum **Sensor-Steuergerät (SS)** zusammengefassten Elemente Signalaufbereitung, -wandlung und -verarbeitung durch Verhaltensmodelle.
- Dem **virtuellen Sender (SE)** und **virtuellen Empfänger (EM)** für die Car2X-Kommunikation mit anderen Fahrzeugen beziehungsweise der Infrastruktur. Sender wie Empfänger werden durch virtuelle Modelle in der Simulationsumgebung sowie Verhaltensmodelle zur Informations-Aufbereitung Wandlung und Auswertung dargestellt.

- Einer virtuellen Aktorik, bestehend aus dem durch Verhaltensmodelle dargestelltem **virtuellen Energiesteller (ES)** und dem in Aktor-Simulationsmodellen dargestelltem **virtuellen Energiewandler (A)**, für die aktive Unterstützung der lateralen oder longitudinalen Steuerung des virtuellen Fahrzeugs.
- Hybriden Mensch-Maschine Schnittstellen, zusammengesetzt aus **hybriden Anzeigen (AN)** und **hybriden Bedienelementen (BE)**, für die direkte Interaktion zwischen Fahrer und FAS und der Wiedergabe von Warnungen. Es werden physische Anzeige- und Bedienelement-Hardware mit vordefinierten, digitalen Anzeigeinhalten gekoppelt und Positions- und Lagegetreu mit Virtual Reality Technologie dargestellt.

Die **hybride Testumgebung Fahrsimulator** ist zusammengesetzt aus:

- Dem in der Simulationsumgebung dargestellten **virtuellen Fahrzeug**, zur Simulation des Verhaltens der Fahrzeug-Elemente sowie deren Interaktion mit Fahrer und Fahrumgebung.
- Der in der Simulationsumgebung dargestellten **virtuellen Fahrumgebung**, die Umgebung, Fremdfahrzeuge sowie die Infrastruktur und deren Verhalten umfasst.
- Den **hybriden Anzeigen** und **Bedienelementen** des Fahrsimulators zur Interaktion zwischen virtuellem Fahrzeug und Fahrer. Neben den primären Fahrer-Fahrzeug-Schnittstellen Lenkung, Fahrpedal und Bremspedal, können weitere sekundäre und tertiäre Fahrer-Fahrzeug-Schnittstellen eingebunden sein. Dazu kommen die Anzeigen des Fahrsimulators zur Wiedergabe der virtuellen Fahrumgebung: Das Bewegungssystem und die Elemente der Sicht- und Geräuschsimulation.

Im Abgleich mit den Ausführungn in Kapitel 3.1.4 sowie der durch **Abbildung 21** beschriebenen, technische Systemdarstellung von Fahrerassistenzsystemen, kann damit zusammengefasst werden:

Das Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren ermöglicht somit eine vollständige Abbildung des in Kapitel 3.1 beschriebenen FAS des Standes der Technik.

Exemplarisch kann dies an dem in Kapitel 3.1.4 eingeführten Beispiel des VW Parklenkassistenzsystems gezeigt werden: **Abbildung 87** zeigt eine mögliche Zusammensetzung eines hybriden FAS Prototyp zum Beherrschbarkeits-Test. Der Anwendungsfall Einparken erfordert eine 360° Visualisierung und Audio-Simulation, da sowohl das Fahrzeug selbst wie auch die Parklücke durch den Fahrer gesehen und umgebende Objekte gehört werden müssen. Wegen der geringen Beschleunigungen beim Parken ist jedoch kein Bewegungssystem erforderlich. Ein Fahrsimulator, der konzeptionell eine stereoskopische Visualisierung (VIS), ein Dolby Surround Soundsystem (AUD) sowie eine statische Sitzkiste ohne Bewegungssystem bereitstellt, erfüllt die Anforderungen des Anwendungsfalles. Ein solcher Fahrsimulator der Firma Volkswagen (1) ist in **Abbildung 87** dargestellt (nach Seiffert und Rainer 2008, S. 64). Das Simulationssystem IPG Carmaker ist bei Volkswagen im Einsatz (IPG Automotive GmbH 2018b) und wird im Anwendungsfall zur Sensor- und Aktor-Simulation (2) sowie zur Simulation von Fahrzeug und Fahrtumgebung (3) eingesetzt.

Dazu soll exemplarisch soll der Einsatz des CASE-Tools Dymola und des AP-Tools Processing angenommen werden. Dymola, in der Abbildung exemplarisch für die Erstellung eines Steuerungsprototyps (4) eingesetzt, wird in der heutigen Fahrzeugentwicklung beispielsweise in der Modellierung und Simulation von Antriebssträngen eingesetzt (Störmer et al. 2014, S. 167). Processing, in der Abbildung zur Modellierung

der visuellen Anzeige im Mittelbildschirm (5) eingesetzt, ist beispielsweise in der Gestaltung von Mensch-Maschine Schnittstellen bei Google oder Intel im Einsatz (Processing Foundation 2019). Als Baukasten-Hardware werden ein originaler Taster aus dem Kfz-Bereich (6) sowie ein Mikrocontroller aus dem Elektronik Prototyping (7) bereitgestellt. Die Implementierung des funktionalen AP-Prototyps in das virtuelle 3D CAD-Modell des Fahrzeugcockpits ermöglicht die stereoskopische Visualisierung der digitalen Anzeigeinhalte mit dem Virtual Reality Head Mounted Display (8).

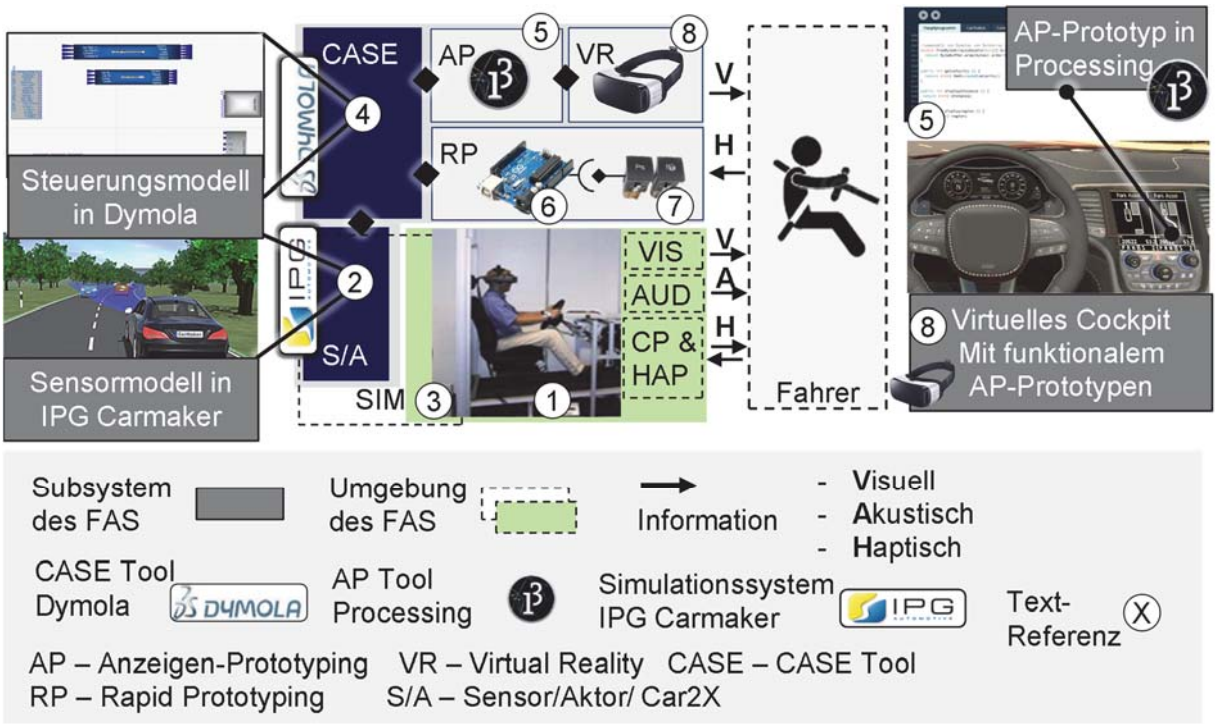


Abbildung 87: Möglicher Aufbau eines hybriden FAS Prototyps zum Test des VW Parklenkassistenzsystems (Bildquellen: IPG Automotive GmbH 2018b; Arduino Project 2018; Seiffert und Rainer 2008, S. 64)

Das HPiL Testverfahren ermöglicht die Umsetzung verschiedener, in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Trends in der Gestaltung von FAS. So ermöglicht die klare Trennung zwischen Steuerung, Sensor-Steuergerät und Sensor die Umsetzung von **Sensorfusions-Architekturen**. Durch Hinzufügen zusätzlicher Verhaltensmodelle zur Signal-Assoziation, Filterung und Synchronisation können **funktionale Rechencluster** abgebildet werden. Auch die Abbildung der **Vernetzung** verschiedener FAS in konkurrierender, aber auch kooperierender Bauweise, ist möglich.

Abbildung 88 zeigt exemplarische die Struktur eines hybriden FAS Prototyps für die Sensor-Fusion (links oben) und für einen funktionalen Rechencluster (links unten) in einem Setup mit zwei Messfühlern S1 und S2. Zur Sensor-Fusion werden beide Messfühler durch dasselbe Sensor-Steuergerät SS ausgewertet und die Signale bedarfsgerecht an zwei Steuergeräte C1 und C2 verteilt. Im funktionalen Rechencluster werden die Signale von zwei Sensor-Steuergeräte SS1 und SS2 in einem neuen Verhaltensmodell assoziiert, gefiltert und synchronisiert und anschließend an die Steuerung C weitergegeben. Konkurrierende und kooperierende FAS werden rechts in der Abbildung gezeigt. Es greifen zwei Steuerungen C1 und C2 über das jeweilige Energiestellen-Verhaltensmodell ES1 und ES2 auf denselben Energiewandler A zu. Im konkurrierenden Setup (rechts oben) findet kein Datenaustausch zwischen den Steuergeräten statt, es können widersprüchliche Zugriffe beispielsweise auf das Bremssystem des

Fahrzeugs stattfinden. Im kooperierenden Setup (rechts unten) dagegen findet eine Abstimmung beider Steuergeräte statt.

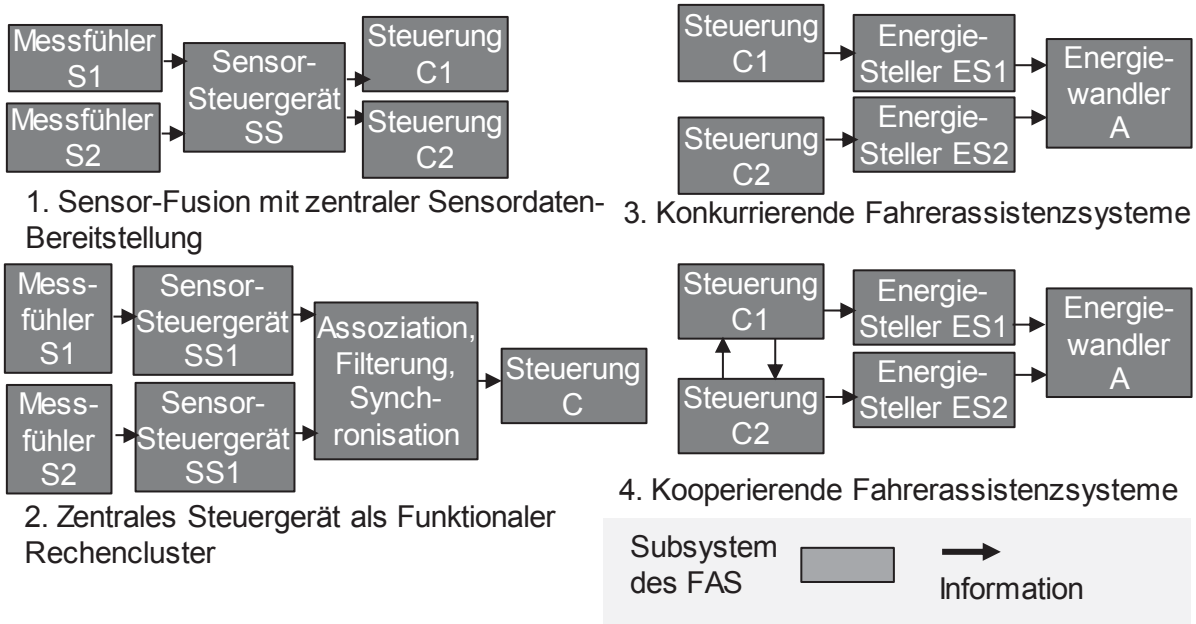


Abbildung 88: Verschiedene Ausprägungen der Struktur des hybriden FAS Prototyps zur Abbildung von Trends der Gestaltung von FAS

Der hybride FAS Prototyp ist als **horizontaler Prototyp** entsprechend der Vorgaben in Kapitel 2.2.1 zu klassifizieren: Das FAS wird vollständig und ganzheitlich, jedoch in geringer Modellierungstiefe abgebildet. Die Funktionen sind nicht technisch korrekt, sondern nur funktional modelliert.

Wie verschiede Ansätze zeigen, können im CASE-Tool erstellte Verhaltensmodelle für die **Simulation neuronaler Netze** und **Maschine Learning Algorithmen** eingesetzt werden (Burmeister et al. 2008; Hines und Tsoukalas 1997; Singaravel et al. 2018; Dongkyu L. et al. 2015). Die Erweiterung des hybriden FAS Prototyps um derartige Modelle ermöglicht die Simulation intelligenter Sicherheits- und Assistenzsysteme.

Der in Kapitel 3.3.3 beschriebene AUTOSAR-Akzeptanztest erfordert echtzeitfähigen Softwarecode. Eine direkte Verwendung des auf Verhaltensmodellen der Software beruhenden HPiL Test für den Test von AUTOSAR ist somit nicht möglich. Es besteht aber die Möglichkeit, Teile Testfähiger AUTOSAR-Modelle in CASE-Tools wie z. B. MATLAB/Simulink zu erstellen (Deicke 2018, S. 47). Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben können diese Modelle mit Rapid Control Prototyping Methoden in Software-Code kompiliert werden. Durch nachträgliche Erweiterung durch wichtige Elemente der Steuergeräte-Software können diese kompilierten Modellen als **Grundlage für AUTOSAR-basierte Tests** verwendet werden (nach Deicke 2018, S. 27).

Die Kopplung von CASE-Tools mit AP-Tools ermöglicht die Abbildung von zeitlichem Verhalten: So können **mehrstufige Warnsysteme**, die den Fahrer frühzeitig und in steigender Dringlichkeit warnen, abgebildet werden. Die Kopplung dieser Modelle mit visueller, auditiver und haptischer Anzeige- und Bedienhardware ermöglicht eine **multimodale Interaktion** zwischen Fahrer und FAS. Wie zuvor exemplarisch im Testsetup zur Evaluation der Nutzbarkeit des AP Prototypen durch Abbildung 80 gezeigt, ermöglicht die Nutzung von Rapid Prototyping Verfahren die **Umsetzung neuartiger Displaykonzepte**. Die schnelle Änderbarkeit der Prototypen erlaubt dazu den schnellen und kosteneffizienten Aufbau hybrider Prototypen für den **Test neuartiger Mensch-Maschine Interaktion** in der Entwicklung bedingt und hoch automatisierter FAS. Hier

bietet die Überlagerung mechanischer Anzeige- und Bedienhardware geringer Abbildungsqualität durch in Virtual Reality Technologie visualisierten 3D CAD Modellen großes Potential, frühzeitig und kosteneffiziente Tests des UX Designs durchzuführen.

Der Hybride FAS Prototyp entspricht der in Kapitel 4.3 beschriebenen Konfiguration für ein **Testverfahren zum frühestmöglichen Test eines maschinenausführbarer FAS Prototypen auf Basis von Domänen-Prototypen.** Verhaltensmodelle der Software, aufgespielt auf Rapid Prototyping Elektronik, werden mit MMS-Prototypen gekoppelt. Diese bestehen aus nach anthropometrischen und ergonomischen Vorgaben des 3D CAD-Modells positionierten Rapid Prototyping Elektronik der Anzeigen und Bedienelemente, auf denen digitale Anzeigeinhalte laufen. Das Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren sieht den integrierten Test der Beherrschbarkeit in den Regelkreisen der Mechatronik und der Fahrer-FAS-Interaktion vor. Wie in Kapitel 4.3 ausgeführt, sind auf Software-Modellen basierende Testverfahren jedoch nur für einen eingeschränkten Beherrschbarkeits-Test nutzbar. So bedürfen die Tabelle 10 beschriebenen Beherrschbarkeits-Kriterien der Fehlerrobustheit des Systems oder von Schutzmaßnahmen gegen externe Manipulationen reifere Software- und Elektronik-Prototypen. Darüber hinaus beschreibt das Testverfahren nur den Einsatz der hybriden Prototypen im eigenen Fahrzeug, jedoch nicht im Fremdverkehr. Ein Test der zwei Kriterien der Vorhersagbarkeit für andere Verkehrsteilnehmer ist damit nicht möglich. Gleiches gilt für Kriterien der Verantwortung und Haftung, in denen die Vorhersagbarkeit für anderen Verkehrsteilnehmer oder die Qualität der Dokumentation geprüft werden. Oder auch für Makroskopischer Effekte, bei denen der Einfluss auf andere Verkehrsteilnehmer untersucht wird. Das neue Testverfahren ermöglicht **einen gegenüber dem Stand der Technik umfangreicheren, jedoch keinen vollständigen Test der Beherrschbarkeit**. Darüber hinaus sind heutige Fahrsimulatoren eingeschränkt: Wie beschrieben kann eine hohe Abbildungsqualität und einen hohen Abbildungsumfang umgesetzt werden. Jedoch entsprechen diese nicht der Realität. Ergebnisse der Fahrsimulation sind damit zu einem hohen Maß, jedoch nicht vollständig auf die Realität übertragbar.

Es kann damit zusammengefasst werden:

Das HPiL Testverfahren erscheint geeignet, das signifikante Frontloading-Potential eines Testverfahrens zum frühestmöglichen Test domänenbasierten FAS Prototypen auf Basis von maschinenausführbarer Domänen-Prototypen umsetzen zu können. Die Beherrschbarkeit kann wesentlich umfangreicher als im Stand der Technik, jedoch nicht vollständig und mit Einschränkungen der Übertragbarkeit auf die Realität sowohl für heutige wie auch zukünftige, teil- und hochautonome FAS nachgewiesen werden.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, werden in der heutigen Entwicklung von FAS die Prototypen zum Test des User Experience Design im Teilsystem-Entwicklungsprozess der Mensch-Maschine Schnittstelle erstellt. Für den Einsatz des HPiL Testverfahrens vor der Domänenentwicklung fehlen damit die im AP-Tool erstellten, funktionalen Anzeige-Prototypen. Ebenso werden anthropometrische und ergonomische Parameter erst im Teilsystem-Entwicklungsprozess der Mensch-Maschine Schnittstelle erstellt. Es fehlen damit die 3D CAD Modelle für die positions- und lagegetreuen Darstellung digitalen Anzeigeinhalte mittels Virtual Reality. Sowie für den positions- und lagegetreuen Einbau der elektronischen und mechanischen Anzeige- und Bedienhardware in den Fahrsimulator. Die Beherrschbarkeit kann damit nur für Kriterien getestet werden, die nicht zwingend eine Mensch-Maschine Schnittstelle erfordern. Beispielsweise die Fähigkeit des Systems, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden. Oder die Verständlichkeit von Systemgrenzen eines in die Fahrzeugsteuerung eingreifenden

Systems für den Fahrer. Die fehlende Verfügbarkeit von frühen testbaren Prototypen wurde bereits in Kapitel 4.2 beschrieben und stellt einer der heutigen Herausforderung in heutigen FAS Entwicklungsprozessen dar. Es kann zusammengefasst werden:

Das HPiL Testverfahren ist nicht geeignet für den umfassenden Beherrschbarkeits-Test von FAS vor der Domänenentwicklung. Da keine vordefinierten, digitalen Anzeigeinhalte sowie keine Informationen über die Position, Lage und Gestalt der Anzeigen und Bedienelemente aus dem FAS Entwicklungsprozess bereitgestellt werden, können lediglich Beherrschbarkeits-Kriterien des mechatronischen Regelsystems auf Basis verfügbaren, funktionalen Systemmodelle getestet werden.

Werden Domänen-Prototypen eingesetzt, erscheint das Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren als passende Lösung für eine Beantwortung der **Forschungsfrage F I.** Ohne Verfügbarkeit von Domänen-Prototypen der Mensch-Maschine Schnittstelle kann jedoch kein umfassender Test der Beherrschbarkeit durchgeführt werden.

Die **erste Forschungshypothese H I.** zur Beantwortung der Forschungsfrage F I. wird daher entsprechend der Ausführungen wie folgt gestellt:

H I. Mit dem Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren kann ein auf Domänen-Prototypen basierender, umfassender Test der Beherrschbarkeit des Fahrerassistenzsystems früher als im Stand der Technik durchgeführt werden.

Abbildung 89 verbildlicht diese Hypothese anhand der in Kapitel 4.4. eingeführten Abbildung 67: Das Fahrerassistenzsystem wird Hilfe eines hybriden Prototyps so abgebildet, dass in dessen Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test frühzeitig umfassende Erkenntnisse über dessen Beherrschbarkeit erlangt werden können.

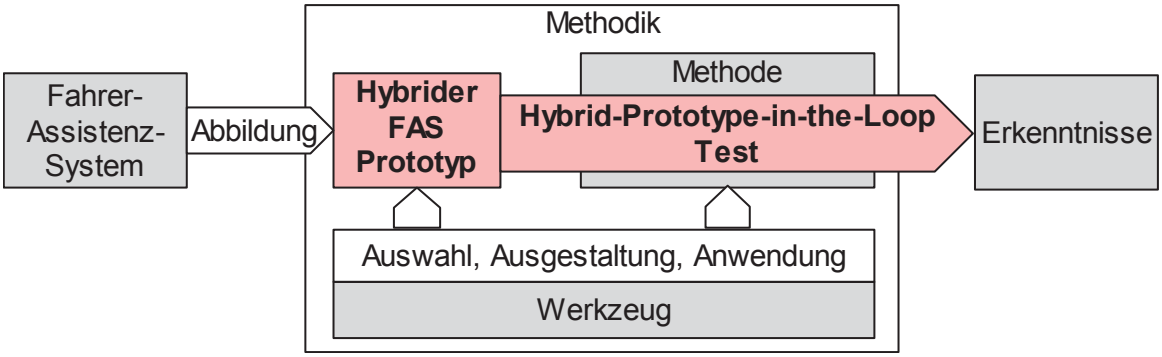


Abbildung 89: Hybrider FAS Prototyp und dessen Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test für den frühzeitigen, umfassenden Test der Beherrschbarkeit des FAS

Kapitel 6

Methodik für den frühen Test der Beherrschbarkeit im Fahrerassistenzsystem Entwicklungsprozess

It is a mistake to think you can solve any major problems just with potatoes.

(Adams, 1982)

6 Methodik für den frühen Test der Beherrschbarkeit im Fahrerassistenzsystem Entwicklungsprozess

Das vorliegende Kapitel dient der Beantwortung der **zweiten Forschungsfrage:**

F II. Wie muss eine Methodik gestaltet sein, die den frühzeitigen, umfassenden Test der Beherrschbarkeit des Fahrerassistenzsystems in industriellen Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozessen ermöglicht?

Abbildung 90 zeigt die Verortung des Kapitels in den Kontext der Arbeit.

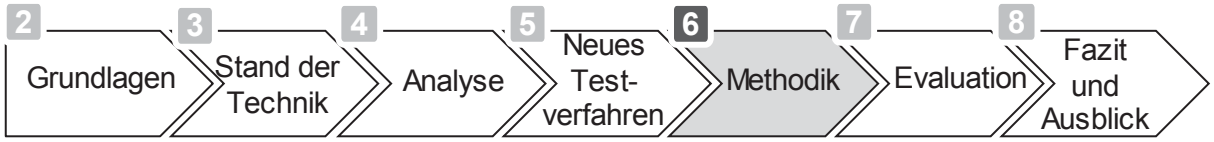


Abbildung 90: Verortung des Kapitels „6. Methodik des frühen Tests der Beherrschbarkeit im Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen“ in der Arbeit

Den Ausführungen in Kapitel 2.2.3 folgend, beinhaltet eine Methodik die folgenden einander zugehörigen drei Elemente:

- **Prozesse**, bestehend aus einer systematischen, wiederkehrenden Reihe logisch aufeinander folgender, jeweils ein Artefakt liefernder Prozessschritte,
- **Methoden**, die das konkrete Vorgehen innerhalb im Prozess und in dessen Prozessschritten beschrieben, sowie
- **Werkzeuge**, die Methoden unterstützen sowie deren Umsetzung und Effizienz garantieren.

Entsprechend dienen die folgenden Ausführungen der Herleitung und Entwicklung eines Prozesses, von Methoden und Werkzeugen zur Integration des in Kapitel 5 erarbeiteten Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens in den FAS Entwicklungsprozess. Für die Methodik zum Aufbau eines hybriden FAS Prototyps und dessen Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test werden folgende Begrifflichkeiten eingeführt:

Der **Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Prozess** beschreibt den Aufbau hybrider FAS Prototypen und deren HPiL Test.

Die **Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Methoden** beschreiben das konkrete Vorgehen innerhalb des HPiL Prozesses zum Aufbau und HPiL Test des hybriden FAS Prototyps.

Die **HPBench**, ein englischsprachiges Akronym für eine „Hybrid Prototyping Test Bench”, eines Prüfstands für den Aufbau und Test hybrider Prototypen, bezeichnet die **Werkzeuge** zur Unterstützung und effizienten Umsetzung der HPiL Methoden.

HPiL Prozess, HPiL Methoden und HPBench sind in **der Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Methodik** zusammengefasst.

Die nachstehende **Abbildung 91** verbildlicht diese Zusammenhänge anhand der in Kapitel 4.4. eingeführten Abbildung 67.

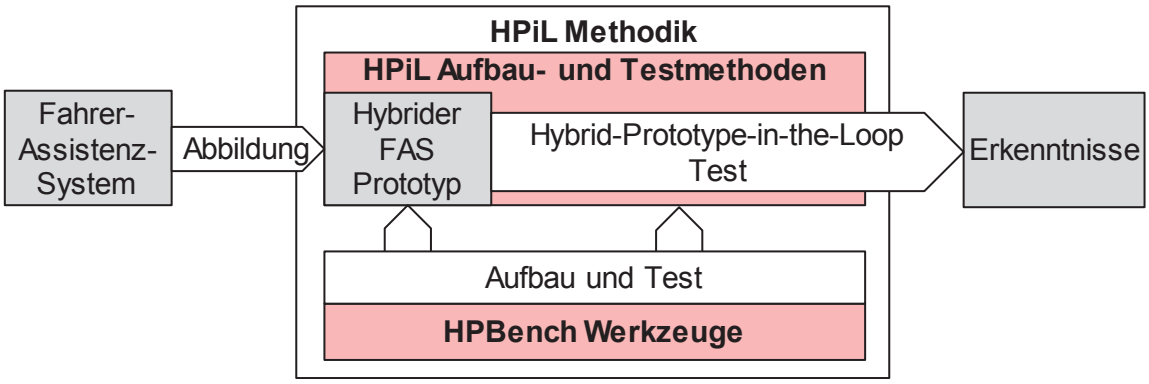


Abbildung 91: HPiL Methodik, Prozess, Methoden und HPBench Werkzeuge für den Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test von Fahrerassistenzsystemen

Die nachfolgenden Kapitel dienen der Gestaltung der HPiL Methodik. In Kapitel 6.1 werden wissenschaftliche Lösungsansätze für die Umsetzung einer effizienten, im industriellen Entwicklungsprozess nutzbaren Methodik aufgezeigt. Auf Basis dieser Ausführungen werden in Kapitel 6.2 verschiedene Werkzeuge zur Unterstützung des effizienten Aufbaus und Tests des hybriden FAS Prototyps entwickelt. Kapitel 6.3 dient der Entwicklung der Prozesse und Methoden zum Einsatz dieser Werkzeuge für den Aufbau und Test des hybriden FAS Prototyps im industriellen FAS Entwicklungsprozess. Das abschließende Kapitel 6.4 dient der Analyse der entwickelten Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik sowie der Synthese zur zweiten Forschungshypothese H II. der Arbeit zur Beantwortung der Forschungsfrage F II.

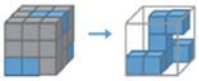
6.1 Ansätze der Umsetzung einer Methodik in der mechatronischen Systementwicklung

Wie in Kapitel 3 beschrieben, zeichnen sich heutige FAS Entwicklungsprozesse durch eine hohe Komplexität, den Einsatz zahlreicher Werkzeuge sowie der Mitwirkung verschiedenster Akteure aus. Entsprechend soll die HPiL Methodik ein **formalisiertes, durchgängiges und interdisziplinäres Vorgehen** zum Aufbau und Test der hybriden Prototypen beschreiben. Verschiedene Autoren stellen weitere Anforderungen an eine Methodik für Entwicklung und Test mechatronischer Systeme. So soll diese **schnell** und **einfach applizierbar** und **sicher ausführbar** sein sowie zu **nachvollziehbaren Ergebnissen** führen (Johansson et al. 2004, S. 3; Balážová 2005, S. 30). Dazu kommt der Bedarf nach **Relevanz der Methodik** für den Anwendungsfall, das anwendende Unternehmen sowie die spezifische Situation der Produktentwicklung. Und nicht zuletzt besteht die Anforderung der **Effektivität** und **Effizienz** der Methodik. Die Aufgaben müssen zielgerichtet und ergebnisorientiert und mit einem niedrigen Aufwand an Zeit, Kosten und Ressourcen erfüllt werden (Johansson et al. 2004, S. 3; Balážová 2005, S. 32).

Ein wesentlicher Ansatz für die Erreichung von Effizienz in der Produktentwicklung liegt in der Standardisierung von Produkt- und Prozesselementen sowie der Nutzung von vorhandenen Elementen aus vorherigen Entwicklungen (Feldhusen und Grote 2013, S. 776). Standardisierte und wiederverwendete technische Elemente können den Entwicklungsaufwand reduzieren und gleichzeitig die Zuverlässigkeit und Qualität der erstellten Prototypen steigern (nach Hoffmann 2010, S. 101). In der industriellen Anwendung basiert der Einsatz modularer Plattformen der Fahrzeugentwicklung auf

diesen Prinzipien (Simpson et al. 2006, S. 1ff). Auch die Ansätze des Knowledge Based Engineering (KBE) der Mechanik-Entwicklung oder der Referenzmodellierung in der Softwareentwicklung basieren auf der Standardisierung und Nutzung von vorhandenen technischen Elementen (Königs 2013, S. 96). Um eine hohe Anpassbarkeit und Kombinierbarkeit der technischen Elemente zu ermöglichen, müssen die Beziehungen zwischen Element und wiederverwendetem Element „proaktiv berücksichtigt und geplant werden“ (Königs 2013, S. 96). Zur Standardisierung und Wiederverwendung technischer Elemente geben die Ansätze der Referenzmodellierung die Techniken der Konfiguration, Spezialisierung, Instanziierung, Aggregation und der Analogiekonstruktion vor (Brocke 2002, S. 261–262). Diese Techniken beschreiben die Regeln zur Übernahme, Anpassung und Erweiterung des standardisierten beziehungsweise wiederverwendeten technisches Elementes durch dessen Anwender (nach Königs 2013, S. 98). Die mit Hilfe der Techniken erstellten technischen Elemente unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Änderbarkeit für den Anwender sowie den Typ der Änderung (Königs 2013, S. 261). **Tabelle 17** beschreibt die Techniken mit Hilfe von Prinzip-Skizzen.

Tabelle 17: Techniken der Standardisierung und Wiederverwendung (nach Königs 2013, S. 99–100)

Technik	Prinzip-Skizze	Beschreibung
Analogie		• Übertragung von Struktur oder Lösungen von als analog wahrgenommenem, technischen Element
Spezialisierung		• Struktur und generische Inhalte des technischen Elements werden übernommen und durch Adaptionen sowie Erweiterungen ergänzt.
Aggregation		• Vorhandene technische Elemente werden neu zusammengestellt oder strukturell verändert • keine Änderung der Elemente durch den Anwender
Instanziierung		• Struktur mit Platzhaltern für neue Elemente ist vorgegeben • keine Änderung der Struktur oder der Elemente durch den Anwender
Konfiguration		• Technische Elemente und Struktur werden vorgeplant, der Anwender passt diese durch Auswahlentscheidungen an

Königs gibt exemplarische Anwendungsmöglichkeiten der verschiedenen Techniken für die Entwicklung mechatronischer Systeme (Königs 2013, S. 99–100). So ist das Prinzip der Analogie beispielsweise für Probleme der Sensor-Fusion einsetzbar, indem vorhandene Sensoren für neue Anwendungsbereiche verwendet werden. Spezialisierung findet sich beispielsweise in der Erstellung standardisierter Lastenhefte, während Aggregation für die Erstellung von Baukästen oder Standardbauteil-Katalogen verwendet werden kann. Die Techniken der Instanziierung und Konfiguration finden dagegen beispielsweise in der Nutzung von CAD-Templates im Bereich des KBE statt.

Die Anwendung dieser Prinzipien erscheint für den vorliegenden Fall der FAS Entwicklung nutzbar. Zunächst zeigen die exemplarischen Anwendungsmöglichkeiten die **Relevanz** für den Anwendungsfall. Die Bereitstellung standardisierter und vordefinierter Elemente ermöglicht eine **schnelle** und **einfache Applikation** für den Anwender. Der Einsatz von Standards unterstützt dazu im Aufbau **betriebssicherer** Elemente und von Werkzeugen zur **nachvollziehbaren Auswertung** der im Test erreichten Ergebnisse. Zuletzt liefern die Prinzipien die geforderte **Effizienzsteigerung**. Die Prinzipien der Standardisierung und Wiederverwendung werden daher zur Entwicklung der HPiL Methodik zum frühen Beherrschbarkeits-Test auf Basis des HPiL Testverfahrens angewendet. Das nachfolgende Kapitel beschreibt diese Anwendung.

6.2 HPBench für den Aufbau und Test hybrider Fahrerassistenzsystem-Prototypen

Die **Technik der Konfiguration** dient der Vorplanung technischer Elemente und deren Struktur, welche dann durch Auswahlentscheidungen des Anwenders angepasst werden können. Eine Anwendung der Konfiguration auf das Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren hat das Potential, den Aufbau und Test des hybriden FAS Prototyps zu beschleunigen. Der Anwender muss den hybriden FAS Prototyp sowie die Testumgebung Fahrsimulator für seinen Anwendungsfall nicht neu planen, sondern trifft Auswahlentscheidungen basierend auf vorgeplanten technischen Elementen und vorgeplanter Struktur. Der Begriff Framework beschreibt eine solche vorgeplante Struktur. Den Ausführungen aus Kapitel 2.2.1 folgend, beinhaltet ein Framework voneinander abgegrenzte, eigenständige, funktionale Systemelemente mit klaren Schnittstellen zu anderen Systemelementen. Dazu sind Basisbibliotheken oder andere vordefinierte Elemente zur Unterstützung des Aufbaus des Systems beinhaltet. Der Anwender der HPiL Methodik, der mit einem vorgeplanten, generischen Framework startet, trifft Auswahlentscheidungen zur spezifischen Anpassung der generischen Elemente des Frameworks auf einen Anwendungsfall. Die Technik der Konfiguration wird daher zur Erstellung des ersten Werkzeugs der HPiL Methodik angewandt: Des **HPBench Frameworks,** dargestellt in **Abbildung 92 (Links).** Durch Auswahlentscheidungen der vorgeplanten Elemente wird der in **Abbildung 92 (Rechts)** dargestellte hybride FAS Prototyp konfiguriert.

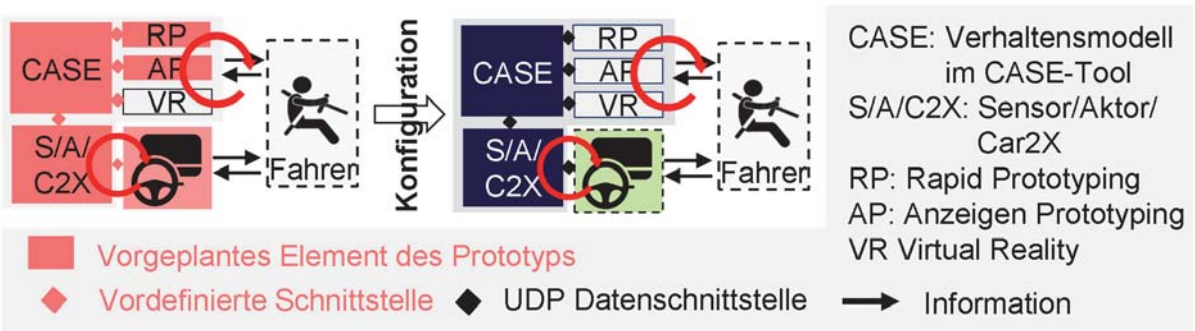


Abbildung 92: Konfiguration des vorgeplanten, generischen HPBench Frameworks (Links) zum hybriden FAS Prototyp für den frühen Beherrschbarkeits-Test (Rechts)

Es werden Elemente für die in Software umgesetzten Prototypen-Elemente im CASE-Tool, im AP-Tool sowie im Simulationssystem SIM vorgeplant. Dazu der entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.4 beschriebene Fahrsimulator. Die Struktur des hybriden FAS Prototyps und dazu erforderliche Schnittstellen, sowohl Softwareintern als

auch zwischen den einzelnen Tools, sind durch das HPBench Framework vordefiniert. Basisbibliotheken und vorgeplante Elemente werden in den Tools bereitgestellt. Die Beschreibung des HPBench Frameworks ist Tool-Neutral angelegt und damit anwendbar auf die verschiedenen Software-Tools der Domänen-Entwicklung von FAS.

Zur Umsetzung der im CASE-Tool und im AP-Tool modellierten Prototypen-Elemente wird die Technik der **Instanziierung** angewendet. Wie in Kapitel 6.1 ausgeführt, beschreibt die Instanziierung die Vordefinition einer Struktur mit Platzhaltern, in die ein Anwender Elemente einfügen kann. Die Applikation der Instanziierung kann durch Templates umgesetzt werden. Templates bezeichnen Modelle mit generischen und/oder lösungsneutralen Inhalten, die über explizite Mechanismen zur Unterstützung seiner kompositionellen oder adaptiven Änderung verfügen (Königs 2013, S. 102). Nach Königs ist die grafische Modellierung in CASE Tools gut für eine Umsetzung von Templates geeignet (Königs 2013, S. 181ff). Wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, bieten auch AP Tools die Möglichkeit der grafischen Modellierung. Es wird das zweite Werkzeug der HPBench erstellt: Das **HPBench Template** für die Unterstützung des Aufbaus von Prototypen im CASE- und im AP-Tool. Ein HPBench Template gibt eine vordefinierte Struktur im CASE/AP-Tool mit Leerstellen oder Platzhaltern vor. In die Leerstellen des HPBench Templates (für CASE-Tool) werden die im CASE erstellten Verhaltensmodelle des mechatronischen Regelsystems eingebunden. Die im AP-Tool erstellten digitalen Anzeigeinhalte der visuellen, akustischer und haptischen Anzeigen und Touch-Bedienflächen werden im HPBench Template (für AP-Tool) eingebunden. Die Bereitstellung von Templates kann die prototypenbasierte Integration digitaler Modelle verschiedener Fachbereiche unterstützen (Königs 2013, S. 112). Durch eine **frühzeitige Bereitstellung der HPBench Templates an die Teilsystem-Entwicklung** werden für die Bedarfe des HPiL Test vorbereitete Prototypen im AP- und CASE-Tool erstellt und die Integration zum hybriden FAS Prototyp unterstützt. **Abbildung 93 (Links)** zeigt den Aufbau eines HPBench Templates. Vordefinierte Ein- und Ausgangsschnittstellen zu anderen Elemente des Prototyps sind um eine Leerstelle oder einen Platzhalter angeordnet. In diese werden durch den Mechatronik-Entwickler im CASE-Tool erstellte Verhaltensmodelle eingebunden. Sowie durch den MMS Entwickler im AP Tool erstellten, digitale Anzeige-Inhalte. Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, wird über Konnektoren eine Verknüpfung erstellt und so die Wechselwirkung zwischen Schnittstelle und Prototyp festgelegt. Die so erstellten, funktionalen CASE Tool Prototypen und vordefinierten, digitalen Anzeigeinhalte können nun einfach in die „Leerstellen“ des hybriden FAS Prototyp, der in **Abbildung 93 (Rechts)** dargestellt ist, eingebunden werden.

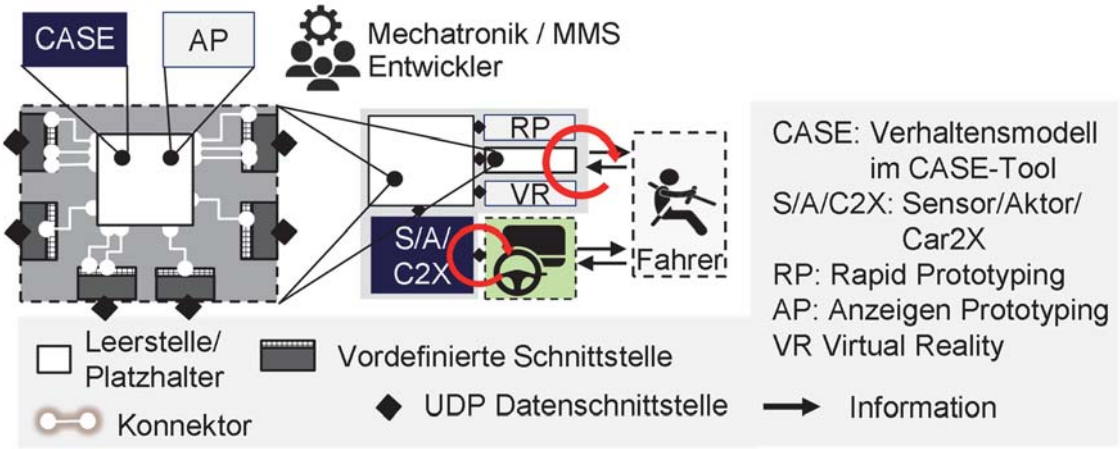


Abbildung 93: Instanziierung zur Umsetzung von HPBench Templates für die Unterstützung des Aufbaus von Prototypen im CASE- und im AP-Tool

Für den effizienten Aufbau der hybriden Prototypen lässt sich **ein Teil der Schnittstellen standardisiert vordefinieren**. So greifen Aktoren nach Kapitel 3.1.2 in das Lenksystem, das Bremssystem oder die Motorsteuerung des Fahrzeugs ein. Für die Modellierung von FAS Verhaltensmodellen ist es meist ausreichend, den Differenzbetrag der jeweiligen Steuergröße auf das im Simulationssystem umgesetzte Fahrzeugmodell weiter zu geben. Beispielsweise einen Differenzbremsdruck an das Bremssystem, der auf dem durch den Fahrer indizierten Bremsdruck addiert wird. Daher sind als Schnittstellen zwischen den Verhaltensmodellen der Steuerung und des Energiestellers beispielsweise nur der Lenkraddifferenzwinkel, der Bremsdifferenzdruck sowie die Motor-Differenzdrehzahl erforderlich. Analog sind auch viele Sensoren durch standardisierbare Größen modellierbar: So lässt sich eine Objekterkennung und -verfolgung mittels Distanzsensoren durch die Größen der Relativ-Geschwindigkeit, Relativ-Beschleunigung sowie dem Abstand des delektierten Objektes modellieren. Dazu gibt es Fahrzeugzustandsdaten die viele FAS nutzen. Üblich sind beispielsweise die Nutzung der durch fahrzeugeigene Sensoren aufgenommenen Fahrzeuggeschwindigkeit oder Fahrzeugbeschleunigung. Aber auch die Nutzung von durch Fahrzeugsensoren aufgenommenen Bedieneingaben des Fahrers auf primäre Bedienelemente wie Lenkrad oder Pedalerie, aber auch auf sekundäre und tertiäre Bedienelemente wie dem Blinkerhebel für die Fahrtrichtungsanzeige. Die Schnittstellen für Anzeigen und Bedienelemente ermöglichen wegen dem großen Lösungsraum, den das HPiL Testverfahren bietet, keine Vordefinition, jedoch eine **Strukturierung**. So erhöht die Strukturierung in visuelle, akustische und haptische Schnittstellen die Übersichtlichkeit speziell bei komplexen Systemen.

Zur Unterstützung des Prozessschrittes „Aufbau des hybriden FAS Prototypen“ wird die Technik der **Aggregation,** der neuen Zusammenstellung oder strukturellen Veränderung vorhandener technischer Elemente ohne deren Änderung durch den Anwender, umgesetzt. Wie durch Königs beschrieben, wird als Lösungselement ein Baukasten aus vordefinierten Elementen und Standardelementen erstellt: Der **HPBench Baukasten**. Es werden sowohl Software- als auch Hardware-Baukastenelemente für den Aufbau von Anzeige- und Bedienelement-Prototypen bereitgestellt. **Abbildung 94** visualisiert dieses Lösungselement.

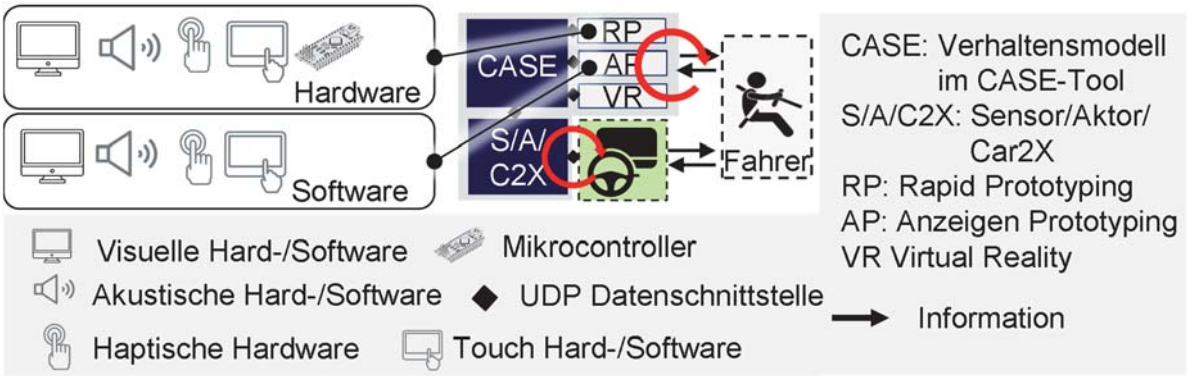


Abbildung 94: Aggregation zur Umsetzung des HPBench Baukastens für die Unterstützung des Aufbaus von Anzeige- und Bedienelement-Prototypen

Zur Erreichung von einem angemessenen Maß an Wiedergabetreue und Immersion bei gleichzeitig niedrigen Kosten, wird dem Ansatz von Murer gefolgt: Dieser beschreibt den Einsatz **gebrauchsfertiger Hardware der Unterhaltungselektronik** sowie **Originalteile aus dem KFZ-Bereich** zur Unterstützung des Rapid Prototyping (Murer et al. 2013, S. 103–104). Diese Elemente werden ergänzt um **Anzeige- und**

Bedienhardware aus dem Elektronik Prototyping, beispielsweise LEDs, Knöpfe oder Sensoren. **Mikrocontroller** dienen der Ansteuerung und Auswertung der Elektronik. Für die Umsetzung der erforderlichen Modularität werden Standardsteckverbinder aus der Unterhaltungselektronik und dem KFZ-Bereich eingesetzt. Die Integration visueller, akustischer und haptischer Anzeigen im AP-Tool wird durch **parametrierbare, vorgefertigte Anzeige-Softwarebausteine** unterstützt. Die Anzeige-Softwarebausteine in AP Tools dienen der Bereitstellung geometrischer Standardformen und funktionalen Steuerelementen zu deren Animation. Aus diesen Bausteinen können digitale Anzeigen wie LEDs oder analoge Anzeigen wie Skalen oder Licht-Leisten zusammengesetzt werden. Zum anderen dienen sie der Bereitstellung von Steuerelementen zum Aufruf von Medienelementen, mit denen Bildhaft situationsanaloge und kontaktanaloge visuelle, auditive und haptische Anzeigen erzeugt werden können. Der Einsatz von Parametern, wie beispielsweise der Höhe und Breite der geometrischen Standardelemente, der funktionalen Steuerelemente oder der Aufrufe, ermöglicht die einfache Veränderung der Anzeigen während des Tests. Wie in Kapitel 3.3 ausgeführt, können diese Modelle auch in 3D Modelle integriert und stereoskopisch über Virtual Reality Technologie wiedergeben werden.

Alle drei zuvor beschriebenen Werkzeuge der HPBench unterstützen den Aufbau des hybriden FAS Prototyps sowie den Aufbau der Testumgebung. Für die effiziente Testdurchführung ist es darüber hinaus zielführend, Modelle und Prototypen während eines Tests „Online“ parametrieren zu können. CASE- und AP-Tools, aber auch Simulationssysteme, bieten diese Möglichkeit. Daher wird ein weiteres, viertes Werkzeug der HPBench erstellt: Das **HPBench Operator Panel.** Dieses ermöglicht die Online-Änderung von vordefinierten Parametern in den CASE Tools, den AP Tools sowie des Simulationssystems durch einen menschlichen Operator während des Tests. Für die effiziente Änderung der Parameter stellt das Operator-Panel eine grafische Nutzerschnittstelle zur Verfügung. **Abbildung 95** visualisiert dieses Lösungselement.

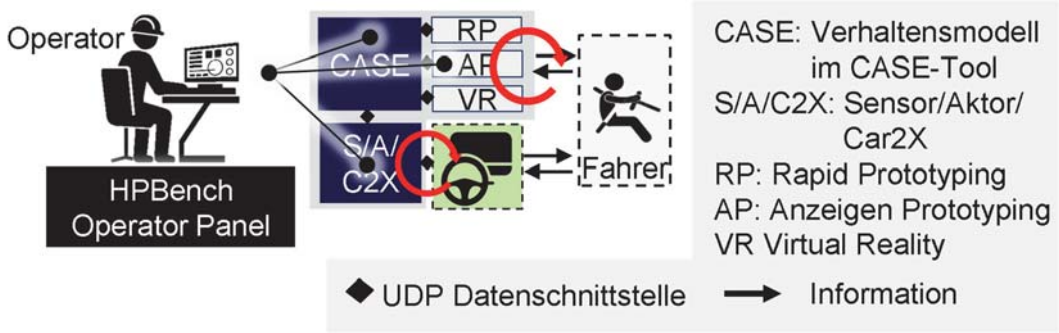


Abbildung 95: HPBench Operator Panel zur Unterstützung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests

Die gesamte Struktur der HPBench zur Unterstützung und Umsetzung der HPiL Methoden ist durch die in **Abbildung 96** gezeigte Systemarchitektur zusammengefasst.

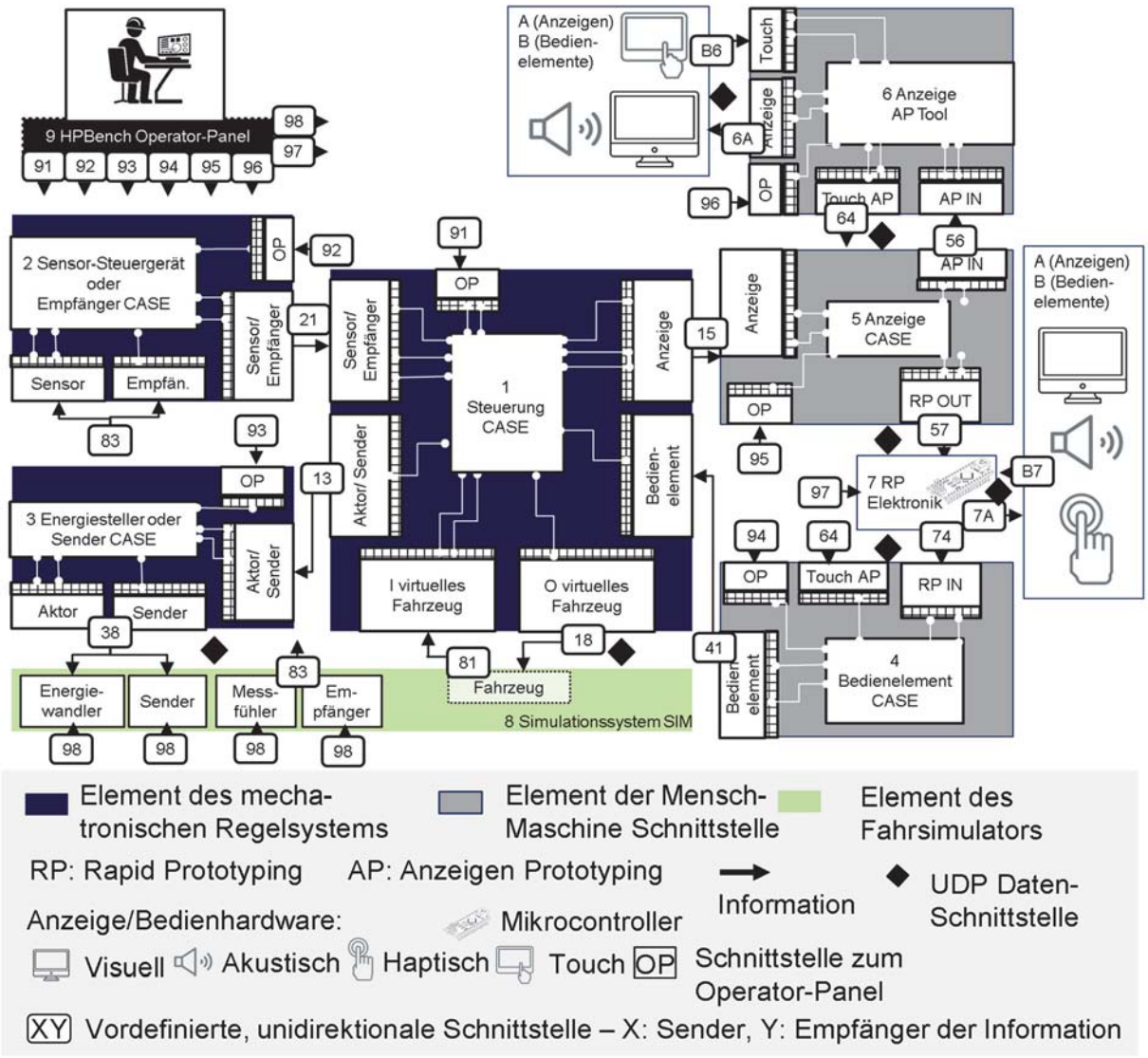


Abbildung 96: Systemarchitektur der HPBench

Die dargestellten Systemelemente bilden die in Abbildung 82 beschriebene Systemarchitektur des hybriden FAS Prototyps zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit von FAS ab. Es wird zwischen folgenden Systemelementen unterschieden:

- Das im CASE-Tool modellierte Verhaltensmodell der *Steuerung (1)* zur Interpretation der eingehenden Signale von Sensoren, Empfänger, Fahrzeug und Bedienelementen. Und, wenn erforderlich, der Ausgabe von Ansteuersignalen an Aktorik, Sender, Fahrzeug und Anzeigen.
- Die im CASE-Tool modellierten Verhaltensmodelle des *Sensor-Steuergeräts oder Empfängers (2)* zur Wandlung, Aufbereitung und Verstärkung der empfangenen Eingangssignale des im Simulationssystem modellierten *Messfühlers oder Empfängers (8).*
- Die im CASE-Tool modellierten Verhaltensmodelle des *Energiestellers oder Senders (3)* dienen der Verstärkung sowie Umwandlung des Ansteuersignals in ein für den im Simulationssystem modellierten *Energiewandler oder Sender (8)* nutzbares Ansteuersignal.
- In CASE-Tools modellierte Verhaltensmodelle der *Anzeige (5)* sowie *Bedienelement (4)* zur Signalaufbereitung und Signalwandlung in für die *AP Tool (6)* und *Elektronik (7)* verständliches Format.

- Die im *AP Tool (6)* modellierten digitalen Anzeige-Inhalte für die Darstellung komplexer visueller, akustischer und haptischer Anzeigen sowie von Touch-Bedienflächen unter Einsatz von Anzeige-Softwarebausteinen des HP Baukastens. Und der Wiedergabe dieser über Hardware-Elemente des HP Baukastens.
- *Rapid Prototyping Elektronik (7)* für das Prototyping aktiver und passiver elektronische und mechanischer Anzeige- (A) und Bedienhardware (B), bestehend aus gebrauchsfertiger Hardware der Unterhaltungselektronik, Originalteilen aus dem KFZ-Bereich sowie Anzeige- und Bedienhardware und Mikrocontrollern aus dem Elektronik Prototyping.
- Das *HPBench Operator Panel (9)* für die Online Parametrierung der in den CASE-Tools, AP-Tools und im Simulationssystem modellierten Systembestandteile.

Vordefinierte Schnittstellen dienen dem Austausch von Informationen zwischen den Systemelementen. **Abbildung 96** zeigt die Schnittstellen mittels einer Zahlenkombination, zusammengesetzt aus dem jeweilig sendenden und empfangenden Systemelement. So wird beispielsweise die Schnittstelle zwischen Sensorsteuergerät (2) und Steuerung (1) mit der Nummer 21 bezeichnet. Es wird zwischen **toolinternen Schnittstellen**, beispielsweise zwischen zwei Systemelementen im selben CASE Tool, und **toolexternen Schnittstellen** zwischen Tools und den Anzeige-/Bedienhardware-Elementen des HPBench Baukastens unterschieden. Während toolinterne Schnittstellen die vorhandenen Kopplungsmöglichkeiten des jeweiligen Tools nutzen, werden toolexternen Schnittstellen durch UDP Verbindungen umgesetzt.

Der modulare Aufbau des HPBench Frameworks ermöglicht eine **Skalierung des hybriden FAS Prototyps.** Ist beispielsweise kein Verhaltensmodell eines Sensor-Steuergerätes, eines Energiestellers oder von Anzeige oder Bedienelement erforderlich, können diese Elemente durch direkte Verbindung ihrer Ein- und Ausgänge mit Konnektoren überbrückt werden. Ein solcher Fall wäre beispielsweise möglich, wenn die vom Fahrsimulator oder vom Mikrocontroller kommenden Signale in einem für die Steuerung direkt verwendbaren Format gesendet werden. Das HPBench Framework ermöglicht darüber hinaus eine **Skalierbarkeit für die Testverfahren des Standes der Technik**. So ist ein rein mechatronischer Prototyp, bestehend aus Steuerung, Sensor- Steuergerät und Energiesteller im mechatronischen Regelkreis mit dem Fahrsimulator umsetzbar. Zusätzlich sind auch Setups ganz ohne Verhaltensmodelle möglich: So kann das HPBench Operator Panel auch für eine direkte Fernsteuerung von Anzeigen und Bedienelemente im Wizard-of-Oz Test eingesetzt werden. Der modulare Aufbau der HPBench **erhöht die Flexibilität** des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests: Systemelemente können nach den Bedarfen des Anwendungsfalles zusammengesetzt werden. Die HPBench baut auf den Entwicklungswerkzeugen der FAS Entwicklung und bietet so die **Durchgängigkeit mit bestehenden Werkzeugen**. Durch Einsatz der HPBench Templates und des HPBench Baukastens kann die **Aufbauzeit der Test-Hardware und Test-Software reduziert** werden. Die HPBench erfüllt damit verschiedene der in Kapitel 4.2 beschriebenen Anforderungen des FAS Entwicklungsprozesses. Es lässt sich zusammenfassen:

Die Werkzeuge der HPBench können damit als geeignet für die Unterstützung eines effizienten Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests angenommen werden.

Das nachfolgende Kapitel dient der Beschreibung der HPiL Methoden zum Einsatz dieser Werkzeuge. Und verortet den Einsatz der Werkzeuge im FAS Entwicklungsprozess mit dem HPiL Prozess.

6.3 Hybrid-Prototype-in-the-Loop Prozess und Methoden zum Einsatz der HPBench im Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess

Die Planung standardisierter wiederverwendbarer technischer Elemente kann in drei Prozessteile gegliedert werden: Einen Prozessteil zur Planung und Bereitstellung der standardisierten und wiederzuverwendenden technischen Elemente. Einen Prozessteil zum Aufbau der zu testenden technischen Elemente. Sowie einen Prozessteil zum Test der zu testenden technischen Elemente. Durch eine Zusammenführung mit dem in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Testprozess kann der **Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Prozess** damit wie folgt aufgestellt werden:

1. Der Prozessteil „**Aufbau der HPBench“** dient der Planung und Bereitstellung der standardisierten und wiederverwendbaren technischen Werkzeuge der HPBench zur Unterstützung des methodischen Aufbaus und Tests des hybriden FAS Prototyps. Sowie der Planung und Bereitstellung des Fahrsimulators zu dessen Test. Angelehnt an den in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Testprozess werden die Prozessschritte der **HPBench Planung (1)** sowie der **HPBench Spezifikation (2)** durchgeführt. Artefakte dieses Prozessteils sind die HPBench Werkzeuge und der Fahrsimulator.
2. Der Prozessteil „**Aufbau des hybriden FAS Prototyps“** dient dem Aufbau des zu testenden hybriden FAS Prototyps. Entsprechend den Vorgaben des in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Testprozesses werden die Prozessschritte der **Aufbau-Planung (3)** sowie der **Aufbau-Spezifikation (4)** durchgeführt. Artefakt dieses Prozessteils ist der hybride FAS Prototyp sowie das Dokument „HPiL Prüfspezifikation“, in dem Testabschlusskriterien und Testbedingungen definiert werden.
3. Der Prozessteil „**HPiL Test des hybriden FAS Prototyps“** dient dem Test des hybriden FAS Prototyps im Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test. Entsprechend den Vorgaben des in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Testprozesses besteht der Prozessteil aus den Prozessschritten der **Test-Durchführung (5),** der **Test-Aufnahme (6)** sowie der **Test-Auswertung und Abschluss (7).** Artefakt dieses Prozessteils ist das abschließende Dokument „HPiL Prüfbericht“, welches Aufzeichnungen über den Verlauf der Prüfung, die Gegenüberstellung von Ist- und Soll-Ergebnissen sowie die Analyse der identifizierten Ist-/Soll-Abweichungen beinhaltet.

Abbildung 97 visualisiert den siebenstufigen Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Prozess und dessen Artefakte.

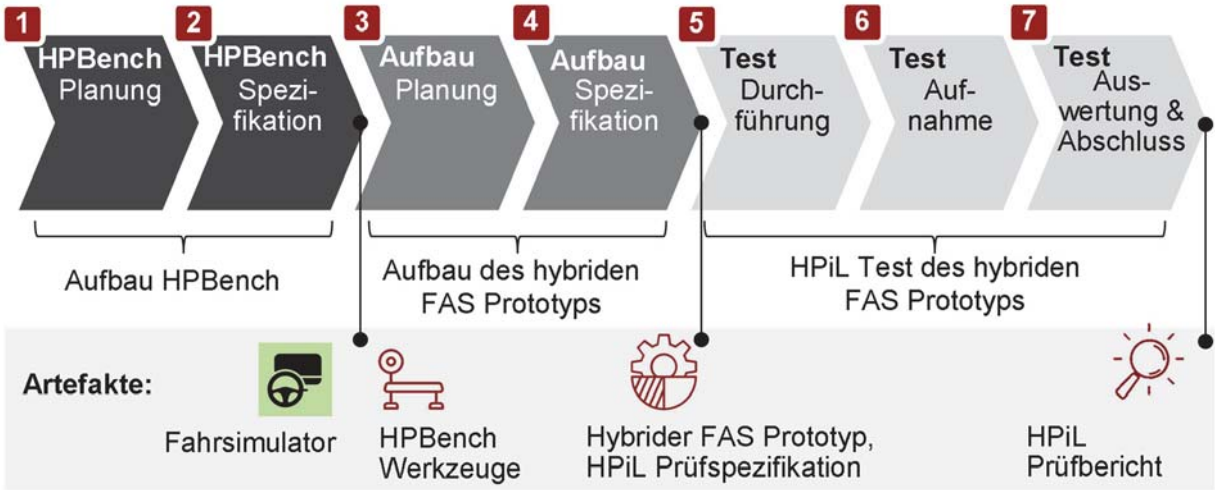


Abbildung 97: Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Prozess

Einer der Vorteile standardisierter technische Elemente ist deren Unabhängigkeit vom Entwicklungsprozess. Auch die Wiederverwendung setzt keine spezifischen technischen Elemente der Teilsystem-Entwicklungsprozesse voraus. Die Technik der Konfiguration für die Erstellung des HPBench Frameworks bietet das Potential, den Prozessteil **„Aufbau der HPBench“ von der FAS Entwicklung zu entkoppeln** und diesen im **Frontloading vor die Systemauslegung** zu legen. Darüber hinaus ist die Wiederverwendung technischer Elemente auch für den Fahrsimulator zielführend. So beschreibt die in Kapitel 5.4 erarbeitete technische Gestaltungsparameter-Konfiguration den technischen Aufbau eines Fahrsimulators für die Anforderungen des frühen Beherrschbarkeits-Tests von FAS. Es wird jedoch kein spezifischer Anwendungsfall beschrieben. Der Fahrsimulator ist damit nicht für den Beherrschbarkeits-Test spezifischer FAS, sondern als gesamtheitliche Lösung für den Beherrschbarkeits-Test vollständiger heutiger und zukünftiger FAS entsprechend der Ausführungen von Kapitel 3.1 konzipiert. Ein Fahrsimulator, der entsprechend dieser Konfiguration aufgebaut wird, ist daher **unabhängig vom spezifischen Entwicklungsprozess** und kann bereits vor diesem in den Prozessschritten des Aufbaus der HPBench erstellt werden. Anpassungen des Fahrsimulators im Entwicklungsprozess von FAS können sich auf Anwendungsfall-spezifische Skalierungen im Rahmen des Aufbaus des hybriden FAS Prototyps beschränken. Daher wird definiert:

Der Aufbau und die Konfiguration des Fahrsimulators kann zum größten Teil vor der Systemauslegung durchgeführt werden. Der Prozessteil „Aufbau der HPBench“ wird im Rahmen des Frontloadings vor die Systemauslegung platziert. Anwendungsfallspezifische Anpassungen des Fahrsimulators werden in den Prozessschritten zum Aufbau des hybriden FAS Prototyps durchgeführt.

Der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Prozess und dessen Artefakte können damit wie in der nachstehenden **Abbildung 98** visualisiert im FAS Entwicklungsprozess verortet werden.

Neben dem Prozess sowie dessen Artefakten zeigt die Abbildung auch die **verantwortlichen und beteiligten Rollen**. Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, sind an einem Testprozess die Rollen Entwickler, Systemintegrator, Prüfer und Anwender beteiligt. Entsprechend der Ausführungen übernehmen diese Rollen in der HPiL Methodik die folgenden Aufgaben:

- Der **Systemintegrator** verantwortet den Aufbau des hybriden FAS Prototyps in den Prozessschritten der Aufbau-Planung und Aufbau-Spezifikation. Sowie Änderungen des hybriden Prototyps während der Test-Durchführung. Dazu wirkt die Rolle bei der Erstellung der Dokumente „Prüfspezifikation“ sowie „Testbericht“ mit. Der Systemintegrator verantwortet zudem die Bereitstellung der Testumgebung: Im HPiL Prozess beinhaltet dies die Verantwortung für die Konfiguration des Fahrsimulators sowie die Planung und Bereitstellung der HPBench in den Prozessschritten der HPBench Planung und HPBench Spezifikation.
- Der **Prüfer** verantwortet die Erstellung des Dokuments „Prüfspezifikation“ und beschreibt und erstellt die Testfälle in der Aufbau-Planung und Aufbau Spezifikation. Des Weiteren führt der Prüfer den HPiL Test im Prozessschritt Testdurchführung durch. Sind Simulationen von fehlenden Teilen einer Systemimplementierung durch Wizard-of-Oz Bedieneingaben erforderlich, werden diese vom Prüfer durchgeführt. In der Testaufnahme nimmt der Prüfer Testdaten auf, wertet diese in der abschließenden Test-Auswertung und Abschluss aus und erstellt den Testbericht.
- Der **Anwender** interagiert als Fahrer des virtuellen Fahrzeugs mit dem hybriden FAS Prototyp und unterstützt im Anschluss bei der Aufnahme von Daten. Je nach

Erkenntnisinteresse des Tests kann der Anwender ein an der Entwicklung des FAS beteiligter Entwickler, ein nicht an der Entwicklung beteiligter Fachexperte, ein Prüfer ohne eigenes Expertenwissen, beispielsweise ein Entscheidungsträger, oder ein Endkunde ohne Bezug zum FAS Entwicklungsprozess sein.

Die nicht zur HPiL Methodik gehörigen Rollen **MMS Entwickler** und **Mechatronik Entwickler** verantworten die Realisierung der jeweiligen Teilsystem-Prototypen. Zur Unterstützung des Prozessschrittes der Aufbau-Planung „füllen“ diese Entwickler-Rollen die HPBench Templates mit den im AP- und CASE-Tool erstellten Prototypen.

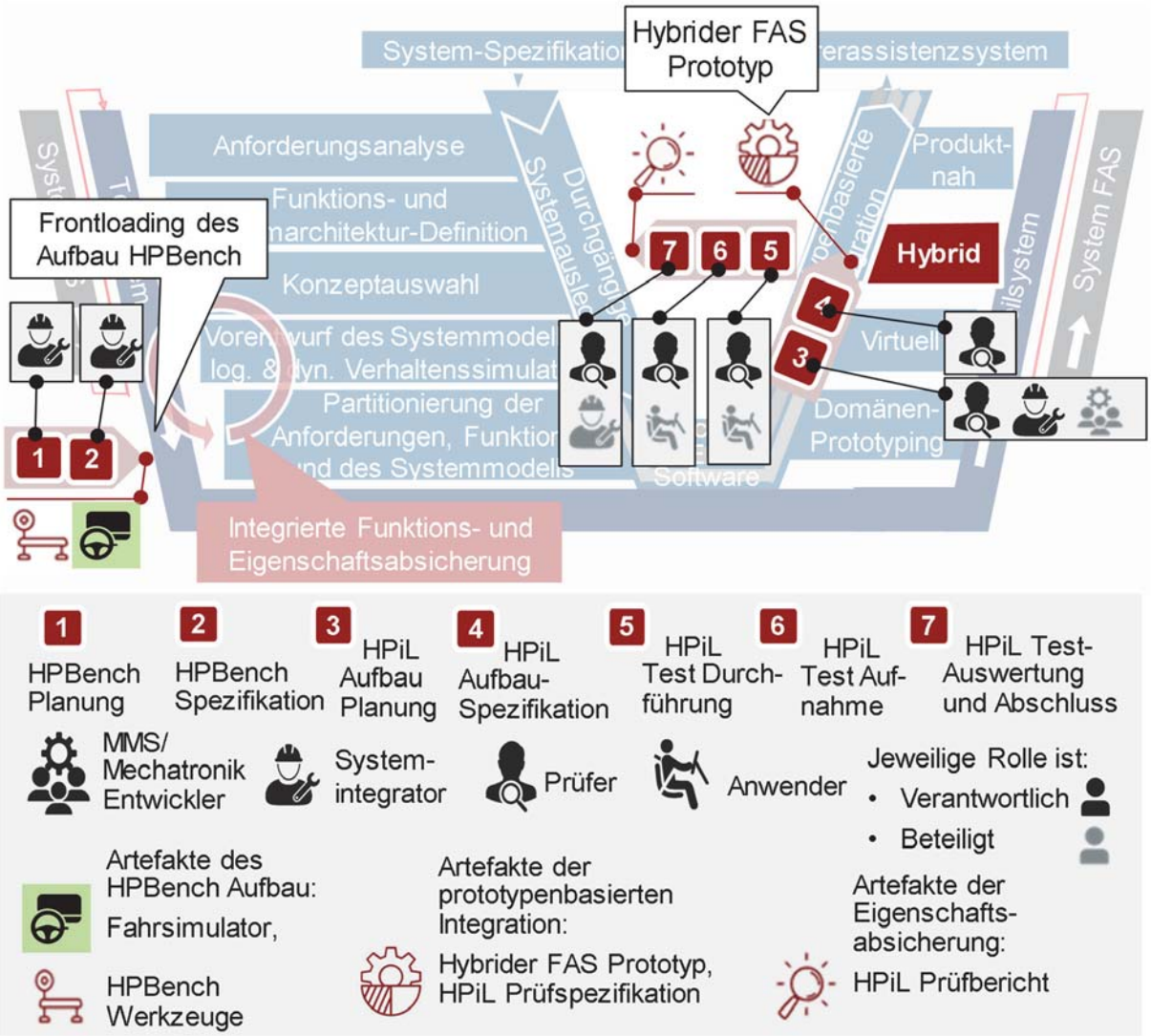


Abbildung 98: Verortung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Testverfahrens, dessen Artefakte und dessen Rollen im FAS Entwicklungsprozess

Die nachfolgenden Ausführungen dienen der Beschreibung der Aufgaben dieser Rollen in einer detaillierten Betrachtung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Prozesses.

Detailbeschreibung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Prozesses

Der erste Prozessschritt des HPiL Prozesses, **HPBench Planung (1),** dient der Analyse und Planung des Fahrsimulators sowie der Konfiguration des HPBench Frameworks durch den Systemintegrator. Der erste Schritt besteht in der Analyse des Anwendungskontextes sowie der eingesetzten Entwicklungs-Tools. Anschließend folgt die zielorientierten Ausgestaltung **der Testumgebung Fahrsimulator** basierend auf

dem in Kapitel 5.4 beschriebenes Vorgehens. Es können zwei grundsätzliche Fälle unterschieden werden:

Fall A: **Es ist kein Fahrsimulator vorhanden**. In diesem Fall erfolgt der Aufbau eines neuen Fahrsimulators entsprechend der in Kapitel 5.4 ausgearbeiteten technischen Gestaltungsparameter-Konfiguration.

Fall B: **Ein bestehender Fahrsimulator soll eingesetzt werden.** Um dessen Verwendbarkeit im Anwendungsfall zu bewerten, muss eine Analyse dessen Gestaltungsparameter-Konfiguration in Abgleich mit den Vorgaben aus Kapitel 5.4 erfolgen. Gegebenenfalls müssen Erweiterungen spezifiziert werden. Auch eine eingeschränkte Nutzbarkeit ist möglich, denn nicht jeder Anwendungsfall erfordert die in den Vorgaben beschriebene, maximale Ausprägung des jeweiligen Gestaltungskriteriums.

Auf Basis der Analysen des Anwendungskontextes wird die Konfiguration der zu erstellenden HPBench Werkzeuge durch Nutzung des HPBench Frameworks ausgeleitet. Dazu werden Auswahlentscheidungen hinsichtlich toolspezifischem Aufbau und Struktur sowie der umzusetzenden Baukasten-Elemente getroffen.

Auf Basis dieser Konfigurationen und Auswahlentscheidungen werden im zweiten Prozessschritt **HPBench Spezifikation (2)** durch den Systemintegrator die Werkzeuge der HPBench erstellt. Es wird der HPBench Baukasten inklusive eines Spezifikationsdokumentes erstellt. Es werden die HPBench Templates im CASE-Tool und AP-Tool inklusive zugehöriger Spezifikationsdokumente erstellt. Und es wird das HPBench Operator Panel Tool erstellt. Entsprechend der erarbeiteten technischen Gestaltungsparameter wird zudem der Fahrsimulator durch den Systemintegrator komplett neu aufgebaut oder ein bestehender Fahrsimulator erweitert.

Abbildung 99 visualisiert diese zwei Prozessschritte des **ersten Prozessteils „Aufbau HPBench“,** die jeweilig verantwortlichen und unterstützenden Rollen sowie die ein- und ausgehenden Artefakte.

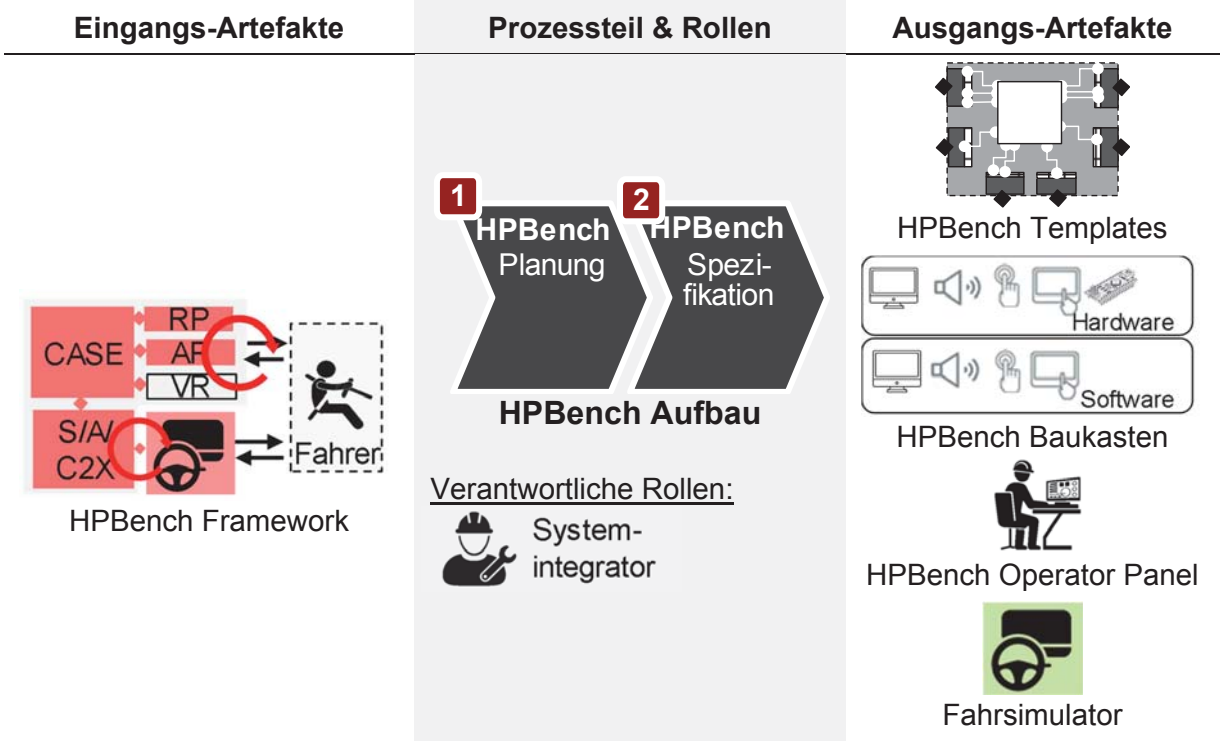


Abbildung 99: Erster Prozessteil „Aufbau HPBench“, Rollen und Eingangs-/Ausgangsartefakte

Die HPBench Templates werden anschließend an die Entwicklung der Teilsysteme übergeben. Das im CASE-Tool erstellte HPBench Template stellt dem **Mechatronik-Entwickler** eine vordefinierte Struktur mit Leerstellen sowie standardisierten, strukturierten Schnittstellen bereit. Der Mechatronik-Entwickler füllt die Lücken mit dem durch ihn entwickelten Verhaltensmodell und verknüpft dessen relevante Ein- und Ausgangsgrößen mittels Konnektoren mit den bereit gestellten Schnittstellen. Im Ergebnis werden aus der Mechatronik-Entwicklung modular in den hybriden FAS Prototyp integrierbare, **funktionale CASE Prototypen** erstellt. Darüber hinaus erfordert die Auswahl und Modellierung des passenden Sensor-, Aktor- und Car2X Modells im Simulationssystem die Spezifikationen der zu verwendenden Elektronik. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, werden diese durch die **Elektrik/Elektronik (E/E) Systemarchitektur** bereitgestellt. Die korrekte Positionierung und Ausrichtung dieser Elemente erfordert mit **3D E-CAD-Tools** erstellten **3D-Modelle der Elektrik-Installation.**

Den **MMS-Entwicklern**, die das User Experience Design der Anzeigen und Bedienelemente konzipieren, wird das im AP-Tool erstellte HPBench Template mit einer vordefinierten Struktur mit Leerstellen und strukturierten Schnittstellen bereitgestellt. Zudem werden parametrierbare, vorgefertigte Anzeige-Softwarebausteine durch den HPBench Baukasten bereitgestellt. Mit Hilfe dieser Werkzeuge erstellt der MMS-Entwickler **vordefinierte**, **digitale Anzeigeinhalte** für komplexe visuelle, akustische und haptische Anzeigen sowie Touch-Bedienelemente. Die Auswahl der HPBench Baukastenelemente bedarf Informationen zu den Fahreraktivitäten zum Betrieb des Systems, den jeweils ausgetauschten Informationen sowie Prozeduren zur wechselseitigen Übergabe. Diese werden, wie in Kapitel 3.4.4 beschrieben, durch den **MMS Basisentwurf** bereitgestellt. Die Positionierung und Orientierung der Anzeigen und Bedienelemente wird durch deren **3D CAD-Modelle** definiert.

Abbildung 100 und **Abbildung 101** visualisieren dieses Vorgehen in der **Teilsystem-Entwicklung** des mechatronischen Regelsystems und der MMS, die jeweilig verantwortlichen und unterstützenden Rollen sowie die ein- und ausgehenden Artefakte.

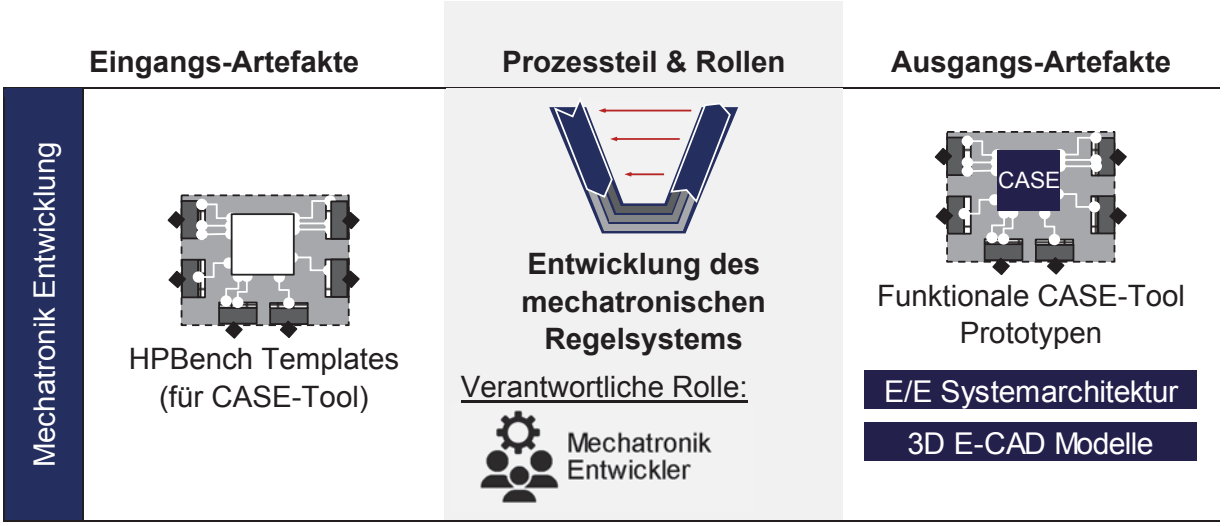


Abbildung 100: Template-basierte Integration in der Teilsystem-Entwicklung **des mechatronischen Regelsystems**, Eingangs-/Ausgangsartefakte und Rollen

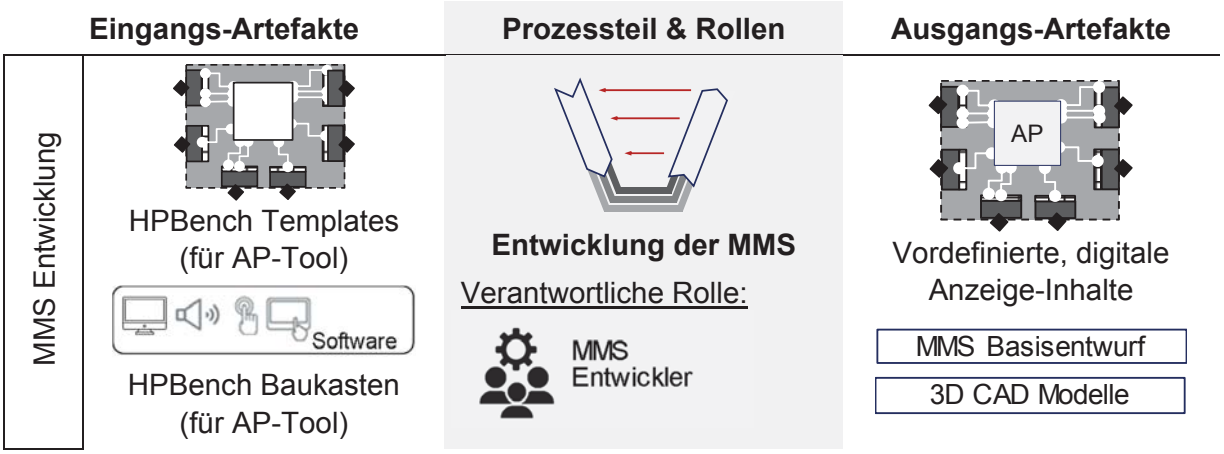


Abbildung 101: Template-basierte Integration in der Teilsystem-Entwicklung der MMS, Eingangs-/Ausgangsartefakte und Rollen

Der dritte Prozessschritt des HPiL Prozesses **„Aufbau Planung (3)“** dient der Definition der Teststrategie und der Prüfspezifikation durch den Prüfer. Zusätzlich dient dieser Schritt dem darauf basierenden Aufbau des hybriden FAS Prototyps und der Anwendungsfall-spezifischen Anpassung des Fahrsimulators durch den Systemintegrator. Der Prozessschritt **Aufbau Spezifikation (4)** dient der Spezifikation der Testfälle und Testszenarien durch den Prüfer.

Im Prozessschritt **„Aufbau Planung (3**)“ wird folgendem Vorgehen gefolgt**:** Zunächst werden die Testmethoden sowie die Abdeckungskriterien und Testabschlusskriterien durch den Prüfer definiert. Die geplanten Tests werden anschließend strukturiert und priorisiert. Entsprechend der Anforderungen der Prüfspezifikation erfordert die Anpassung des Fahrsimulators durch den Systemintegrator auf den Anwendungsfall. Dabei kann vereinfacht werden: So erfordert beispielsweise nicht jeder Anwendungsfall eine vollständige 360° Visualisierung und Audio-Simulation. Und auch die vollständig entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.4 umgesetzte hochdynamische Bewegungssimulation ist nicht in jedem Anwendungsfall erforderlich. Anschließend erfolgt der Aufbau des hybriden FAS Prototyps durch den Systemintegrator. Zu diesem Zweck werden auf Basis der E/E Spezifikationen die Sensoren, Aktoren und Car2X Elemente ausgewählt, im Simulationssystem modelliert und nach den Vorgaben der 3D-E-CAD Modelle der Elektrik-Installation positioniert und ausgerichtet. Auf Basis des MMS Basisentwurfs werden die passenden Baukasten-Hardwareelemente ausgewählt und nach den anthropometrischen und ergonomischen Vorgaben des 3D CAD-Modells in den Fahrsimulator eingebaut. Es folgt die Implementierung der in der Teilsystem-Entwicklung erstellten, funktionalen CASE-Tool Prototypen und vordefinierten, digitalen Anzeige-Inhalte. Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben unterstützen Mechatronik- und MMS-Entwickler diesen Prozessschritt bei Bedarf mit Spezialisten-Wissen.

Im Prozessschritt **Aufbau Spezifikation (4)** wird entsprechend der Vorgaben des V-Modell XT die Prüfspezifikation um Testfälle und die dort enthaltenden Informationen wie Startzustand des Systems, Testablauf und erwarteter Endzustand des Systems erweitert (vergleiche Weit e.V. 2017, S. 87). Es folgen der Aufbau der virtuellen Fahrumgebung, der Aufbau des virtuellen Fahrzeugs sowie der Aufbau der Testszenarien durch den Systemintegrator.

Abbildung 102 zeigt diese beiden Prozessschritte des **zweiten Prozessteils „Aufbau des hybriden FAS Prototyps“,** die verantwortlich und unterstützende agierenden Rollen sowie Ein- und Ausgangsartefakte.

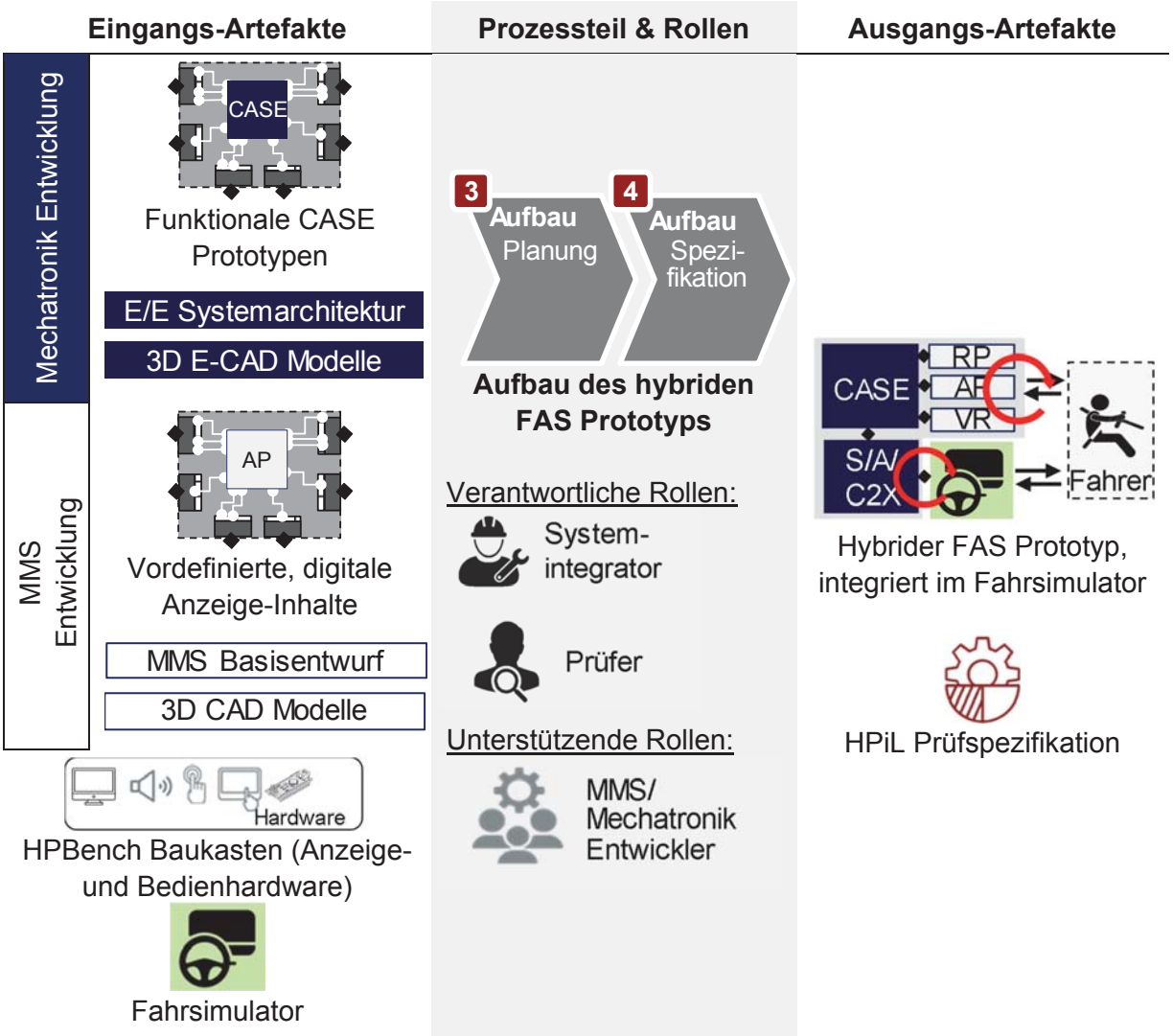


Abbildung 102: Zweiter Prozessteil „Aufbau des hybriden FAS Prototyps“, Rollen und Eingangs-/ Ausgangsartefakte

Der Prozessschritt des HPiL Prozesses **„Test Durchführung (5)“** dient der Durchführung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests durch den Prüfer entsprechend der Vorgaben der HPiL Prüfspezifikation. Der Prozessschritt „**Test Aufnahme (6)“** dient der Aufnahme von „Offline-Testdaten“ durch den Prüfer jeweils nach Testdurchführung. Der finale Prozessschritt des HPiL Prozesses **„Test Auswertung & Abschluss (7)“** dient der Zusammenfassung und Auswertung der Testergebnisse durch den Prüfer.

In der **„Test Durchführung (5)“** werden die Testfälle und Testszenarien mit dem Anwender in Interaktion mit dem FAS durchgeführt. Über das HPBench Operator-Panel kann der Prüfer die Verhaltensmodelle im CASE-Tool, die Anzeige- und Bedienprototypen im AP-Tool sowie die im Simulationssystem modellierten Sensoren, Aktoren und Car2X-Modelle während des laufenden Tests „online“ parametrieren. Während des Tests werden Online Testdaten, wie Zustandsdaten der Verhaltens- und Anzeigemodelle, Positions- und Lagedaten des virtuellen Fahrzeugs oder Sensorinformationen

aufgenommen. „Offline“-Änderungen zwischen den Test werden durch den Systemintegrator durchgeführt. Der HPBench Baukasten unterstützt den schnellen „Offline-“ Austausch durch die Bereitstellung der modularen Anzeigen und Bedienhardware.

In der „**Test Aufnahme (6)“** werden „Offline“-Testdaten durch nachgelagerte Erhebungsmethoden, beispielsweise Fragebögen oder Testprotokolle, generiert.

In der **„Test Auswertung & Abschluss (7)“** werden die Testergebnisse entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.2.3 dokumentiert und analysiert. Dazu werden die Ist-Ergebnisse des Tests dessen Soll-Ergebnissen durch den Prüfer gegenübergestellt und analysiert. Auf Basis der Gegenüberstellung werden Korrekturvorschläge durch den Prüfer erarbeitet. Der Systemintegrator kann diese Aktivitäten bei Bedarf unterstützen. Die Ergebnisse werden im HPiL Prüfbericht zusammengefasst.

Abbildung 103 zeigt diese drei Prozessschritte des abschließenden **dritten Prozessteils „HPiL Test des hybriden FAS Prototyps“,** die verantwortlich und unterstützende agierenden Rollen sowie Ein- und Ausgangsartefakte.

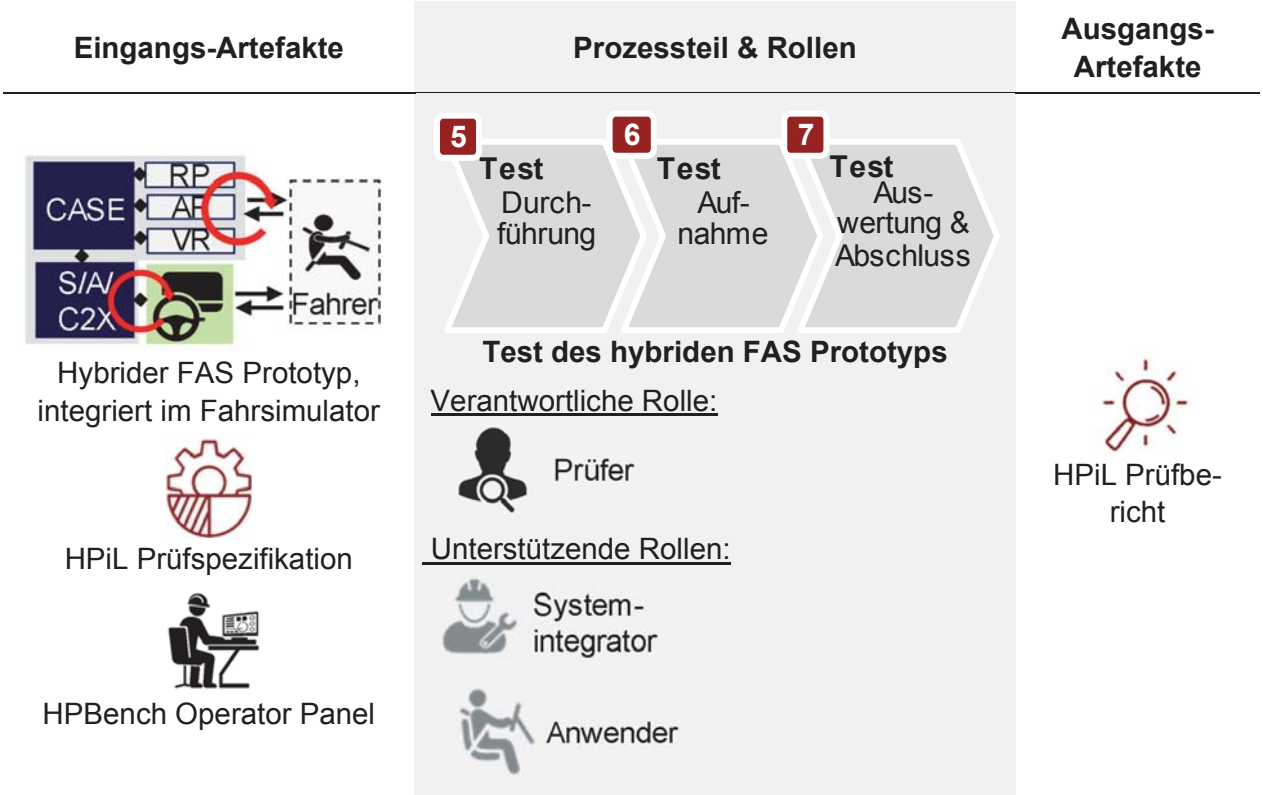


Abbildung 103: Dritter Prozessteil „HPiL Test des hybriden FAS Prototyps“, Rollen und Eingangs-/ Ausgangsartefakte

Wie zu Beginn von Kapitel 6 definiert, beschreiben die Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Methoden das konkrete Vorgehen innerhalb des HPiL Prozesses zum Aufbau und HPiL Test des hybriden FAS Prototyps. Daher wird definiert:

Die methodischen Schritte, die das konkrete Vorgehen innerhalb siebenstufigen HPiL Prozesses beschreiben, werden zu den **Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Methoden** zusammengefasst.

Die detaillierte Beschreibung dieser Aufbau- und Testmethoden sind **Anhang D** zu entnehmen.

Die entwickelte HPiL Methodik bietet verschieden Potentiale für den frühen Beherrschbarkeits-Test in der Entwicklung von FAS. Diese sollen nachfolgend analysiert werden.

6.4 Analyse der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik und Synthese zur zweiten Forschungshypothese

Die HPiL Methodik stellt **formalisierte Elemente** zur Unterstützung des effizienten und schnellen Aufbaus und Test hybrider FAS Prototypen in industriellen FAS Entwicklungsprozessen bereit. Diese beinhalten den Aufbau- und Testprozess, die Artefakte und Prozessschritte verantwortenden Rollen, die zur Erstellung der Prozess-Artefakte anzuwendenden Methoden sowie eine Palette an Werkzeugen zur deren Unterstützung. Die HPiL Methodik basiert auf etablierten Ansätzen zur **Reduktion der Aufbau- und Änderungszeit** von Soft- und Hardware: Zum einen der Standardisierung von Produkt- und Prozesselementen, zum anderen der Wiederverwendung von Elementen aus vorherigen Entwicklungen. Diese Ansätze ermöglichen die prozessuale Entkopplung des Aufbaus der standardisierten Elemente und Testumgebung von dem des Prototyps und damit eine Verkürzung der Prozessschritte der prototypenbasierten Integration.

Der Prototypenbau wird durch die Bereitstellung der vorgeplanten HPBench Framework-Struktur unterstützt, aus der durch Auswahlentscheidungen eine Konfiguration der anwendungsfallspezifischen HPBench-Umgebung zum Aufbau und HPiL Test des hybriden Prototyps abgeleitet werden kann. Die frühzeitige Bereitstellung des HPBench Templates an die Teilsystem-Entwickler des mechatronischen Regelsystems und der Mensch-Maschine Schnittstelle ermöglicht das Frontloading verschiedener Änderungs- und Konfigurationsschritte des hybriden FAS Prototyps in die Teilsystem-Entwicklung. Durch dieses Vorgehen kann Zeit und Aufwand in der Integration zum hybriden FAS Prototyp eingespart werden. Der Aufbau der Anzeigen und Bedienelemente wird zusätzlich durch den HPBench Baukasten unterstützt. Dieser stellt verschiedene Soft- und Hardwarebausteine für das Prototyping bereit, mit denen hybride Anzeigen und Bedienelemente schnell aufgebaut und integriert werden können. Verbunden mit dem modularen Aufbau zielen alle diese Ansätze auf eine **höhere Flexibilität** des Fahrsimulator-basierten Tests sowie der in ihm eingesetzten Werkzeuge.

Die Effizienzsteigerung, die durch die Ansätze der Formalisierung, Standardisierung sowie eines „schnellen“ Rapid Prototyping im Aufbau von testbaren FAS Prototypen möglich ist, kann zu einer höheren **Verfügbarkeit von Fahrsimulatoren** im Unternehmen führen. Die Bereitstellung der HPBench Templates an die Entwickler ermöglicht den Aufbau der digitalen Anzeigeinhalte im AP Tool und Verhaltensmodelle im CASE-Tool, ohne das direkt am Fahrsimulator gearbeitet werden muss. Der modulare Aufbau des HPBench Frameworks ermöglicht die effiziente Einbindung dieser Prototypen sowie der ebenso modularen Baukastenelemente: Auch dies spart Arbeitszeit am Fahrsimulator. Die in der Arbeit entwickelten Gestaltungsparameter ermöglichen zudem einen zielgerichteten Aufbau und eine Konfiguration von Fahrsimulatoren für den Beherrschbarkeitstest auf Basis bestehender Infrastruktur. Dies kann dem einsetzenden Unternehmen helfen, den Test im Fahrsimulator investitions- und betriebskosteneffizienter anzubieten und damit für mehr Nutzer im Unternehmen verfügbar zu machen.

Der modulare Aufbau des HPBench Frameworks ermöglicht die Umsetzung einer großen Palette an verschiedenen Testumgebungen. Wie beschrieben können Setups für die **Vernetzung** und **Kooperation von FAS** oder der **Car2X-Kommunikation** erzeugt und getestet werden. Aber auch **hochautonome Funktionen** können durch entsprechende Verhaltensmodelle in einer für den Test nutzbaren Form erzeugt werden. Die Online-Parametrierbarkeit der Verhaltensmodelle ermöglicht weitere Tests: So können

beispielsweise **kundenindividuelle Funktionen** durch entsprechende Parametersteuerung simuliert werden. Oder auch das „Lernen“ eines Systems durch die Kopplung von **Machine-Learning Tools** und Algorithmen an die entsprechenden Parameter. Der modulare Aufbau der Anzeige- und Bedienelemente des HPBench Baukastens ermöglicht eine schnelle Umsetzung **verschiedener Interaktionsformen** bis hin zum Test **kundenindividueller** Anzeige- und Bedienfunktionen. So können beispielsweise **Übergabeszenarien**, die auf neuartige und bisher unerprobte Schnittstellen setzen, frühzeitig und kostengünstig getestet werden.

Es kann damit zusammengefasst werden:

Die auf den Ansätzen der Standardisierung und Wiederverwendbarkeit basierenden Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik bietet das Potential, die Anforderungen des FAS Entwicklungsprozesses effizient durch eine bedarfsgerechte Einbindung des HPiL Testverfahrens zum frühestmöglichen Beherrschbarkeitstest hybrider FAS Prototypen erfüllen zu können.

Die **zweite Forschungshypothese H II.** zur Beantwortung der Forschungsfrage F II. wird daher entsprechend der Analyse wie folgt gestellt:

H II. Mit der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik können hybride Fahrerassistenzsystem-Prototypen im industriellen Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess effizient und schnell aufgebaut und in industrierelevanten Setups frühzeitig umfassend hinsichtlich Beherrschbarkeit getestet werden.

Im nachfolgenden Kapitel soll diese Hypothese experimentell mit verschiedenen Tests evaluiert werden.

Kapitel 7

Evaluation der Forschungshypothesen

Your assumptions are your windows on the world. Scrub them off every once in a while, or the light won't come in.

(Alda 1980)

7 Evaluation der Forschungshypothesen

Das vorliegende Kapitel dient der E**valuation der zwei Forschungshypothesen H I. und H II.**:

H I. Mit dem Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren kann ein auf Domänen-Prototypen basierender, umfassender Test der Beherrschbarkeit des Fahrerassistenzsystems früher als im Stand der Technik durchgeführt werden.

H II. Mit der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik können hybride Fahrerassistenzsystem-Prototypen im industriellen Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess effizient und schnell aufgebaut und in industrierelevanten Setups frühzeitig umfassend hinsichtlich Beherrschbarkeit getestet werden.

Die nachstehende **Abbildung 104** zeigt die Verortung des Kapitels in den Kontext der Arbeit.

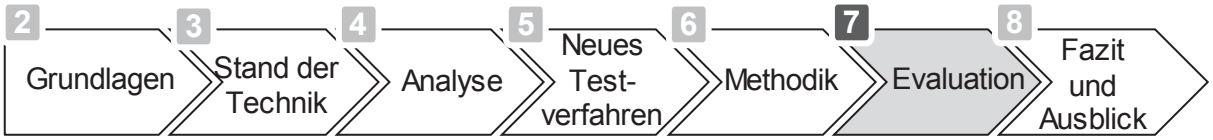


Abbildung 104: Verortung des Kapitels „7. Evaluation der Forschungshypothesen“ in der Arbeit

Der hybride FAS Prototyp ist aus früheren Domänen-Prototypen des FAS Entwicklungsprozesses zusammengesetzt, als die Prototypen, die im Stand der Technik des Beherrschbarkeits-Tests zum Einsatz kommen. Die **Verifikation der ersten Forschungshypothese** erfordert daher den Nachweis, dass der hybride FAS Prototyps und die mit ihm durchgeführten Tests valide für den Test der Beherrschbarkeit sind. Wie in Kapitel 2.2.2 ausgeführt, erfordert der Nachweis der Validität die **Korrektheit** des Inhalts und der Struktur des Prototyps sowie der zugehörigen Dokumente, Daten und Informationen. Dazu muss die **Angemessenheit** des Prototyps und der Angemessenheit der in dessen Test erreichbaren Ergebnisses durch die Kriterien Genauigkeit, Aktualität, Eignung, Plausibilität und Verständlichkeit nachgewiesen werden. Der hybride FAS Prototyp und der mit diesem durchgeführte HPiL Test muss daher die folgenden Anforderungen erfüllen:

(A 1) Der hybride FAS Prototyp muss für den Verwendungszweck geeignet sein, das FAS also angemessen für den umfassenden Beherrschbarkeits-Test abbilden.

(A 2) Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss geeignet und aufgabenangemessen für den Zweck und das Untersuchungsinteresse des Beherrschbarkeits-Tests sein.

(A 3) Die Anzeigen und Bedienelemente des hybriden FAS Prototyps müssen verständlich für den Anwender sein.

(A 4) Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss für den Anwender verständlich und durchführbar sein.

(A 5) Der Aufbau des hybriden FAS Prototyps muss für den Systemintegrator durchführbar sein.

(A 6) Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss für den Prüfer durchführbar sein.

Die **Verifikation der zweiten Forschungshypothese** erfordert zum einen den Nachweis der **Anwendbarkeit und Nutzbarkeit der Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Methodik** im industriellen FAS Entwicklungsprozess. Zum anderen müssen die in Kapitel 4.2 definierten Anforderungen erfüllt werden: Der Einsatz der HPiL Methodik muss **Vorteile gegenüber dem Stand der Technik** haben. Die HPiL Methodik muss daher die folgenden Anforderungen erfüllen:

(A 7) Die HPiL Methodik muss kompatibel mit industriellen Entwicklungs- und Testprozessen, -methoden und -werkzeugen sein.

(A 8) Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren vergleichbare Nutzbarkeit des HPiL Testverfahrens für den Systemintegrator und den Prüfer ermöglichen.

(A 9) Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren höhere Nützlichkeit des HPiL Testverfahrens für den Systemintegrator und den Prüfer aufweisen.

(A 10) Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren vergleichbare Beanspruchung der Rollen Systemintegrator und Prüfer aufweisen.

(A 11) Der Fahrsimulator im HPiL Test soll flexibler einsetzbar sein als Fahrsimulatoren des Stands der Technik.

(A 12) Der Aufbau der Hardware des hybriden FAS Prototyps soll weniger als 1 h dauern.

(A 13) Der Aufbau der Software des hybriden FAS Prototyps soll weniger als 0,5 h dauern.

(A 14) Durch Einsatz des HPiL Testverfahrens Tests müssen Erkenntnisse in gegenüber bestehenden Testverfahren höherer Qualität oder größerem Umfang erlangt werden können.

Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, muss die Beherrschbarkeit eines FAS vor Beginn dessen Serienproduktion nachgewiesen werden. Es muss nachgewiesen werden, dass der Fahrer in den relevanten Szenarien entsprechend der Auslegungskriterien sowie der Situation angemessen reagiert. Wie in Kapitel 4.3 ausgeführt, kann dieser Nachweis auf zwei Arten im Test erbracht werden:

- Zum einen, indem der Nachweis durch das FAS Entwicklungsteam selbst erbracht wird. Dazu muss die Erfüllung einer Anforderungsliste durch verschiedene Tests in den relevanten Szenarien nachgewiesen werden.
- Zum anderen kann der Nachweis im Test mit einer statistisch signifikanten Gruppe naiver Probanden ohne Bezug zum Entwicklungsprozess in den relevanten Szenarien erbracht werden.

Hinsichtlich der Qualitätskriterien der empirischen Evaluation zeigen beide Vorgehensweisen verschiedene Vor- und Nachteile für die Evaluation der Anforderungen:

So kann nur im Test mit Entwicklern die Anwendung der Werkzeuge und Methoden der Integration des hybriden Prototyps gezeigt werden. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben dient die Erhöhung der Immersion einer virtuellen Testumgebung der Erhöhung der Präsenz des in ihr agierenden Nutzers. Virtuelle Elemente sind für den Nutzer umso besser beurteilbar, je höher die Immersion der Testumgebung ist. Eine Beurteilungsfähigkeit wird jedoch auch durch Vorwissen über den Testgegenstand, wie es insbesondere bei den an der Entwicklung beteiligten Akteuren vorhanden ist, erzeugt. Eine Testumgebung für einen naiven Probanden stellt damit höhere Anforderungen an Immersion als eine Testumgebung für den Experten aus dem Entwicklungsteam. Beim Einsatz des Entwicklers in der Rolle des Prüfers sind damit auch Tests mit hybriden

FAS Prototypen und Fahrsimulatoren geringerer Abbildungsqualität und geringerem Abbildungsumfang möglich. Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, sollte die Rolle des Prüfers nicht durch dessen Entwickler angenommen werden. Ein Prüfer sollte daher nicht der Ersteller des hybriden FAS Prototyps und der diesem zugrundeliegenden Entwicklungsprototypen sein, denn dies limitiert die Glaubwürdigkeit des Nachweises durch das FAS Entwicklungsteam. Die Rolle des Prüfers ist somit im Nachweis durch das FAS Entwicklungsteam kritisch zu betrachten. Analog ist der Einsatz des Entwicklers als Anwender im Test „seiner“ Entwicklungsprototypen kritisch zu betrachten. Wie in Kapitel 3.4.2 ausgeführt, erfordert der Nachweis der Beherrschbarkeit in Tests große Probandengruppen. Der valide Nachweis durch das FAS Entwicklungsteam selbst ist nur bei entsprechend großen Entwicklungsteams möglich, ansonsten ist der Test mit Entwicklern von limitierter Zuverlässigkeit.

Beide Vorgehensweisen haben also jeweils spezifische Vor- und Nachteile für einen Nachweis der Beherrschbarkeit. In der Evaluationsstudie wird daher eine **Evaluation sowohl durch das FAS Entwicklungsteam** als auch mit einer **statistisch signifikanten Gruppe naiver Probanden** durchgeführt. Zu Beginn wird in Kapitel 7.1 zunächst der Anwendungskontext definiert und ein FAS zur Erfüllung dessen Anforderungen entwickelt. Anschließend wird der erste Prozessteil „Aufbau der HPBench“ in Kapitel 7.2 durchgeführt. In der **ersten Evaluationsstudie** in Kapitel 7.3 wird der hybride FAS Prototyp entwicklungsbegleitend durch dessen Entwicklungsteam im HPiL Test auf Beherrschbarkeit getestet. Ziele der Studie sind die Evaluation des HPiL Testverfahrens sowie der HPiL Methodik zur Unterstützung dessen effizienten Einsatzes im industriellen Entwicklungsprozess. In der **zweiten Evaluationsstudie** in Kapitel 7.4 wird ein auf Basis der Erkenntnisse der ersten Studie weiterentwickeltes FAS durch eine Gruppe naiver Probanden im HPiL Test auf Beherrschbarkeit getestet. Ziel ist die Evaluation von dessen Validität für den frühen Beherrschbarkeits-Test von FAS. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, stellen neuartige, hochautonome Fahrfunktionen ab SAE Level 3 hohe Herausforderung an den zukünftigen Beherrschbarkeits-Test. Die **dritte Evaluationsstudie** in Kapitel 7.5 dient daher der Evaluation der Fähigkeit des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests für den Beherrschbarkeits-Test verschiedener, mit dem hochautonomen Fahren verknüpfter Gestaltungstrends. Es folgt eine Analyse der Übertragbarkeit des HPiL Testverfahrens für andere Testumgebungen in Kapitel 7.6. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Evaluationen und die Analyse der Anforderungserfüllung in Kapitel 7.7.

7.1 Definition des Anwendungsfalles und Erstellung des Prüfkonzepts

Das vorliegende Kapitel startet mit der Definition der grundlegenden Informationen, die zur Erstellung der HPBench, der Konfiguration des Fahrsimulators sowie als Input für die Durchführung des HPiL Tests erforderlich sind. Zunächst wird ein für die FAS Entwicklung repräsentativer und relevanter Anwendungsfall definiert. Es folgt die Beschreibung des Entwicklungsprojektes eines FAS zur Unterstützung des Fahrers im Anwendungsfall. Anschließend folgt die Beschreibung der für die Evaluation verfügbaren Infrastruktur.

7.1.1 Anwendungsfall der Evaluation

Die Gestaltung eines Anwendungsfalles, in dem ein für den Stand der Technik repräsentatives FAS mit der HPiL Methodik getestet wird, stellt nach den Ausführungen in Kapitel 2.2.2 folgende Anforderungen: Das FAS muss **geeignet und aktuell** sein, also

dem Stand der Technik der FAS Entwicklung entsprechen oder über diesen hinausgehen. Das FAS muss **vollständig** sein: Es sollen sowohl Funktionen des mechatronischen Regelsystems als auch Interaktionen zwischen Fahrer und Fahrzeug abgebildet werden können – und das bidirektional. Außerdem muss das FAS **hinreichend komplex** sein, so dass sinnvolle, nicht triviale Tests sowohl der Mechatronik als auch der Fahrer-FAS Interaktion möglich sind.

Zur Erfüllung der Anforderungen wird der Anwendungsfall **Bicycle Collision Avoidance System (BCAS)** ausgewählt: Ein FAS zur Vermeidung von Kollisionen zwischen Personenkraftwagen (PKW) und Fahrrädern. Die **Eignung** dieses Anwendungsfalles ergibt sich aus den Ausführungen des statistischen Bundesamtes zur Unfallentwicklung in Deutschland. Trotz eines Rückganges der Gesamtzahl der Verkehrstoten um insgesamt 13% zwischen 2010 und 2017, stagnierte die Anzahl an tödlich verunglückten Fahrradfahrern in diesem Zeitraum (Statistisches Bundesamt 2018, S. 29). 91% der Unfälle von Fahrrädern mit Personenschaden ereignen sich innerorts, zumeist unter Beteiligung eines PKW als Unfallgegner (Statistisches Bundesamt 2018, S. 32). Von diesen Unfällen verschuldeten die PKW Fahrer etwa 75%, im innerstädtischen Bereich primär durch Fehler beim Abbiegen (nach Statistisches Bundesamt 2018, S. 33; ADFC Berlin 2017). Für die Stadt Berlin ist die Unfallverteilung in **Abbildung 105** für die Jahre 2011 bis 2016 dargestellt.

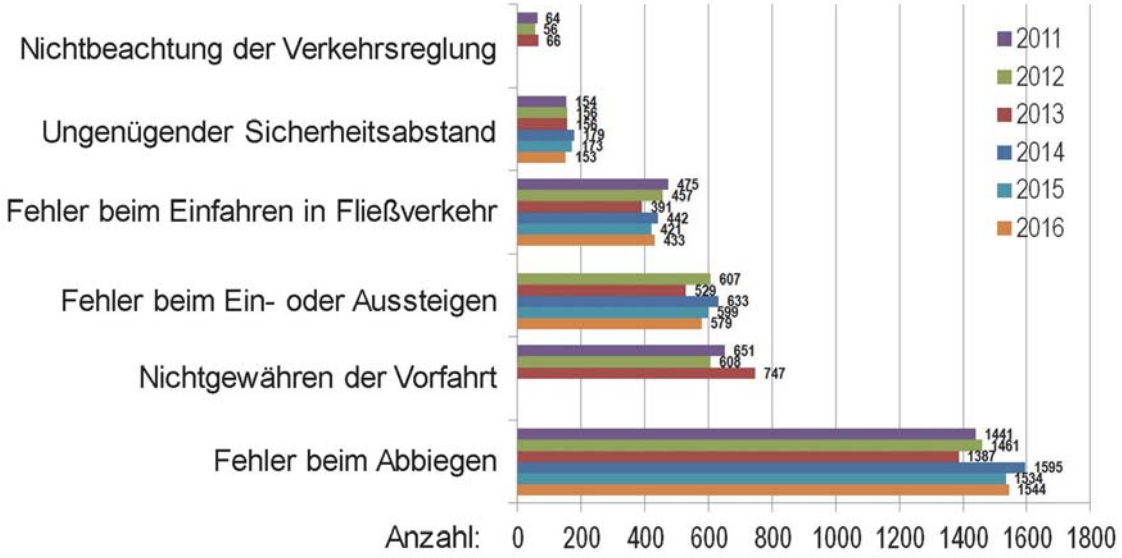


Abbildung 105: Statistik der Unfallurachsen von PKW gegenüber Radfahrern in Berlin 2011 bis 2016 (ADFC Berlin 2017)

Es ist erkennbar, dass Verkehrssituationen mit einem fahrenden PKW eine sehr hohe Unfallträchtigkeit aufweisen. So führen Fehler beim Abbiegen, ein Nichtgewähren der Vorfahrt, Fehler beim Einbiegen in den Fließverkehr, ein ungenügender Sicherheitsabstand und eine Nichtbeachtung der Verkehrsführung durch den PKW-Fahrer zu knapp 83% der durchschnittlich 3400 jährlichen Unfälle in Berlin. Fehler beim Ein- und Aussteigen, die einen stehenden PKW voraussetzen, sind dagegen für etwa 17% der Unfälle ursächlich. Obwohl die Kritikalität von Abbiegesituationen bereits erkannt ist, sind bisher nur vereinzelt Maßnahmen umgesetzt. So setzen verschiedenen politische Akteure wie der Berliner Senat oder das Verkehrsministerium auf eine Selbstverpflichtung für Lastkraftwagen (LKW), nach der nur mit einem Abbiegeassistenzsystem ausgerüstete LKW für deren Fuhrparks gekauft werden sollen (vergleiche Tagesspiegel.de 2018; Spiegel Online 2018). Eine europaweite Verpflichtung zum Einbau von

Notbremsassistenzsystemen zur Verhinderung von Rechtsabbiegeunfällen in LKW wird jedoch bereits für das Jahr 2020 erwartet (Seiniger et al. 2017, S. 328). Darüber hinaus hat die Europäische Kommission angekündigt, Notbremssysteme für den Schutz von Fahrradfahrern ab 2026 auch für PKW verpflichtend zu machen (Seiniger et al. 2017, S. 329). Die Entwicklung derartiger FAS zur Ausrüstung, aber auch zur Nachrüstung von PKW ist daher **hoch relevant** für die zukünftige Fahrzeugentwicklung. Aktive FAS, die im kritischen Gefahrenfall selbstständig eine Notbremsung auslösen, bieten das Potential die Unfallschwere signifikant zu reduzieren und damit den Anteil tödlicher Unfälle zwischen Fahrrad und PKW massiv zu senken (Mingkamp et al. 2017, S. 108). Dazu bieten diese Systeme auch die Möglichkeit der Vermeidung von Unfällen, indem sie den Fahrer bereits frühzeitig vor der drohenden Kollision mit dem Fahrrad warnen.

Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.1.1 handelt es sich um ein FAS, das dem Fahrer im Fall einer kritischen Situation einen Teil der Fahrzeugsteuerung, in diesem Fall die Geschwindigkeitssteuerung, abnimmt. Der Fahrer muss diesen Eingriff permanent überwachen und jederzeit die volle Kontrolle übernehmen können. Dazu soll das BCAS den Fahrer warnen, so dass dieser bereits die Entstehung kritischer Situationen frühzeitig verhindern kann. Damit kann das zu BCAS als ein **geeignetes**, aus drei verschiedenen FAS des Standes der Technik **zusammengesetztes FAS nach SAE Level 1** verstanden werden:

1. Einem FAS zur **Fahrrad-Erkennung** (SAE Level 0) mittels Umfeld Sensorik, das dem Fahrer des PKWs eine Anzeige über dessen relative Position zum PKW gibt,
2. Einem **Sicherheitsabstand-Warnsystems** (SAE Level 0), das dem Fahrer eine visuelle sowie akustische Anzeige über eine kritische Annäherung des PKWs an ein Fahrrad gibt, sowie
3. Einem **Kollisionsvermeidungssystem** (SAE Level 1), das auf Basis von Umfeld- und Fahrzeug-Sensorinformationen eine Notbremsung bei Gefahr auslöst.

Das System ist insofern **vollständig**, als dass alle Elemente eines FAS entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.1.4 enthalten sind. Dies sind zum einen Sensoren zur Informationsbeschaffung von Fahrzeug und Fahrumgebung. Eine Steuerung, die diese Informationen verarbeitet und bei kritischer Annäherung an ein Fahrrad den Fahrer zuerst über visuelle, akustische und haptische Anzeigen warnt. Zudem wird bei kritischer Annäherung durch die Steuerung eine Notbremsung über das Bremssystem ausgelöst und gegebenenfalls zusätzlich die Motordrehzahl reduziert. Die Einbindung von Bedienelementen zur System-Aktivierung und Deaktivierung ermöglicht die bidirektionale Fahrer-FAS-Interaktion und verschafft dem Fahrer die Fähigkeit, das System jederzeit zu übersteuern. Der Einsatz einer Car2X Kommunikation ist für ein Bremsassistenzsystem zwar nicht zwingend erforderlich, kann aber als zusätzliches Element der Informationsbeschaffung eingesetzt werden, um Limitationen heutiger Sensoren, die zumeist auf eine Sichtverbindung zum Messobjekt angewiesen sind, zu überwinden (Leschke und Weinert 2016, S. 9; Eichhorn und Zahn 2015, S. 217). Das BCAS bildet damit einen **repräsentativen Querschnitt der Systemelemente heutiger FAS** ab. **Tabelle 18** zeigt das BCAS in der in Kapitel 3.1.1 eingeführten Kategorisierung.

Tabelle 18: Kategorisierung des zu entwickelnden BCAS im Anwendungsfall

SAE Level	Bezeichnung Fahrerassistenzsystem	Informations-beschaffung				Eingriff			Anzeige		
		Fahrzeug-Sensor	Umfeld-Sensor	Fahrer-Sensor	Car2X	In Bremssystem	In Lenksystem	In Motorsteuerung	Visuell	Akustisch	Haptisch
1	Bicycle Collision Avoidance System (BCAS)	x	x		o	x		o	x	x	x

Legende: **x**: Erforderlich, **o**: Optional

Der Anwendungsfall kann damit **geeignet** und **aktuell**, das untersuchte FAS **vollständig** und **hinreichend komplex** eingestuft werden.

7.1.2 Entwicklungsprojekt zur Bereitstellung des Bicycle Collision Avoidance Systems (BCAS)

Orientiert an den Ausführungen von Kapitel 7.1.1 wird das BCAS in einem universitären Entwicklungsprojekt entwickelt. Die Mitglieder der Projektteams übernehmen die jeweils erforderlichen Entwickler-Rollen „Mechatronik Entwickler“ und „MMS Entwickler“ und erstellen unter Einsatz industrieller Methoden und Werkzeugen verschiedene Modelle und Prototypen als Entwicklungsartefakte.

In der Entwicklung werden folgende Werkzeuge zur Modell- und Dokumentenerstellung eingesetzt:

- Die Software-Suite CATIA V6 zur Modellierung der Anforderungs-, Funktions- und Systemarchitektur und der CAD-Modellierung,
- das CASE-Tool Dymola für die Modellierung von Verhaltensmodellen,
- das AP Tool Processing für die Modellierung digitaler Anzeigeinhalte,
- das Simulationssystem dSpace ASM für die Sensor-, Aktor und Car2X-Modellierung. Und zur Darstellung der virtuellen Fahrumgebung, dem virtuellen PKW und Fremdfahrzeugen und Infrastruktur, sowie
- die Microsoft Office Suite zur Erstellung von Spezifikationen, Konzepten, Berichten und Protokollen.

In der 3D Modellierung ist CATIA insbesondere in der Automobilindustrie heute weit verbreitet (Weber 2009, S. 42; Bubb 2015, S. 359). Das Simulationssystem dSpace ASM wird beispielsweise in der Fahrzeugentwicklung bei Porsche und Hyundai eingesetzt (dSPACE 2018a). Wie bereits in Kapitel 3 im Rahmen des beispielhaft aufgeführten VW Parkbremsassistenzsystems beschrieben, wird Dymola in der heutigen Fahrzeugentwicklung beispielsweise in der Modellierung und Simulation von Antriebssträngen eingesetzt, wohingegen Processing beispielsweise bei Intel oder Google in der MMS Gestaltung im Einsatz ist. Unter Einsatz der industriellen Methoden und Werkzeuge entwickelten die drei Projektteams jeweils ein BCAS.

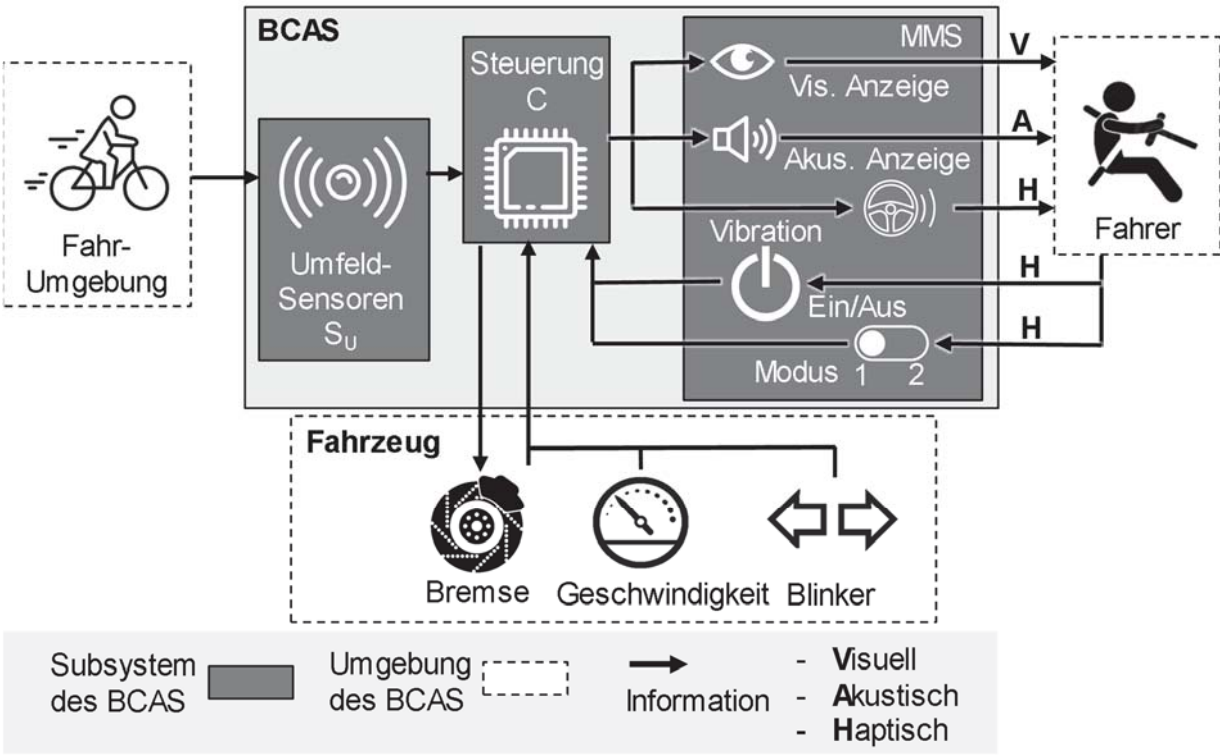


Abbildung 106: Systemarchitektur des BCAS (nach Grohmann et al. 2017, S. 17)

Abbildung 106 zeigt die aus der Entwicklung resultierende Systemarchitektur exemplarisch für eines der drei Projektteams. Das dargestellte System BCAS besteht aus drei Teilsystemen, die mittels Informationsflüssen mit dem Fahrer, dem Fahrzeug und der Fahrumgebung interagieren:

- Den **Umfeld-Sensoren S_U** zur Erfassung und Evaluation der Fahr-Umgebung und damit der Feststellung umgebender Fahrräder,
- Der **Steuerung C** zur Verarbeitung der Eingangssignale der Umfeld-Sensoren und der Fahrzeug-Zustandsinformationen „Geschwindigkeit“ und „Betätigung des Blinkerhebels“. Zur Vorgabe eines aktiven Eingriffes in die longitudinale Steuerung des PKWs durch das zum PKW eigene Bremssystem. Sowie zur Anweisung der Ausgabe visueller, akustischer und haptischer Anzeigen an den Fahrer durch die Mensch-Maschine Schnittstelle.
- Der **Mensch-Maschine Schnittstelle (MMS)** für die bidirektionale Interaktion zwischen Fahrer und BCAS. Dies beinhaltet die Elemente zur visuellen, akustischen und haptischen Anzeige nach Vorgabe der Steuerung. Sowie die haptischen Bedienelemente „Ein/Aus“ und „Modus“ zur Anweisung der Aktivierung/Deaktivierung und dem Modus-Wechsel des Systems an die Steuerung.

Ein Car2X System wird durch keins der drei Projektteams vorgesehen. Die nachfolgenden **Abbildung 107** zeigt die dynamische Funktionsweise des BCAS und den zeitlichen Ablauf der Warnungen und des Eingriffs in die Fahrzeugsteuerung in einem Sequenzdiagramm exemplarisch für das erste Projektteam. Wie in Kapitel 3.3.3 ausgeführt, beschreibt ein Sequenzdiagramm die zeitliche Abfolge von Aktivitäten sowie die Interaktion von Elementen, die zu dieser Abfolge führt. Das Projektteam setzt als visuelle Anzeige fünfstufige LED Streifen an der linken und rechten A-Säule ein. Vier um den Fahrer angeordnete Lautsprecher dienen der Wiedergabe akustischer Warnungen. Eine haptische Vibrationsanzeige im Lenkrad dient der Wiedergabe haptischer Warnungen. Als Bedienelement dient ein Touch-Screen in der Mittelkonsole.

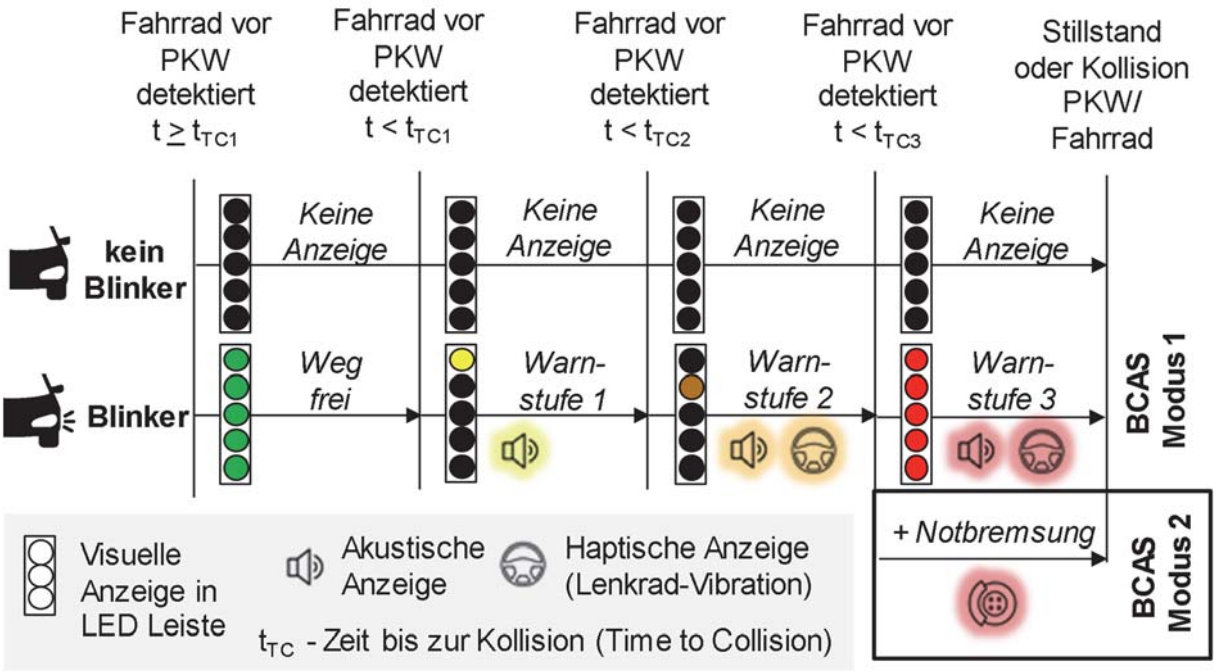


Abbildung 107: Sequenzdiagramm zur Darstellung der dynamischen Funktionsweise des BCAS

Die Abbildung zeigt die Funktionsweise des BCAS: Initial ist das BCAS ausgeschaltet, der Fahrer erhält keine Anzeige-Informationen. Der Fahrer aktiviert das BCAS über eine Bedieneingabe des „Ein/Aus“ Bedienelementes im Touchscreen. Das BCAS ist an den Blinker des PKWs gekoppelt: Es ist nur dann aktiv, wenn der Fahrer den Blinker setzt. Ist das BCAS eingeschaltet und gibt der Fahrer eine Abbiegeabsicht über Aktvierung des Blinkers, gibt das BCAS multimodales Feedback über die Anzeigen. Das Anzeigekonzept eskaliert die Warnstufe bei steigender Kritikalität der Verkehrssituation von einer rein visuellen Anzeige (grün, keine Warnung sowie gelb, Stufe 1) über gekoppelte visuell-akustische Anzeige der Stufe 2 bis hin zur visuell-akustisch-haptischen Warnung der Stufe 3. Die Kritikalität wird durch die Zeit bis zur Kollision (auch: Time to Collision, t_{TC}) bestimmt: Bei hoher Differenzgeschwindigkeit zwischen Fahrrad und PKW ist diese niedrig, bei niedriger Differenzgeschwindigkeit hoch. Durch die Warnanzeigen wird die Position des Fahrrads relativ zum PKW an den Fahrer übermittelt: In den Warnstufe 1 und 2 wird über die Position der LED eine Indikation der Fahrrad-Position vor oder hinter dem PKW angezeigt. Eine weitere Positionsanzeige findet über die Lautsprecher statt: Je nach Position des Fahrrades relativ zum PKW wird einer oder zwei der vier um den Fahrer angeordneten Lautsprecher angesteuert.

Durch Aktivierung des BCAS Modus 2 über den Touchscreen aktiviert der Fahrer die Notbremsfunktion des FAS: Bei Unterschreitung der kritischen Zeit zur Kollision t_{TC3} in Warnstufe 3 wird zusätzlich zur multimodalen Warnung eine Notbremsung ausgelöst.

Derselben funktionalen Sequenz folgend, unterscheidet sich die Ausgestaltung der MMS der drei Projektteams. Die nachfolgende **Tabelle 19** zeigt die ausgewählten Lösungselemente mit Bezug auf die durch Tabelle 5 und Tabelle 6 beschriebenen Anzeigen und Bedienelemente heutiger FAS. **Abbildung 108** zeigt anschließend die zugehörigen **3D CAD Modelle der MMS** der drei Projektteams.

Tabelle 19: MMS Lösungselemente der drei Projektteams

	Projektteam 1	Projektteam 2	Projektteam 3
Visuelle Anzeige	**Analog** Vierfarbige LED-Streifen mit analoger Näherungsanzeige an den A-Säulen	**Digital** Dreifarbige LEDs an den Außenspiegel **Bildhaft situations-analog** Näherungsanzeige im Kombi-Instrument	**Digital** Dreifarbige LEDs an den Außenspiegel **Bildhaft situations-analog** Näherungsanzeige im Head Up Display
Akustische Anzeige	**Nonverbal –** Tonsequenz		
	Warnung und 360° Positionsanzeige über über 4 Lautsprecher	Warnung und 360° Positionsanzeige über über 4 Lautsprecher	Warnung über 2 Front-Lautsprecher
Haptische Anzeige	**Aktive Oberflächenhaptik** Vibrationsmotoren im Lenkrad-Kranz		
Haptisches Bedien-element	**Hand Rotation/ Translation (analog + digital)** Touchscreen in Mittelkonsole	**Digitale Translations-bewegung von Hand/Arm** Kippschalter in Mittelkonsole	**Digitale Translations-bewegung von Hand/Arm** Drucktaster am Lenkrad

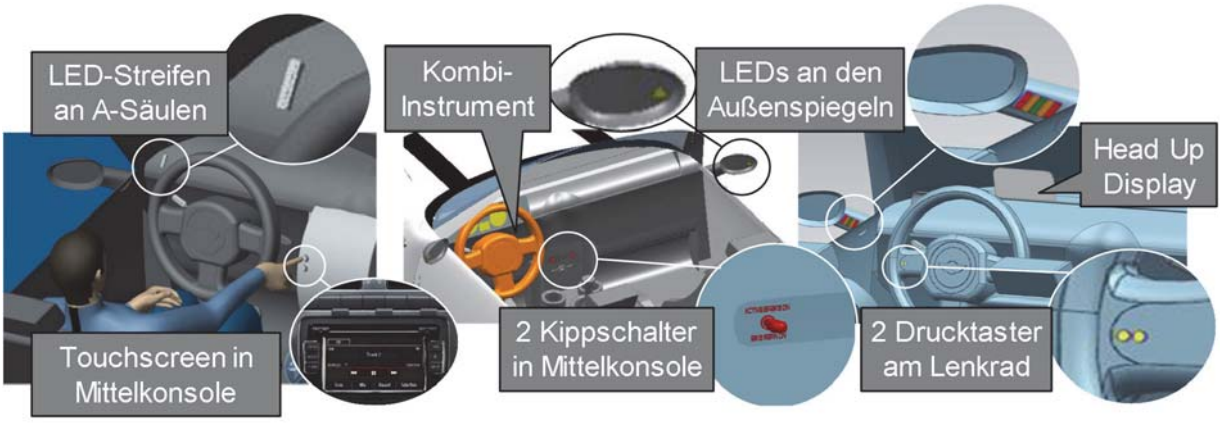


Abbildung 108: 3D CAD Modelle der MMS der drei Projektteams (Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017)

Nach den Vorgaben des jeweiligen Gestaltungskonzeptes werden durch alle drei Projektteams digitale Anzeigeinhalte im AP-Tool Processing erstellt. Das Gestaltungskonzept sowie die technische Spezifikation der MMS-Elemente aller drei Teams werden im MMS Basisentwurf zusammengefasst.

Die Prototypen des mechatronischen Regelsystems beinhalten die im CASE-Tool Dymola modellierten Prototypen der Steuerung (C), des Sensor-Steuergerätes (SS_U) und des Energiestellers (ES) sowie den Umgebungs-Sensor (S_U). Da sich die Lösungen der Projektteams in der Detailgestaltung, nicht jedoch hinsichtlich Wirkweise und Aufbau unterscheiden, sind die in Dymola modellierten Verhaltensmodelle des mechatronischen Regelsystems sowie das in CATIA Modellierte zugehörige 3D E-CAD Modell des Projektteams 1 repräsentativ für alle Projektteams in **Abbildung 109** dargestellt.

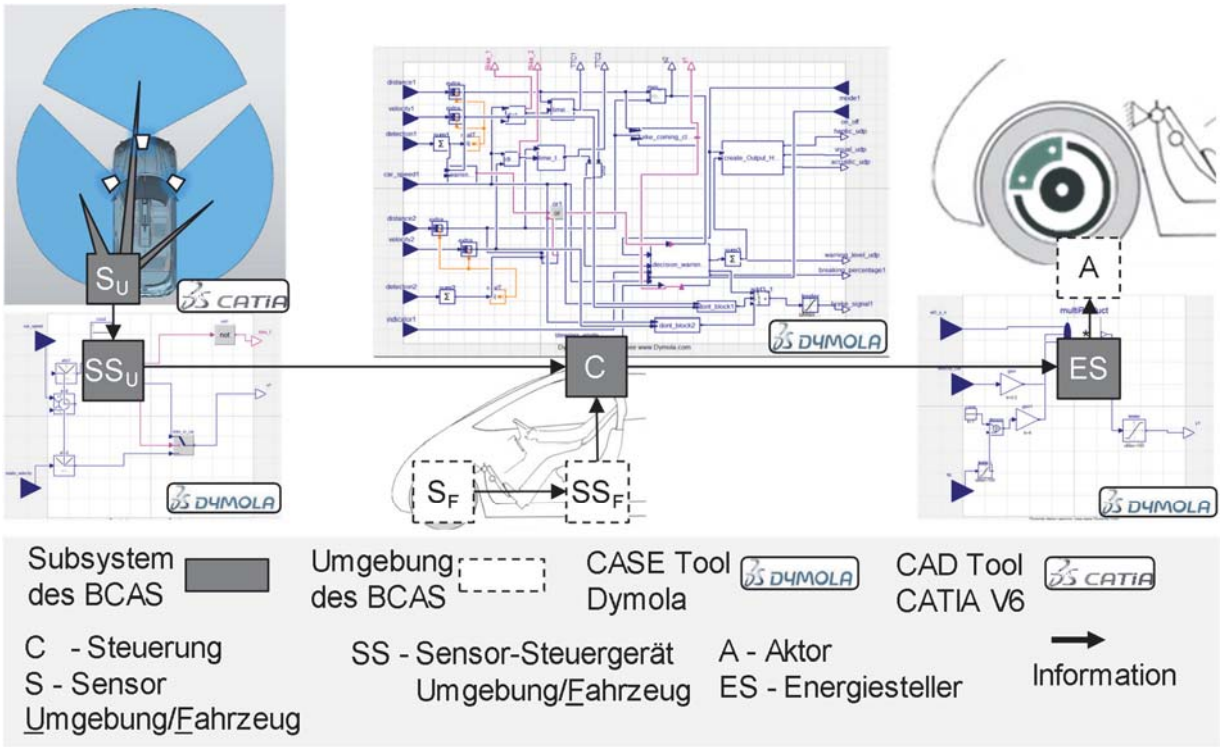


Abbildung 109: 3D CAD Modell und Dymola-Prototypen des mechatronischen Regelsystems (nach Grohmann et al. 2017)

Alle drei Projektteams setzen zwei oder drei Umgebungs-Sensoren ein, die verschieden am PKW positioniert sind. Entsprechend des in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Vorgehens werden diese Sensoren durch die Mechatronik-Entwickler spezifiziert und im 3D E-CAD Modell positioniert. Im CASE-Tool Dymola werden durch alle Projektteams CASE-Prototypen der Steuerung (C), des Sensor-Steuergeräts für den Umgebungs-Sensor (SS_U) und des Energiestellers (ES) erstellt. Der eigentliche Aktor (A), die Fahrzeugbremse, sowie die Fahrzeug-Sensorik (S_F und SS_F) zur Erfassung der Geschwindigkeit und Lenkstockschalter-Betätigung sind nicht Bestandteil der durch die Projektteams erstellten BCAS-Prototypen. Elemente der Car2X-Kommunikation sind in der Lösung nicht vorgesehen und werden nicht modelliert.

Die technischen Spezifikationen der verbauten Elemente des mechatronischen Regelsystems werden in der E/E Systemarchitektur zusammengefasst. Das BCAS Entwicklungsprojekt schließt mit der Fertigstellung der Teilsystem-Prototypen. Es werden die für die Anwendung der HPiL Methodik erforderlichen Inputs bereitgestellt: Auf Seiten der MMS Entwicklung die in Processing umgesetzten **AP-Prototypen**, den **MMS Basisentwurf** sowie das in CATIA V6 umgesetzte **3D CAD-Modell der MMS**. Auf Seiten der Entwicklung des mechatronischen Regelsystems die in Dymola modellierten **CASE-Prototypen** sowie das in CATIA V6 modellierte **3D E-CAD Modell**.

Zur **Bewertung des BCAS Entwicklungsprojektes** kann zusammengefasst werden: In der Entwicklung des BCAS wird eine hinsichtlich industrieller Aktualität und Einsatzgebiet **geeignete und aktuelle** Software-Architektur eingesetzt. Die erstellten Prototypen der MMS und des mechatronischen Regelsystems entsprechen dem **Stand der Technik früher FAS Prototypen**. Visuelle, akustische und haptische Elemente der MMS entsprechen nach den Ausführungen aus Tabelle 5 und Tabelle 6 einem **repräsentativen Querschnitt** des Standes der Technik von FAS Anzeigen und Bedienelementen.

7.1.3 Erstellung der Prüfspezifikation

Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben dient die Prüfspezifikation der Zuordnung der zu testenden Anforderungen zu den Testszenarien und den Prototopen. Um die Beherrschbarkeit des BCAS abzusichern, muss dieses in **geeigneten Testszenarien** getestet werden. Eine bei der Entwicklung von FAS häufig angewendete Methode zur Generierung von Testszenarien ist deren Herleitung aus Unfallstatistiken (Weitzel und Winner 2012, S. 6; Domsch und Negele 2008, S. 8). Wie in Kapitel 7.1.1 ausgeführt, entstanden aus Verkehrssituationen mit einem fahrenden PKW die Unfallursachen für knapp 83% aller Unfälle zwischen PKW und Fahrrad in Berlin in den Jahren 2011 bis 2016. Die Testszenarien müssen somit die folgenden Unfallursachen abbilden:

I. Abbiegefehler
II. Nichtgewähren der Vorfahrt
III. Fehler beim Einfahren in Fließverkehr
IV. Ungenügende Sicherheitsabstände
V. Nichtbeachtung der Verkehrsführung

Der Anwendungsfall BCAS ist im urbanen Raum verortet und erfordert Szenarien, die dessen Charakteristika wiedergeben: **Urbane Bebauung** und **Verkehrsführung** sowie **urbanen Stadtverkehr**.

Nach den Ausführungen in Kapitel 3.4.2 erfordert der vollständige Nachweis der Beherrschbarkeit des BCAS den erfolgreichen Test der in Tabelle 10 beschriebenen 107 Beherrschbarkeits-Kriterien. Wie in Kapitel 5.4 ausgeführt, ist der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test zu einem umfangreichen, jedoch keinem vollständigen Beherrschbarkeits-Test nutzbar. So können, wie in Kapitel 5.4 ausgeführt, beispielsweise die Kriterien der Fehlerrobustheit des Systems, der Schutzmaßnahmen gegen externe Manipulationen, der Vorhersagbarkeit für andere Verkehrsteilnehmer oder der Qualität der Dokumentation nicht getestet werden.

Die initial definierte Anforderung (A 14) verlangt die Gewinnung von Erkenntnisse in höherer Qualität oder größerem Umfang als im Stand der Technik durch die Anwendung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens. Wo die Erlangung eines Ergebnisses höherer Qualität im Vorfeld nicht beurteilt werden kann, kann der größere Umfang des Ergebnisses durch die Menge der test- und nachweisbaren Beherrschbarkeits-Kriterien festgestellt werden. Zur Durchführung der Evaluation werden daher **repräsentative Beherrschbarkeits-Kriterien** ausgewählt. Ein Teil dieser Kriterien wird durch die Ausführungen aus Kapitel 3.4.3 vorgegeben. So wird die Fähigkeit des mechatronischen Regelsystems, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung vermeiden, im Stand der Technik mit X-in-the-Loop Testverfahren wie dem Model-in-the-Loop Test getestet. Für den Anwendungsfall BCAS muss für den Nachweis dieses Kriteriums der Stopp des mit BCAS ausgerüsteten PKWs vor dem Crash mit dem Fahrrad belegt werden. Ebenso werden, wie in und Kapitel 3.4.4 beschrieben, die Kriterien der Wahrnehmbarkeit von Anzeigen und Bedienelementen im Stand der Technik bereits mit Fahrsimulatoren in Mensch-Maschine Konzeptsimulationen geprüft.

Die final ausgewählten 26 Beherrschbarkeits-Kriterien beinhalten acht Beherrschbarkeits-Kriterien der Fahrer-Wahrnehmung sowie jeweils sechs Beherrschbarkeits-Kriterien der Fahrer-Entscheidung und Fahrer-Reaktion. **Tabelle 20** zeigt die zusammengestellten Beherrschbarkeits-Kriterien der Evaluation. Die Kriterien müssen in der Evaluation durch die Testmethoden des Standes der Technik sowie den HPiL Test getestet werden. Die Beherrschbarkeit des BCAS ist nachgewiesen, wenn die Erfüllung aller Kriterien im Test belegt werden kann.

Tabelle 20: Beherrschbarkeits-Kriterien der Evaluation (nach Tabelle 10)

	Nr.	Kriterien-Gruppe	Anforderung der Beherrschbarkeit
Fahrer-Wahrnehmung	1	Vorhersag-barkeit	Der Fahrer hat ein klares Verständnis der System-Modi und Stati.
	2		Die Systemreaktionen sind konform mit der Erwartungshaltung des Fahrers: Sie korrespondieren mit vorheriger Erfahrungen und Erwartungen aus der Nutzung ähnlicher Systeme.
	3	Vertrauen	Die Warnungen werden rechtzeitig entsprechend der Kritikalität der Verkehrssituation angezeigt.
	4		Das Bedienelement zum Ein-/Ausschalten ist für den Fahrer nutzbar.
	5		Es ist dem Fahrer möglich, die verschiedenen Betriebsmodi des Systems zu unterscheiden.
	6		Die Warnungen sind der Kritikalität der Verkehrssituation angemessen.
	7		Die Warnungen berücksichtigen verschiedene Verkehrssituationen.
	8	Wahr-nehmbarkeit	Die Warnungen des Systems sind für den Fahrer verständlich und eindeutig.
	9		Die Warnungen sind mit anderen Warnungen/Informationen im Cockpit vereinbar.
	10		Der Fahrer ist ausreichend über Status und Funktion des Systems informiert.
	11		Die Position der Anzeigen und Bedienelemente passen in den Kontext bestehender MMS.
	12		Die Warnungen sind in typischen relevanten Verkehrssituationen wahrnehmbar.
	13	Wachsamkeit	Der Betrieb oder die Überwachung des Systems kann ohne eine große Änderung der Aufmerksamkeit des Fahrers in dessen Fahraufgabe durchgeführt werden.
Fahrer-Entscheidung	14	Verkehrs-sicherheit/ -risiko	Das System kann ein- und ausgeschaltet werden.
	15		Das System kann verschiedene Betriebsmodi einnehmen.
	16		Das System stoppt den PKW vor dem Crash.
	17		Es ist möglich, das System jederzeit zu übersteuern.
	18	Verantwor-tung/ Haftung	Es ist dem Fahrer möglich, das System jederzeit ein- und auszuschalten.
	19		Die Systemgrenzen sind für den Fahrer klar verständlich.
	20	Verständ-lichkeit	Der Fahrer versteht das System-Feedback auf seine Bedieneingaben und Handlungen.
Fahrer-Reaktion	21	Akzeptanz	Die Warnungen sind der Kritikalität der Gefahr angemessen.
	22	Durch-führbarkeit	Alle Mensch-Maschine Interaktionen können durch den Fahrer unterbrochen werden.
	23		Alle Bedieneingaben können jederzeit rückgängig gemacht, korrigiert oder verändert werden.
	24	Kontroll-problem	Der Fahrer kann das System nach unbeabsichtigter Aktivierung oder Deaktivierung beherrschen
	25		Der Fahrer kann eine Situation beherrschen, bei der das System nicht verfügbar ist, weil die Situation außerhalb seiner Systemgrenzen ist.
	26		Fahrerhandlungen zum übersteuern des Systems sind intuitiv.

7.1.4 Bestands-Infrastruktur in der Evaluation

Für den Aufbau und den Test im Rahmen der Evaluation steht der Fahrsimulator **Functional Drive Simulator (FDS)** zur Verfügung. Dieser Simulator ist im Digital Cube Test Center (DCTC) des Fachgebietes Industrielle Informationstechnik der TU Berlin integriert. Der FDS koppelt eine Virtual Reality Visualisierung und ein Bewegungssystem, das Bewegungen in drei Freiheitgraden der Translation und zwei der Rotation umsetzen kann. Das Bewegungssystem besteht aus zwei Bestanteilen: Einem Hexapod, der den Fahrer in Hochrichtung (z) bewegen und um die longitudinale sowie laterale Achse rotieren kann. Die Rotationsbewegungen des Hexapods werden als Wanken (Winkelbewegung φ um x-Achse) beziehungsweise Nicken (Winkelbewegung θ um y-Achse) bezeichnet (vergleiche Braess und Seiffert 2012, S. 486). Der Zweite Bestandteil ist die zweiachsige Bewegungsplattform für die Bewegung des Fahrers in longitudinaler und lateraler Richtung (folgend mit x und y bezeichnet). Das Bewegungssystem ist in drei Konfigurationen einsetzbar:

- **Konfiguration 1:** Statisch, ohne aktiviertes Bewegungssystem.
- **Konfiguration 2:** Hexapod zur Abbildung von drei Freiheitsgraden (3 DOF) z, φ und θ.
- **Konfiguration 3:** Hexapod gekoppelt mit Bewegungsplattform zur Abbildung von fünf Freiheitsgraden (5 DOF) x, y, z, φ und θ.

Auf dem Hexapod ist ein Schalensitz mit 2-Punkt-Gurt befestigt. Der Fahrer steuert den PKW mit einem aktiv Feedback gebenden Lenksystem mit angebundenem Blinkerhebel. Dazu ist eine Pedalerie mit Kupplung, Bremse und Pedal zur Geschwindigkeitssteuerung vorhanden. Für die Simulation des PKWs sowie der Fahrumgebung wird das Simulationssystem dSpace ASM eingesetzt. Das Visualisierungssystem setzt sich aus vier Leinwänden, die um einen quadratischen Visualisierungsraum angeordnet sind, sowie vier Projektoren, die jeweils eine der Leinwände mittels Rückprojektion anstrahlen, zusammen. Über vier um den Visualisierungsraum angebrachte Lautsprecher werden Audiosignale wiedergegeben. Das Setup des Functional Drive Simulators ist in **Abbildung 110** und **Abbildung 111** dargestellt.

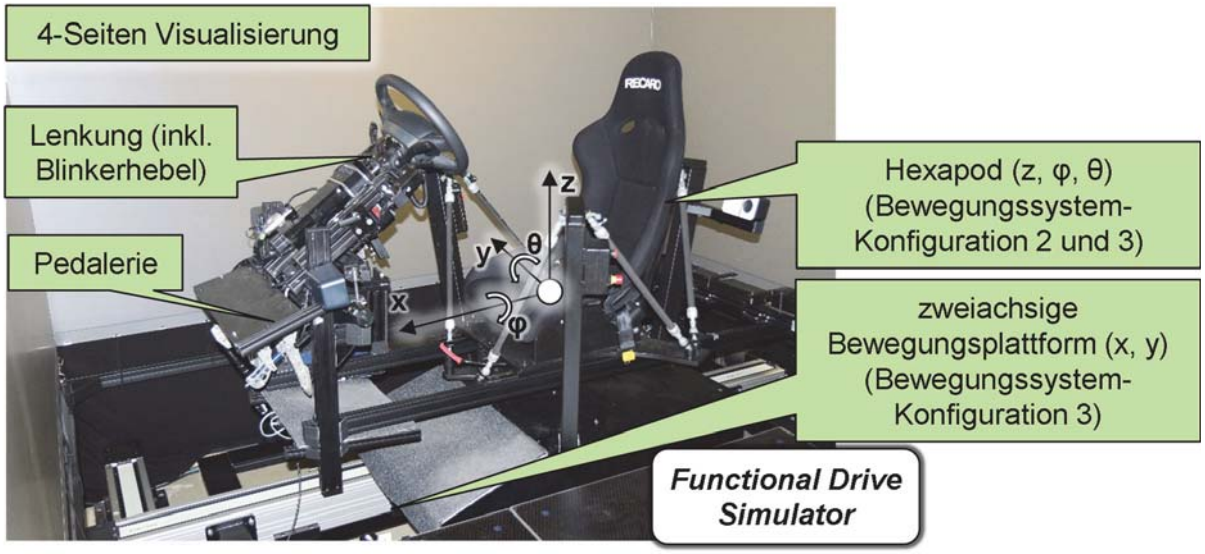


Abbildung 110: Bestehender Functional Drive Simulator für die Evaluation

Das von den Projektoren erzeugte Bild wird mit einer aktiven Shutterbrille, die der Proband trägt, in zwei Einzelbilder zerlegt und so stereoskopisch dargestellt. Das in **dSpace ASM erzeugte Bild** kann direkt stereoskopisch visualisiert werden. Als weitere Option der Visualisierung kann die **Unity 3D Game Engine** eingesetzt werden. Unity 3D ist ein in der Virtual Reality Visualisierung vielfach genutztes Tool, dass die Umsetzung virtueller Szenen in hoher Abbildungsqualität und hohem Abbildungsumfang erlaubt (Yamaura et al. 2016; Abdelgawad 2018; Manawadu et al. 2015; Goncalves et al. 2014). In diesem Setup simuliert dSpace ASM das Verhalten von PKW und Fahrumgebung, die visuelle Darstellung findet über Unity3D statt. Der Aufbau des Visualisierungssystems ist in **Abbildung 111 (Links)** dargestellt. **Abbildung 111 (Rechts)** zeigt eine Verkehrsszene, wie sie aus Fahrer-Perspektive auf die vordere Leinwand projiziert wird, jeweils für die Visualisierung in dSpace ASM und Unity3D.

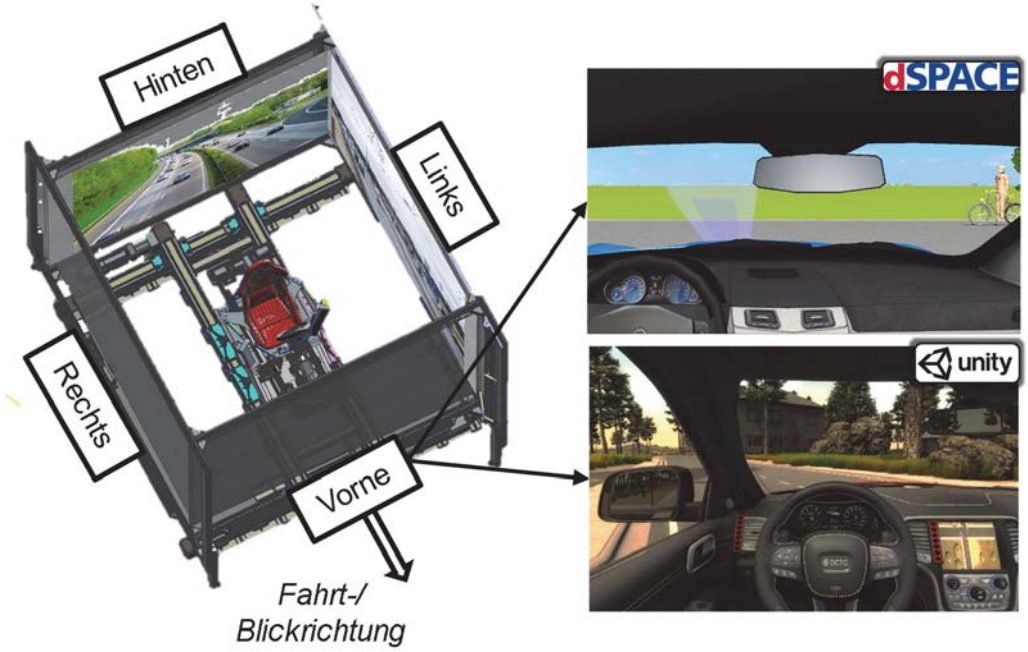


Abbildung 111: (Links) Setup des Functional Drive Simulators in der Vier-Seiten Visualisierung, (Rechts) Visualisierung der Front-Sicht mit dSpace ASM und Unity3D

7.2 Aufbau der HPBench und des Fahrsimulators

Die nachfolgenden Ausführungen dienen der Beschreibung des Prozessteils „Aufbau der HPBench“, bestehend aus den Prozessschritten der HPBench Planung und der HPBench Spezifikation. Ergebnis dieser Schritte ist die Bereitstellung des Fahrsimulators sowie der standardisierten und wiederverwendbaren Werkzeuge der HPBench. **Abbildung 112** verortet diese Schritte im FAS Entwicklungsprozess.

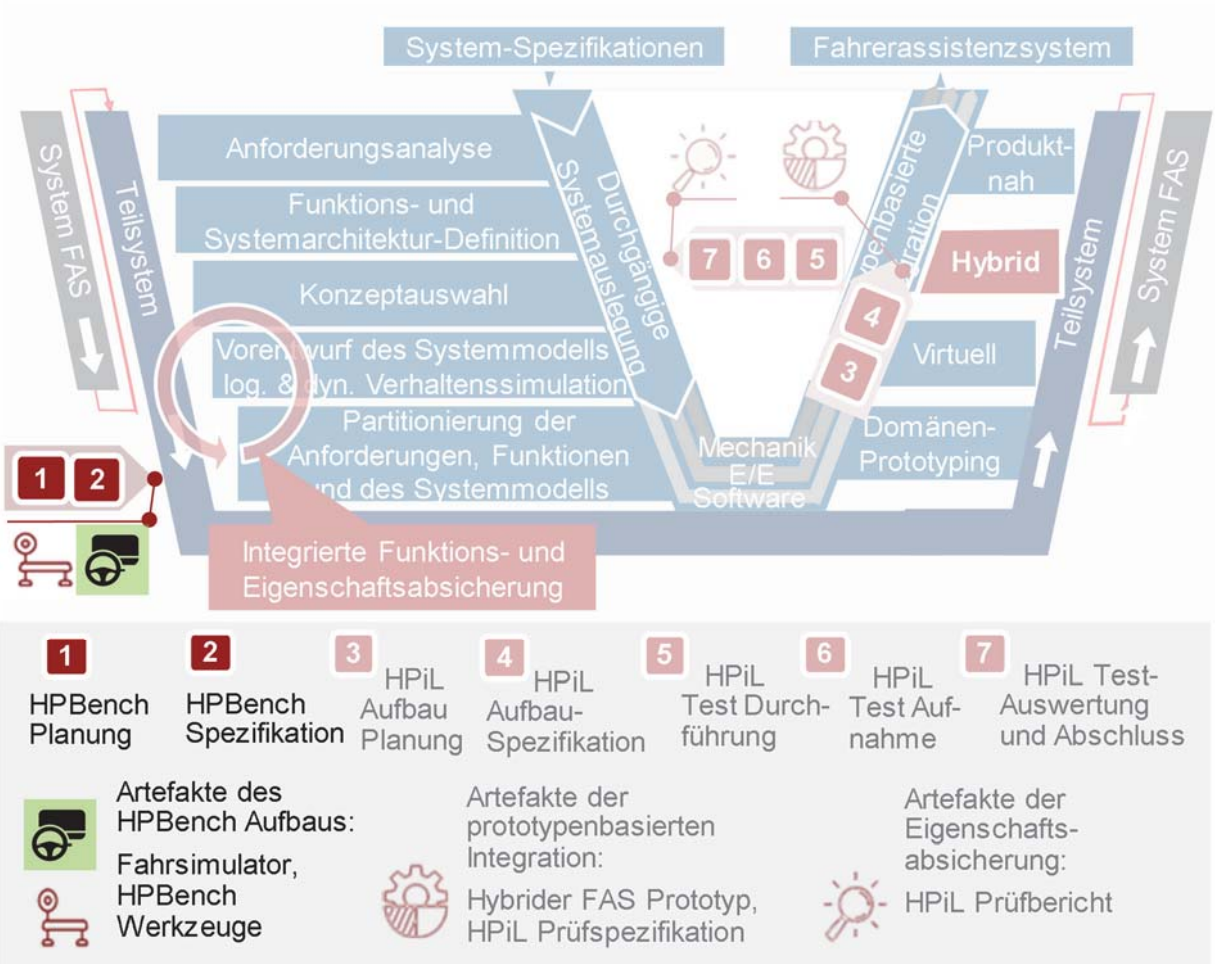


Abbildung 112: Verortung der Prozessschritte HPBench Planung und HPBench Spezifikation im FAS Entwicklungsprozess

7.2.1 Prozessschritt HPBench Planung

Wie in Kapitel 6.3 ausgeführt, dient der Prozessschritt der HPBench Planung der Analyse und Planung des Fahrsimulators sowie der Konfiguration des HPBench Frameworks durch den Systemintegrator.

<u>Zielorientierte Ausgestaltung der Testumgebung Fahrsimulator</u>

Im Anwendungsfall soll der bestehende Functional Drive Fahrsimulator eingesetzt werden. Zur zielorientierte Ausgestaltung der Testumgebung Fahrsimulator müssen daher die folgenden Schritte durchgeführt werden:

- Schritt 1: Analyse des Anwendungskontextes und der eingesetzten Entwicklungs-Tools
- Schritt 2: Analyse der Gestaltungsparameter-Konfiguration des Fahrsimulators in Abgleich mit den Vorgaben des Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit (vergleiche Kapitel 5.4)
- Schritt 3 (wenn nach Ergebnis von Schritt 2 erforderlich): Einschränkung des gültigen Nutzungskontextes im spezifischen Anwendungsfall oder Spezifikation von Erweiterungen des Fahrsimulators.

Aus dem Anwendungsfall ergeben sich die **Anforderungen an den Fahrsimulator**: Es ist eine 360° Visualisierung und eine Simulation aller möglichen kritischen, kollisionsträchtigen Situationen zwischen Fahrrad und PKW benötigt. Dazu muss auch das

Verhalten der Fahrräder sowie des umgebenden Verkehrs hinreichend genau abgebildet werden. Zum anderen ist eine Abbildung des Systemeingriffs ins Bremssystem des PKWs sowie eine Abbildung der Unfallsituation selbst erforderlich.

Um die **Erfüllung dieser Anforderungen** durch den bestehenden Functional Drive Simulator (FDS) zu beurteilen, wird im Folgenden eine Analyse und Bewertung von dessen Gestaltungsparametern durchgeführt. Es wird anhand des zweistufigen Bewertungsschlüssels verglichen, ob und inwieweit der jeweilige Gestaltungsparameter des Functional Drive Simulator den in Kapitel 5.4 definierten Vorgaben für einen für den Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test geeigneten Fahrsimulator entspricht. Die Vorgabe basiert auf den vier generischen Fidelity-Stufen, die jedem Gestaltungsparameter zugeordnet sind. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, stellt Fidelity Stufe „Spezifisch (S)“ die höchste Ausprägung dar. Gefolgt von den Stufen „Repräsentativ (R)“, „Generisch (G)“ sowie „Kein (K)“ als niedrigste Ausprägung. Der zweistufige Bewertungsschlüssel sieht folgende Ausprägungen vor:

Die Fidelity-Stufe eines Gestaltungsparameters des untersuchten FDS Fahrsimulators ist höher oder gleich der Vorgabe aus Kapitel 5.4. Der Gestaltungsparameter **entspricht den Anforderungen** des HPiL Tests. Der Gestaltungsparameter wird **grün** bewertet.

Die Fidelity Stufe Gestaltungsparameters des untersuchten FDS Fahrsimulators ist geringer als die Vorgabe aus Kapitel 5.4. Der Gestaltungsparameter **entspricht nicht den Anforderungen** des HPiL Tests. Der Gestaltungsparameter wird **rot** bewertet.

Wie beschrieben können das Bewegungssystem und die Visualisierung des **Functional Drive Simulator (FDS)** verschieden konfiguriert werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Bewertungsergebnisse dieser Konfigurationen anhand der in Kapitel 5.4 eingeführten Gestaltungsparameter-Konfiguration des Fahrsimulators für den HPiL Test. Da in der Bewertung der Visualisierungs-Konfigurationen zwischen der Visualisierung mit dSpace ASM und Unity3D unterschieden werden muss, zeigt **Abbildung 113** die vollständige Bewertung des Functional Drive Simulators inklusive der Visualisierung (VIS) mit dSpace ASM. Darüber hinaus ist die Bewertung der drei möglichen Bewegungssystem-Konfigurationen 1 (Statisch, ohne aktiviertes Bewegungssystem, 0 DOF), Konfiguration 2 (Hexapod zur Abbildung von drei Freiheitsgraden, 3 DOF) sowie Konfiguration 3 (Hexapod gekoppelt mit Bewegungsplattform zur Abbildung von fünf Freiheitsgraden, 5 DOF) dargestellt. **Abbildung 114** zeigt hingegen nur die Bewertung der Visualisierung (VIS) mit Unity3D.

Die Analyse der Gestaltungsparameter-Konfigurationen des FDS zeigt, das insgesamt **20 der 60 Gestaltungsparameter im Fall der dSpace ASM** Visualisierung beziehungsweise **19 der 60 Gestaltungsparametern Fall der Unity3D Visualisierung** als unzureichend mit rot bewertet werden. Die Bewertung des Bewegungssystems zeigt für **alle drei Bewegungssystem-Konfigurationen 5 der 6 Parameter** als unzureichend mit rot bewertet. Es kann zusammengefasst werden:

Die Bewertung des Functional Drive Simulators zeigt verschiedene Gestaltungsparameter, die eine geringere Fidelity als die Vorgabe an einen Fahrsimulator für den Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test ausweisen. Der Functional Drive Simulator ist damit nicht für den Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test geeignet.

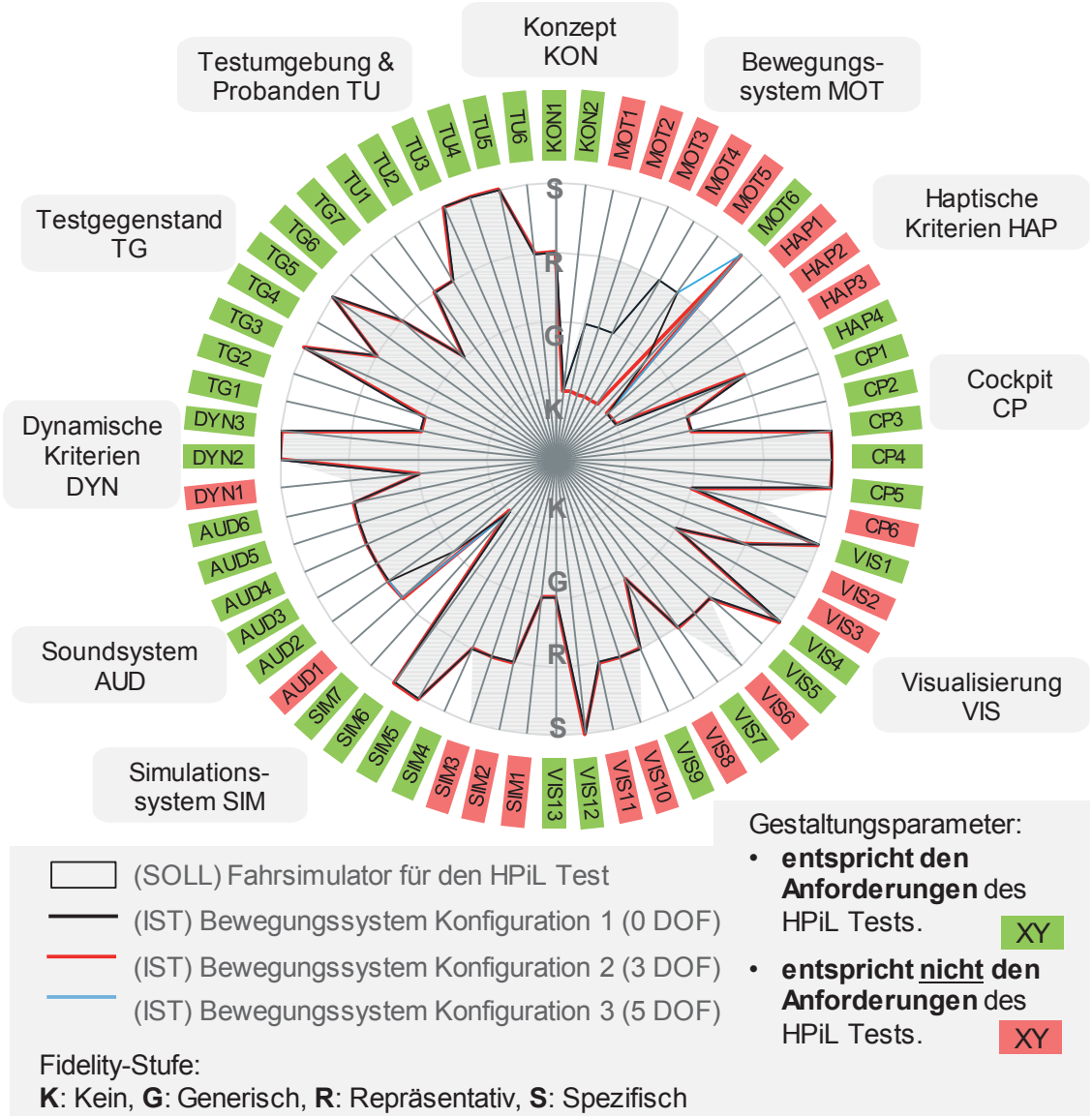


Abbildung 113: Bewertung der Gestaltungsparameter des Functional Drive des Fahrsimulators mit dSpace ASM Visualisierung zur Nutzbarkeit im HPiL Test

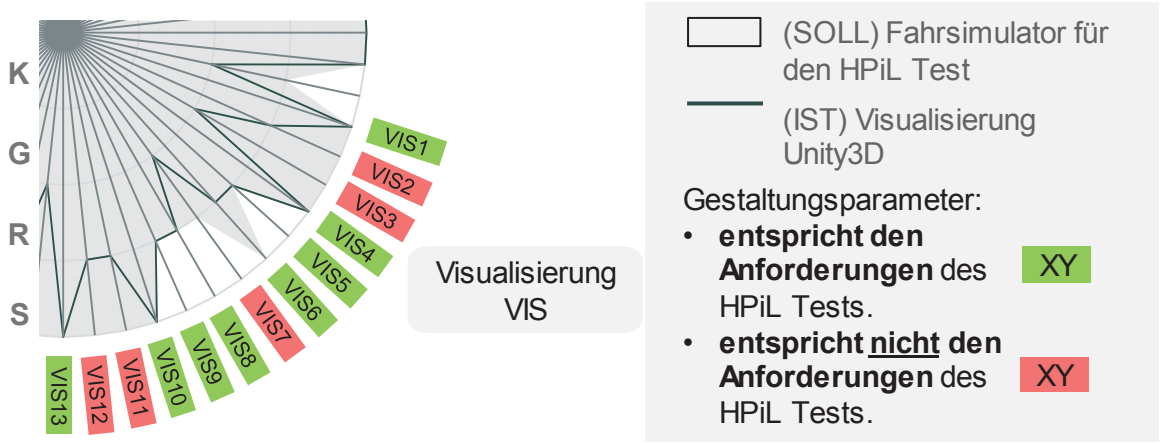


Abbildung 114: Bewertung der Gestaltungsparameter des Functional Drive des Fahrsimulators mit Unity3D Visualisierung zur Nutzbarkeit im HPiL Test

Wie ausgeführt, ermöglicht die Methode zur Zielorientierte Ausgestaltung der Testumgebung Fahrsimulator unter zwei Bedingungen die Nutzung eines als unzureichend ermittelten Fahrsimulators: Zum einen durch einen durch die Einschränkung des gültigen Nutzungskontextes im spezifischen Anwendungsfall. Bei dieser Bedingung wird davon ausgegangen, dass nicht in jedem Anwendungsfall die „Maximal-Konfiguration“ der Gestaltungsparameter des Fahrsimulators für den HPiL Test entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.4 erforderlich ist. Zum anderen sind Erweiterungen des Fahrsimulators, die die Bewertung des jeweiligen Gestaltungsparameters zu einer Nutzbarkeit hin verändert, möglich.

Einschränkung des Nutzungskontextes im spezifischen Anwendungsfall

Zur Ermittlung möglicher Einschränkung des Nutzungskontextes im spezifischen Anwendungsfall muss eine tiefergehende Analyse des unzureichend bewerteten Gestaltungsmerkmales im Kontext des Anwendungsfalles durchgeführt werden. Die nachfolgenden Ausführungen dienen der Analyse der Gestaltungsparameter, die rot markiert sind, also als nicht den Anforderungen des Fahrsimulators für den HPiL Test genügend identifiziert wurden. Ziel ist es, Anwendungsfall-spezifischen Einschränkungen zu identifizieren, die eine Nutzung des Functional Drive Simulators ermöglichen.

Aus **Abbildung 113** und **Abbildung 114** ist erkennbar, dass der Schwerpunkt der unzureichenden Gestaltungsparameter in den Kategorien Bewegungssystem und Visualisierung liegt. Die folgenden Ausführungen starten mit diesen, gefolgt von den restlichen Gestaltungsparametern. Die nachstehende **Tabelle 21** zeigt die detaillierte Bewertung der **drei Bewegungssystem-Konfigurationen des FDS**. Die Fidelity-Stufen „Spezifisch (S)“, „Repräsentativ (R)“, „Generisch (G)“ und „Kein (K)“ beschreiben die Ausprägung des Gestaltungsparameters.

Tabelle 21: Detaillierte Bewertung der Gestaltungsparameter der drei Bewegungssystem-Konfigurationen des Functional Drive Simulators

Gestaltungs-Parameter	**Soll** (nach Kapitel 5)	**Konfiguration 1** (0 DOF)	**Konfiguration 2** (3 DOF)	**Konfiguration 3** (5 DOF)
entspricht den Anforderungen			**entspricht nicht den Anforderungen**	
MOT 1 Bewegungshülle Beschleunigung/ Kapazität (rot)	**R** Φ (Rollen): 25° θ (Nicken): 25°	**K** Nicht vorhanden	**G** Hexadpod Φ (Rollen): 15,5° θ (Nicken): 8,2°	
MOT 2 Bewegungshülle Beschleunigung/ Kapazität (translation)	**R** z-Richtung: 150mm x-Richtung: 2,5m/s² y-Richtung: 6m/s²	**K** Nicht vorhanden	**G** Hexadpod: z-Richtung: 100mm	
				G Bewegungsplattform x: 2,5m/s² y: 2,5m/s²
MOT 3 Frequenzbereich (Phase)	**R** bis 1,5Hz	**K** Nicht vorhanden	**G** 1Hz Hexapod	**G** 1Hz Hexapod 50Hz Motion Plattform

Gestaltungs-Parameter	**Soll** (nach Kapitel 5)	**Konfiguration 1** (0 DOF)	**Konfiguration 2** (3 DOF)	**Konfiguration 3** (5 DOF)
entspricht den Anforderungen		**entspricht nicht den Anforderungen**		
MOT 4 Frequenzbereich (Amplitude)	**R** manöverspezifische Amplituden im wesentlichen darstellbar	**K** Nicht vorhanden	**R** manöverspezifische Amplituden im wesentlichen darstellbar	
MOT 5 Eff. Richtung der Beschleunigung	**R** darstellbar mit kleinen Abweichungen	**K** Nicht vorhanden	**G** darstellbar mit kleinen Abweichungen durch Hexapod	
MOT 6 Motion Cueing	**R** experimentspezifische Parameter	**K** Nicht relevant	**K** Nicht relevant	**G** Selbst entwickelte Algorithmen, abgestimmt im Nutzertest

Die Hauptaufgabe der Bewegungsanregung in der Evaluation von FAS ist die Information des Fahrers über den Eingriff des FAS durch Anregung dessen vestibulärer Sinneswahrnehmung (Negele 2007, S. 110). Die Akzeptanz eines simulierten Eingriffes durch den Nutzer hängt weniger von der realistischen Qualität der Bewegungsanregung seines vestibulären Systems, sondern davon, dass überhaupt eine spürbare Anregung erfolgt (nach Negele 2007, S. 110). Dies passt mit den Ausführungen in Kapitel 2.4 zusammen: Das Präsenzerleben des Nutzers steigt mit höherer Immersion der Testumgebung, gemessen an der Anzahl der unterstützten Sinnesmodalitäten, deren Abbildungsumfang sowie deren Abbildungsqualität. Die Evaluation findet im Stadtverkehr, also bei Geschwindigkeiten kleiner als 50km/h statt. Das Rollen des Simulators um die Längsachse zur Simulation der Querbeschleunigung ist damit nicht relevant für den Anwendungsfall. Fahrdynamischer Fokus der Evaluation liegt auf dem Brems-Eingriff des Systems, jedoch nicht auf dem Bremsenvorgang selbst. Im Anwendungsfall ist daher kein realitätsnahes Bremsnicken erforderlich, Einschränkungen in der Darstellungsqualität des Bremsnickens können akzeptiert werden. Durch die geringen Beschleunigungen sind darüber hinaus Richtungsabweichungen sowie Gierbeschleunigungen um die Hochachse vernachlässigbar. Das Szenario Stadt, für welches das BCAS auslegt ist, erfordert darüber hinaus nicht zwingend eine Höhen-Anregung in z-Richtung.

Es kann angenommen werden, dass **Bewegungssystem-Konfiguration 2** trotz der zu geringen Winkelauslenkung (MOT1) und Beschleunigung in Hochrichtung (MOT2) sowie kleinen Abweichungen in der Beschleunigungsrichtung (MOT5**) für den spezifischen Anwendungsfall BCAS ausreichend ist.**

Die selbst entwickelten Motion Cueing Algorithmen (MOT6) bestimmen die Aufteilung der Bewegungsanregung zwischen dem Hexapod und der Bewegungsplattform und wurden in einzelnen Nutzertests abgestimmt. Zwar erfüllen diese nicht die Vorgaben an einen ganzheitlich nutzbaren Fahrsimulator für den frühen Beherrschbarkeits-Test, sind allerdings im Geschwindigkeitsbereich des urbanen Anwendungsfalles ausreichend.

Es kann daher angenommen werden, dass auch **Bewegungssystem-Konfiguration 3 für den spezifischen Anwendungsfall BCAS ausreichend ist**.

Bewegungssystem-Konfiguration 1 ist für den Test mit naiven Probanden klar unzureichend. Der Wissenstransfer von einer virtuellen in eine reale Umgebung ist für einen Experten, der mit dem Testobjekt vertraut ist oder an dessen Entwicklung beteiligt war, jedoch einfacher als für den naiven Probanden ohne Bezug zum Testobjekt. Es kann daher angenommen werden, dass im Test mit Experten geringere Abbildungsumfänge sowie Abbildungsqualität.

Die **Bewegungssystem-Konfiguration 1** ist damit möglicherweise **für den Experten-Test im Anwendungsfall nutzbar**, muss aber kritisch beleuchtet werden.

Tabelle 22 zeigt die detaillierte Bewertung des **Visualisierungssystems des FDS**. Die Parameter VIS 1 bis VIS 6 beschreiben die Hardware-Bestandteile des Visualisierungssystems und sind damit für beide Visualisierungs-Konfigurationen gültig.

Tabelle 22: Detaillierte Bewertung der Gestaltungsparameter der zwei Visualisierungs-Konfigurationen des Functional Drive Simulators

Gestaltungs-Parameter	**Soll** (nach Kapitel 5)	**Konfiguration 1: dSpace ASM**	**Konfiguration 2: Unity3D**
entspricht den Anforderungen		**entspricht nicht den Anforderungen**	
VIS 1 Field of View (horizontal)	**S** 180°-240°, empfohlen 360°	**S** 360° umlaufende Leinwand	
VIS 2 Field of View (vertikal)	**S** 150° (ohne Fahrzeug-Cockpit), 40°-60° (mit Fahrzeug -Cockpit)	**R** Kein Fahrzeug-Cockpit, Ca. 75° bei 1,5m Abstand, Umgebung ist bei starken Manövern wahrnehmbar	
VIS 3 Sichtweite	**S** Geschwindigkeitsabhängig: Bis 600m	**G** Bauartbedingt eingeschränkte Sichtweite mit unscharfer Darstellung in Bildmitte	
VIS 4 Helligkeit	**S** 10.000 cd/m² (Projektor), 300 cm/m² (Bildschirm)	**S** 11.000 cd/m² (Barco W12 Beamer)	
VIS 5 Edge Blending/ Farbkorrektheit	**R** Nur im Detail sichtbare Kanten, Farbkorrektheit realistisch	**R** Im Detail sichtbare Kanten zwischen den Leinwänden, Farbkorrektheit realistisch	
VIS 6 Auflösung	**S** 1 Bogenminuten/Pixel für lesbare Schilder)	**R** 4,6 Bogenminuten/Pixel in Bildmitte *(1,5m Abstand, 1600x1200 Auflösung)*	
VIS 7 Framerate	**R** Variable Framerate von 50-60Hz	**R** Konstante Framerate von 60Hz	**G** sichtbares Ruckeln

Gestal-tungs-Parameter	Soll (nach Kapitel 5)	Konfiguration 1: dSpace ASM	Konfiguration 2: Unity3D
entspricht den Anforderungen		**entspricht nicht den Anforderungen**	
VIS 8 Qualität von atmosphär. Effekten	**R** im Wesentlichen korrekt	**G** Vereinfachte Abbildung	**R** Hoher Detailgrad
VIS 9 Bewegungsparallaxe	**R** darstellbar durch Sensoren und Software	**R** Blickdistanz ist ausreichend für optimale Bewegungsparallaxe	**R** Blickdistanz ist ausreichend für optimale Bewegungsparallaxe
VIS 10 Stereosehen, 3D-Effekt	**S** realistischer 3D Effekt	**R** einfaches Stereosehen durch Headtracking	**S** realistischer 3D Effekt mit Headtracking
VIS 11 Visualisierungsqualität	**S** hohe Qualität (keine Schmiereffekte, keine Farbartefakte)	**R** Teilweise Störeffekte	**R** Teilweise Schmiereffekte
VIS 12 Echtzeitbedarf & Latenz	**S** „hohe Echtzeitfähigkeit“ (mehr als 50Hz), Latenz unterhalb der Wahrnehmungsschwelle	**S** 60Hz	**R** Minimal 20 Hz, daher „mittlere Echtzeitfähigkeit“ (10Hz-50Hz), wahrnehmbare Latenz
VIS 13 Realismus/ Szenario Detailgrad	**S** realistisches Szenario mit hochaufgelösten Modellen	**G** Geringer Detailgrad, geringe Auflösung der Umgebungstexturen	**S** Hohe Auflösung, realistisches Szenario

Das vertikale Sichtfeld des **Visualisierungssystems** kann nur etwa 75° abbilden. Das führt zu einer Wahrnehmbarkeit der Fahrumgebung bei hohen Beschleunigungen, die den Simulator umgebende Realität wird also nicht mehr hinreichend ausgeschlossen. Den Ausführungen in Kapitel 2.4 folgend, führt dies maßgeblich zu einem verringerten Präsenzerleben. Allerdings beschreibt Negele für den Fall einer durch eine Bremsung ausgelösten Sichtbarkeit diese durch Probanden als „nicht als sehr störend“ empfunden (Negele 2007, S. 24). Im Anwendungsfall BCAS werden nur hohe Bremsbeschleunigungen, jedoch keine antriebsbedingten Längsbeschleunigungen erreicht. Und auch hohe Querbeschleunigungen treten nicht auf. Es wird daher die **Verwendbarkeit des vertikalen Sichtfeldes im Anwendungsfall** angenommen. Die Geometrie des Visualisierungssystems sorgt dafür, dass der Fahrer jeweils der Leinwandmitte am nächsten ist. Dies ist problematisch für die in Bogenminuten pro Pixel angegebene, durch den Fahrer wahrgenommen Auflösung des Visualisierungssystems (Vergleiche Kapi-

tel 2.4). Bei einer Auflösung von 1600x1220 Pixel pro Leinwand beträgt die wahrgenommene Auflösung etwa 4,6 Bogenminuten pro Pixel in Bildmitte und etwa 3,4 Bogenminuten pro Pixel an den Kanten der Leinwände. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, ist die geforderte Auflösung von 1 Bogenminute pro Pixel primär für die Lesbarkeit von Verkehrsschildern erforderlich. Die im Anwendungsfall benötigten Verkehrszeichen „Vorfahrt gewähren“ sowie „Vorfahrtstraße“ sind jedoch über Farb- und Formkodierung auch bei geringerer Auflösung klar erkennbar. Die Ampel ist über ihre Lichtsignale erkennbar. Schilder und Ampeln sind im Anwendungsfall „abbiegen“ zudem selten in Bildmitte, sondern eher am Bildrand dargestellt: Die **geringe Auflösung kann daher für den Anwendungsfall akzeptiert** werden. Die Einschränkungen aus der Bauform sowie geringer Auflösung des Visualisierungssystems beschränkt auch die Sichtweite, da für eine realistische Sichtbarkeit weit entfernter Objekte über den gesamten Blickbereich des Fahrers scharf dargestellt werden müssen. Der Anwendungsfall des Unfalls im urbanen Raum stellt jedoch keine großen Anforderungen an die Sichtweite: Die eingeschränkte Sichtweite wird daher für den **Versuch als hinreichend** angenommen.

Die Visualisierung mit dSpace ASM ist durch eine konstant hohe Framerate, einen geringen Detailgrad in der visuellen Darstellung der Fahrumgebung und des Fahrzeugs sowie einer starken Vereinfachung von Wettereffekten gekennzeichnet. Damit fehlen Details für eine realistische Tiefenwahrnehmung, der 3D Effekt der Virtual Reality Visualisierung ist limitiert. Darüber hinaus treten teilweise Störeffekte auf. Dagegen ist die Visualisierung mit Unity3D durch eine hohe Auflösung und realistische Abbildung von Fahrumgebung, Fahrzeug und Wettereffekten gekennzeichnet. Es wird aber nur eine mittlere Echtzeitfähigkeit der Visualisierung erreicht, mit minimal 20Hz ist die visuelle Wiedergabe durch sichtbares Ruckeln gekennzeichnet. Darüber hinaus treten teilweise Schmiereffekte im Bildaufbau auf. Atmosphärische Effekte und grafische Störeffekte sind für die erste Analyse der Beherrschbarkeit nicht vordergründig: Zunächst muss die Beherrschbarkeit bei idealen Wetterbedingungen gezeigt werden. Für die eingeschränkte Evaluation können die starke Vereinfachung der dSpace ASM Visualisierung sowie die Stör- und Schmiereffekte beider Visualisierungen akzeptiert werden. Befragungen von Probanden zeigten, dass die in der Visualisierung mit dSpace ASM fehlenden Tiefeninformationen der stereoskopischen Visualisierung primär das Cockpit, nicht aber die Fahrumgebung betreffen. Die Stereofähigkeit der Visualisierung mit dSpace ASM wird daher für den Versuch als ausreichend angesehen. Es kann zusammengefasst werden:

Da sowohl die schnelle, aber wenig detaillierte dSpace ASM Visualisierung wie auch die langsame, hoch detaillierte Unity3D Visualisierung limitiert ist, wird folgende Einschränkung getroffen: Die durchzuführenden **Evaluationstests werden jeweils in dSpace ASM sowie in Unity3D durchgeführt**. In der Auswertung der Test müssen die Effekte und Ergebnisse gesondert diskutiert und deren Evaluierbarkeit fallspezifisch hinterfragt werden.

Analog zum Bewegungssystem wird darüber hinaus angenommen, das im Test mit Experten geringere Abbildungsumfänge sowie Abbildungsqualität erforderlich sind.

Die Visualisierung mit dSpace ASM wird daher als ausreichend für den Experten-Test angenommen. Auch hier müssen Effekte und Ergebnisse in der Evaluation gesondert diskutiert und deren Evaluierbarkeit fallspezifisch hinterfragt werden.

Die **Gestaltungsparameter (HAP1), (HAP2) und (HAP 3)** beschreiben die im FDS fehlenden Shaker am Sitz, im Fußraum sowie an den Pedalen. Der Einbau von Shakern am Sitz und im Fußraum des Fahrsimulators dient der Simulation von fahrbahninduzierten Schwingungen, die durch Bewegungssysteme nicht oder nur unzureichend abgebildet werden können (Negele 2007, S. 51). Ein Fehlen dieser Schwingungen führt zu einer Verfälschung des Geschwindigkeitseindruck des Probanden (Negele 2007, S. 51). Allerdings ist die visuelle Wahrnehmung maßgeblich für den Geschwindigkeitseindruck beteiligt, vor allem durch die Echtzeitfähigkeit des Systems sowie die den Detailgrad der Fahrumgebung (vergleiche Negele 2007, S32, S81). Das Fehlen der Schwingungen am Sitz und im Fußraum wird daher für den Versuch als nachrangig angesehen, der FDS wird trotz dieser Einschränkungen als verwendbar angenommen. In der Evaluation müssen die Geschwindigkeit des Fahrzeugs sowie der subjektive Eindruck dieser durch den Probanden gesondert diskutiert und hinterfragt werden. Durch Shaker am Bremspedal kann der Eingriff eines ABS-FAS an den Pedalen simuliert werden. Den Ausführungen von Kapitel 3.1 folgend, stellt ein ABS-System jedoch ein eigenständiges FAS der SAE Level 0 dar. Für die isolierte Betrachtung des BCAS ist daher kein Shaker erforderlich.

Der FDS ermöglicht eine gute Abbildung der Längs-Ergonomie des PKW-Cockpits, beispielsweise der Abstand Sitz-Lenkrad, die Höhe und Länge des Fußraums, die Länge des Sitzes oder die Geometrie des Cockpits direkt vor dem Fahrer. Allerdings ist der FDS baulich in der Abbildung der **Quer-Ergonomie des PKW-Cockpits (CP6) eingeschränkt**. So sind Elemente neben dem Fahrer, besonders im Bereich des Oberschenkels wie beispielsweise die Gangschaltung, schwer zugänglich oder nicht verbaubar. Da der Anwendungsfall keine spezifische Anforderung nach einer Schaltung oder Bedienelementen hat, kann der PKW im Anwendungsfall mit Automatikgetriebe ohne Schalthebel ausgeführt werden. Sollten Anzeigen und Bedienelemente des BCAS durch die Entwickler im kritischen Bereich vorgesehen werden, müssen diese in der Evaluation gesondert diskutiert und deren Evaluierbarkeit fallspezifisch hinterfragt werden. Der Rennschalen-Sitz des FDS ist ein weiterer, die Ergonomie einschränkender Faktor. So sind die Passform und die Verstellbarkeit gegenüber konventionelle PKW-Sitzen eingeschränkt. Und es wird nur ein 2-Punkt anstatt eines 3-Punkt Gurtes eingesetzt. Diese Einschränkungen verringern mutmaßlich das Präsenzerlebnis des Fahrers, das das Gefühl des Sitzens im PKW verändert wiedergegeben wird. Da bisher aber keine aussagekräftigen Evaluationen über derartige Einschränkungen existieren, wird angenommen, dass der **FDS trotz dieser Einschränkungen verwendbar ist**. In der Evaluation muss die Auswirkung des unzureichenden Gestaltungsparameters CP6 daher gesondert diskutiert und hinterfragt werden.

Das Simulationssystem des FDS ist in zwei Gestaltungsparameter eingeschränkt: Obwohl dSpace ASM verschiedenste Möglichkeiten bietet, „reaktive“ Verkehrsteilnehmer, die auf das Nutzer-Verhalten reagieren, abzubilden (dSPACE 2018a), sind diese nicht im FDS implementiert (**SIM 1**). Es werden gesteuerte Fahrerverhaltensmodelle entsprechend der Kategorisierung in Kapitel 3.3.3 eingesetzt. Die Verkehrsteilnehmer, speziell Fahrräder, reagieren damit nicht auf das Verhalten des durch den Fahrer gesteuerten PKWs. Für den Test von Abbiege-Assistenzsystemen gibt der EURO NCAP Crashtest Bewegungsbahnen für Fahrräder vor, für die die Funktion des FAS nachgewiesen werden muss (Seiniger et al. 2017, S. 327). Der Einsatz gesteuerter Fahrrad-Modelle entspricht daher dem heutigen Vorgehen des Standes der Technik für die Untersuchung von Crash-Situationen. Der FDS wird daher als im Anwendungsfall verwendbar angenommen. Darüber hinaus ist die Simulation durch die fehlende Möglichkeit einer Kollisionsdarstellung gekennzeichnet (**SIM 3).** Damit fehlt ein haptisches

Feedback für den Fahrer, Kollisionen können nur visuell wahrgenommen werden. In der Test-Auswertung können jedoch geometrische Berührungen und Überschneidungen ermittelt werden. Die Unfallsituation ist damit nur bis zum Moment der Kollision für den Fahrer immersiv dargestellt und direkt im Test beurteilbar, kann aber in der Auswertung klar bestimmt werden. Der FDS wird daher als für den Anwendungsfall ausreichend angenommen. Die Auswirkung des fehlenden haptischen Feedbacks der Kollision auf Beurteilungen durch den Fahrer muss in der Evaluation besonders beleuchtet werden. Weiterhin sind in dSpace ASM modellierte Objekte dadurch gekennzeichnet, dass sie für Sensoren durchlässig sind. Somit werden im Anwendungsfall auch Fahrräder erfasst, die hinter Umgebungselementen wie Häusern oder anderen Fahrzeugen verborgen sind. Die Erfassung derartiger Objekte ist normalerweise nur auf Systeme wie das Car2X System angewiesen. Sensormodelle sind damit nur durch geometrischen Parameter wie dem Öffnungskegel des Sensorfelds, der Position des Sensors am PKW oder der Reichweite des Sensors limitiert und erfassen das Umfeld in dem Sensorbereich nahezu vollständig. Obwohl diese stark idealisierten Sensoren in dSpace ASM verschiedene Anforderungen an reale Sensoren wie auch Car2X System nicht testen lassen, sind sie geeignet für den Test der Beherrschbarkeit eines Systems in dem die Interaktion zwischen Fahrer, FAS und Umgebung im Mittelpunkt steht. Durch geeignete Gestaltung der Testszenarien können potentiell unrealistische und damit den Fahrer irritierende Situationen zusätzlich vermieden werden. Die Nutzung der limitierten dSpace ASM Sensoren kann damit hinreichend geeignet für den Einsatzzweck angesehen werden.

In der Bewegungssystem-Konfiguration 3 zeigen sich störende Geräusche der Bewegungsplattform (**AUD 1**). Den Ausführungen in Kapitel 2.4 folgend, sorgen Störgeräusche für ein vermindertes Präsenzempfinden beim Fahrer, da umgebende Realität nicht ausgeschlossen werden kann. Wie zuvor ausgeführt sind die Bewegungssystem-Konfiguration 2 und 3 hinsichtlich ihrer Gestaltungsparameter weitestgehend gleichwertig. Für eine immersive Darstellung ist daher **Bewegungssystem-Konfiguration 2 bevorzugt einzusetzen**.

Für die **Dynamik-Simulation (DYN 1)** werden die von dSpace ASM vorgegeben Standard-Fahrdynamik Modelle eingesetzt. Diese sind jedoch nicht mit Realversuchen validiert. Exemplarisch wurde eine Masterarbeit zur Validierung des Lenk- und Bremsverhaltens des dSpace ASM Fahrzeugmodells durchgeführt (Enin 2017). Verschiedene standardisierte Fahrwerks-Simulationstest ergaben eine hohe Übereinstimmung zwischen Literatur-Richtwerten und Modellergebnissen im für die Fahrdynamik relevanten Bereich. Es wird daher eine hinreichende Validität für den Anwendungsfall angenommen.

Die nachfolgende **Tabelle 23** fasst die Bewertungen und Anwendungsfall-spezifische Einschränkungen zur Nutzung des FDS im Anwendungsfall zusammen.

Tabelle 23: Zusammenfassung der Bewertung und Anwendungsfall-spezifische Einschränkungen zur Nutzung des FDS im Anwendungsfall

Parameter-Gruppe	Bewertung und Anwendungsfall-spezifische Einschränkungen
Bewegungs-system	Bewegungssystem-Konfiguration 2 und 3 trotz Einschränkungen der Bewegungshülle, des Frequenzbereichs und der effektiven Richtung der Beschleunigung im Szenario Stadt ausreichend

Parameter-Gruppe	Bewertung und Anwendungsfall-spezifische Einschränkungen
Visualisierung	Bauliche Randbedingungen des Visualisierungssystems für den Anwendungsfall ausreichend. Visualisierung mit dSpace ASM und mit Unity3D nicht ausreichend. Evaluationstests jeweils in dSpace ASM sowie in Unity3D durchzuführen, Effekte und Ergebnisse müssen gesondert diskutiert und deren Evaluierbarkeit fallspezifisch hinterfragt werden
Haptische Kriterien	Mangelhafte Geschwindigkeitswahrnehmung muss gesondert diskutiert und Ergebnisse kritisch hinterfragt werden
Cockpit	Bedienbarkeit durch eingeschränkte Quer-Ergonomie sowie Präsenzerleben durch eingeschränkte Abbildungsqualität muss gesondert diskutiert und Ergebnisse kritisch hinterfragt werden
Simulations-System	Reaktive Fahrradfahrer sind im Anwendungsfall nicht erforderlich, Sensormodell sind ausreichend. Fehlende Kollision muss gesondert diskutiert und Ergebnisse kritisch hinterfragt werden
Soundsystem	Bewegungssystem-Konfiguration 2 ist Konfiguration 3 vorzuziehen
Dyn. Kriterien	dSpace ASM Standard-Fahrdynamik Modelle wurden validiert

Es kann zusammengefasst werden:

Unter Berücksichtigung der Einschränkungen **kann der Functional Drive Simulator im Anwendungsfall** verwendet werden. Die Einschränkungen müssen in der Testauswertung gesondert reflektiert werden. Erweiterungen des Fahrsimulators sind damit nicht erforderlich.

Es ist zu beachten: Die Einschränkungen **sind nur im spezifischen Anwendungsfall gültig**. Für einen anderen Anwendungsfall oder andere Randbedingungen, beispielsweise einen anderen Fahrsimulator oder andere Tools, muss die tiefergehende Analyse erneut durchgeführt und Anwendungsfall-spezifische Modifikationen am Fahrsimulator umgesetzt werden. Im nächsten Schritt können damit die Werkzeuge der HPBench konfiguriert werden.

Konfiguration der HPBench Werkzeuge

Wie in Kapitel 6.2 ausgeführt, basiert die Konfiguration der HPBench Werkzeuge auf Auswahlentscheidungen der vorgeplanten Elemente des generischen Frameworks. Aus dem Anwendungskontext, den eingesetzten Tools sowie den Anforderungen der Entwicklung an den Test resultieren folgende Randbedingungen: Die Werkzeuge der HPBench müssen den Aufbau und Test der Steuerung, Umfeldsensorik, Aktorik sowie verschiedener Anzeigen und Bedienelemente unterstützen. Die HPBench Werkzeuge müssen für die im BCAS Entwicklungsprojekt eingesetzte Software-Architektur umgesetzt werden: **Dymola** zur Verhaltenssimulation und **Processing** für die Erstellung digitaler Anzeigeinhalte sowie **dSpace ASM** für die Modellierung der Sensor- und Aktormodelle.

Abbildung 115 zeigt die resultierende, spezifische Systemarchitektur der HPBench für den frühen Beherrschbarkeits-Test des BCAS. Die Abbildung basiert auf dem in Kapitel 6.2 vorgestellten Systemaufbau der HPBench und zeigt die jeweils in den Software-Tools umgesetzten Systembestandteile.

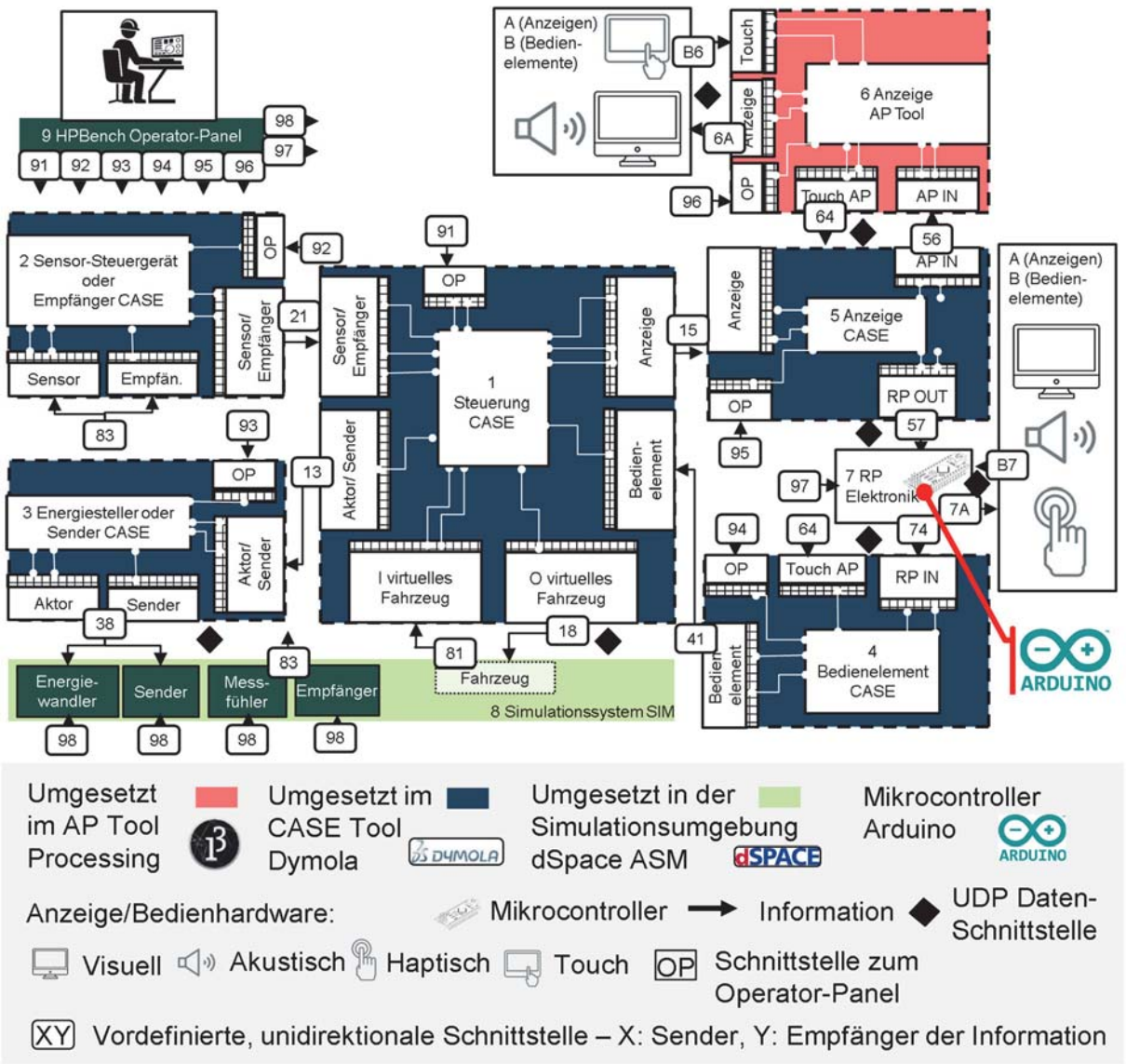


Abbildung 115: Spezifische Systemarchitektur der HPBench für den frühen Beherrschbarkeits-Test des BCAS

Für die Ansteuerung und das Auslesen der Anzeige- und Bedienelektronik wird ein **Arduino Mikrocontroller** vorgesehen. Die von der Firma Arduino angebotenen Mikrocontroller-Lösungen weisen eine hohe Verbreitung im Elektronik Prototyping auf und werden in verschiedenen Forschungsprojekten für das Rapid Prototyping von Interaktionsgeräten, aber auch vernetzen Geräten, Messtechnik oder Medizintechnik eingesetzt (Preim und Dachselt 2015; Buchholz et al. 2018b; Pearce 2012; Doukas 2012; Teikari et al. 2012). Neben einer großen Bandbreite an programmierbaren analogen und digitalen Schnittstellen bietet der Arduino Mikrocontroller Erweiterungsmöglichkeiten durch Schnittstellen zu verschiedenster Anzeige- und Bedienhardware (Arduino Project 2018). Für den Anwendungsfall können sowohl gebrauchsfertige Hardware der Unterhaltungselektronik wie auch Originalteile aus dem KFZ-Bereich angebunden werden.

Da in der Analyse kein spezifischer Erweiterungsbedarf an den Fahrsimulator spezifiziert wurde, dient der folgende Prozessschritt HPBench Spezifikation dem Aufbau der Werkzeuge der HPBench sowie deren Integration in den Fahrsimulator.

7.2.2 Prozessschritt HPBench Spezifikation

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, setzen sich die Werkzeuge der HPBench aus den mit Hilfe des HPBench Frameworks vorgeplanten Elementen HPBench Templates, HPBench Baukasten sowie HPBench Operator-Panel zusammen.

Die **HPBench Templates** basieren auf dem Prinzip der Instanziierung, also der Vordefinition einer Struktur mit Platzhaltern, in die ein Anwender Elemente einfügen kann. Durch die Systemarchitektur sind die Tools Processing für vordefinierten, digitalen Anzeigeinhalte sowie Dymola für die funktionalen CASE Tool Prototypen vorgegeben. **Abbildung 116** zeigt die Struktur des in **Processing erstellte HPBench Templates.** Die Template-Struktur ist durch verschiedene Reiter zur funktionalen Trennung in Elemente der Schnittstellen, zur Kommunikation mit dem Operator-Panel, zur Touch-Eingabe sowie für visuelle und akustische Anzeigen umgesetzt.

Abbildung 117 zeigt das in **Dymola erstellte HPBench Template** exemplarisch für die Steuerung. Um einen leeren, vom Mechatronik Entwickler zu füllenden Bereich ordnen sich vordefinierte Schnittstellen zu den anderen in Dymola umgesetzten Verhaltensmodellen des Sensors/Empfängers, des Aktors, des Bedienelementes/Senders sowie der Anzeige. Dazu werden Schnittstellen zum in dSpace ASM umgesetzten virtuellen PKW sowie dem HPBench Operator Panel bereitgestellt.

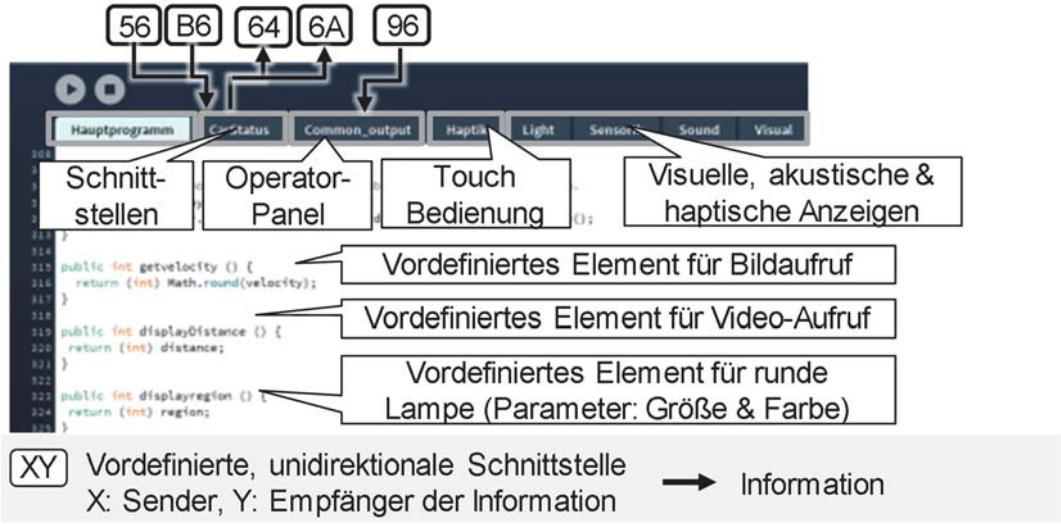


Abbildung 116: HPBench Template in Processing

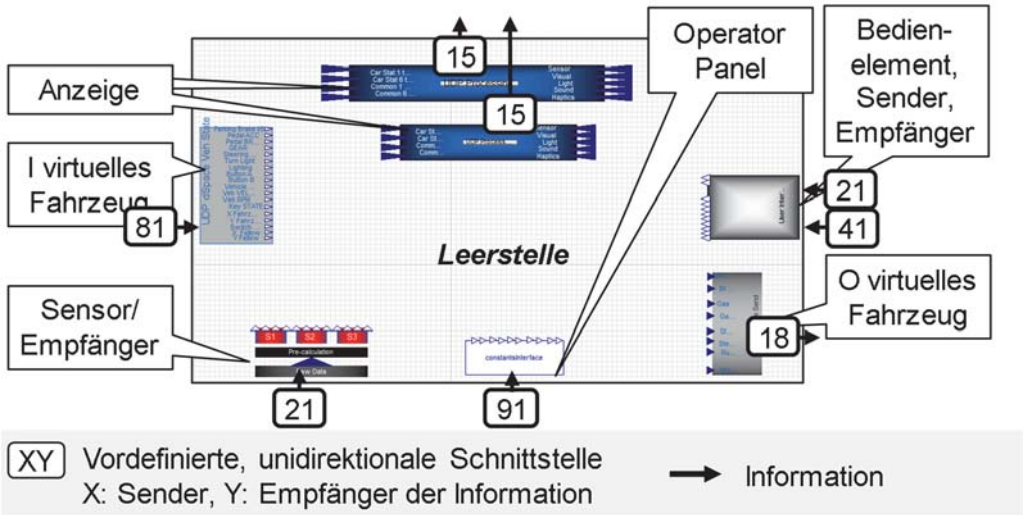


Abbildung 117: HPBench Template in Dymola

Die Erstellung des HPBench Baukastens basiert auf dem Prinzip der Aggregation, also der neuen Zusammenstellung oder strukturellen Veränderung vorhandener technischer Elemente ohne deren Änderung durch den Anwender. Die Prozessschritte zum Aufbau der HPBench sind vor dem Entwicklungsprozess des BCAS verortet, die Elemente des **HPBench Baukastens** müssen daher lösungsneutral sein und den möglichen Lösungsraum der Hard- und Softwarebausteine für Anzeigen und Bedienelemente des Anwendungsfalles BCAS vollständig abbilden. Den Ausführungen aus Kapitel 3.1.2 folgend, muss der HPBench Baukasten die folgende Spanne an Anzeigen und Bedienelementen abbilden können: Digitale, Analoge, Bildhaft situationsanaloge und kontaktanaloge visuelle Anzeigen. Dazu Nonverbale und verbale akustische Anzeigen, passive und aktive Oberflächen und Betätigungshaptik, visuelle und akustische Bedienelemente sowie haptische Bedienelemente für die digitale und analoge Translations- und Rotationsbewegung von Hand und Arm.

Abbildung 118 zeigt die umgesetzten **Hardware-Elemente des HPBench Baukastens**. Der 28‘‘ Bildschirm sowie der Touchscreen dienen der Ausgabe digitaler, analoger, bildhaft situationsanaloger und kontaktanaloger visueller Anzeigen. Das modulare System mit frei kombinierbaren Rapid Prototyping Einzel LEDs dient der Ausgabe digitaler visueller Anzeigen, Lautsprecher dienen der Ausgabe nonverbaler und verbaler akustischer Anzeige-Inhalte. Mit Rapid Prototyping Technologie werden Vibrationsmotoren zur Ausgabe haptischer Anzeigen der Oberflächenhaptik, ein Gestensensor zur visuellen Erfassung einer Bedienabsicht durch Gestik, ein Sprachsensor zur Erfassung einer Bedienabsicht durch verbale Eingabe sowie Taster und Kippschalter zur Erfassung einer haptischen Bedienabsicht durch analoge oder digitale Translationsbewegung der Hand umgesetzt. Der Touchscreen dient zur Erfassung der analogen und digitalen Translations- und Rotationsbewegung der Hand während einer Touch-Bedienung. Die Hardware-Elemente des HPBench Baukastens bilden die möglichen Anzeigen und Bedienelemente damit vollständig ab.

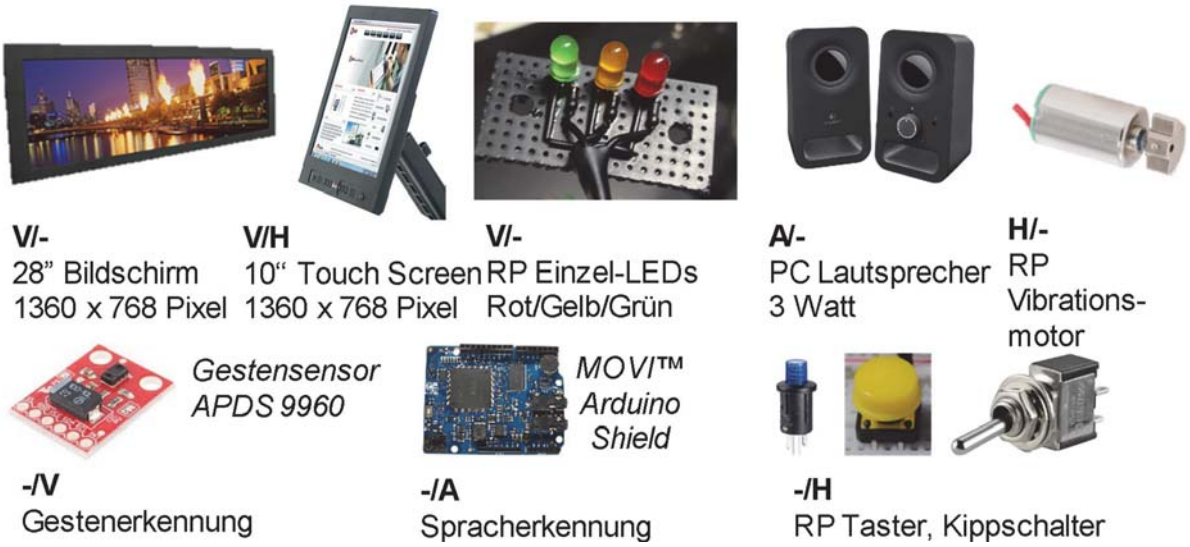


Abbildung 118: HPBench Baukasten-Elemente und exemplarische Integration in den Functional Drive Simulator (Bildquellen: DELTA COMPONENTS GmbH 2018; Conrad Electronic SE 2018; Audeme LLC 2016; SparkFun Electronics 2018)

Abbildung 119 (Links) zeigt die Integration der Hardware-HPBench Baukasten-Elemente in den Functional Drive Simulator exemplarisch für den 28‘‘ Bildschirm, den PC Lautsprecher sowie den Touchscreen.

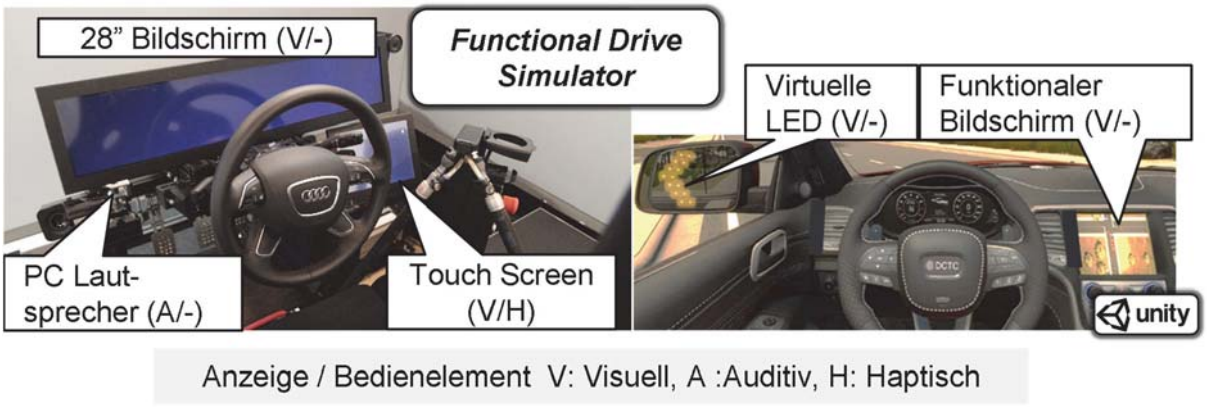


Abbildung 119: (Links) Integration der Hardware-Elemente und (Rechts) Software-Elemente des HPBench Baukastens in den Functional Drive Simulator

Neben den Hardware-Elementen werden auch **Software-Elemente des HPBench Baukastens** umgesetzt. Die umgesetzten Elemente dienen dem schnellen Prototyping von Anzeigen durch Bereitstellung von vordefinierten Software-Bausteinen. Entsprechend der Vorgaben sind diese Bausteine in Processing umgesetzt. Zur Umsetzung sind verschiedene Steuerelemente für den Aufruf von Bildinhalten sowie Videos sowie für die Erstellung funktionaler, geometrischer Elemente in Processing vordefiniert. Exemplarisch sind einige dieser Elemente in **Abbildung 116** dargestellt. Die erstellten funktionalen visuellen Anzeigen können beispielsweise über den 28‘‘ Bildschirm oder den Touchscreen wiedergegeben werden. Aber auch Einbettung in das 3D Modell des Fahrzeugs und direkte Wiedergabe über Unity3D ist möglich. Exemplarisch ist eine solche Wiedergabe in **Abbildung 119** (Rechts) gezeigt. Mit Hilfe der in **Abbildung 116** gezeigten vordefinierten Elementen für runde Lampen wurde eine virtuelle LED-Anzeige im Außenspiegel umgesetzt. Dazu wurde ein funktionaler Bildschirm in der Mittelkonsole des 3D Modells eingebettet.

Das **HPBench Operator-Panel** dient der effizienten Testdurchführung, indem es die „Online“ Parametrierung von Modellen und Prototypen während eines Tests ermöglicht. Die Simulationsumgebung dSpace ASM bietet verschiedene Features zu Modellierung von Nutzerschnittstellen zur Online-Parametrierung, Messdatenerfassung und -auswertung während des Tests (dSPACE 2018a). Daher wird neben den Sensoren und Aktoren das **HPBench Operator-Panel** in dSpace ASM umgesetzt.

7.3 Evaluation der Beherrschbarkeit des hybriden FAS Prototyps durch dessen Entwicklungsteam

In der **ersten Evaluationsstudie** soll die Beherrschbarkeit des BCAS im Test durch dessen Entwicklungsteams nachgewiesen werden. Zur Evaluation der HPiL Methodik ist es erforderlich, den Aufbau des hybriden BCAS Prototyps zu betrachten. Entsprechend werden die Prozessteile des HPiL Prozesses „Aufbau des hybriden FAS Prototyps“ sowie „Test des hybriden FAS Prototyps“ durchlaufen. **Abbildung 120** visualisiert diese Schritte.

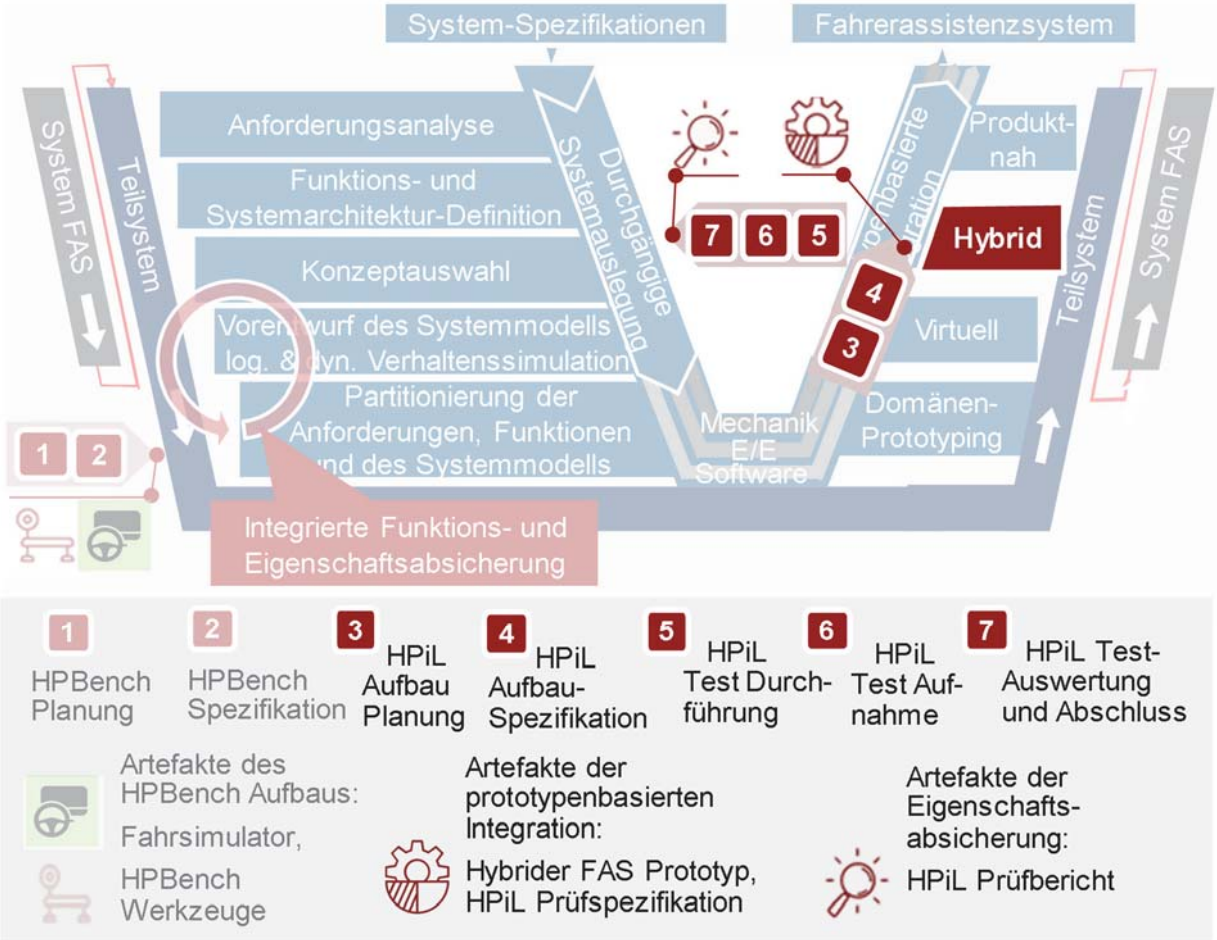


Abbildung 120: Prozessteile „Aufbau des hybriden FAS Prototyps“ und „Test des hybriden FAS Prototyps“ im ersten Evaluationstest

7.3.1 Versuchsdesign der 1. Evaluationsstudie

Wie zu Beginn von Kapitel 7 ausgeführt, dient die erste Evaluationsstudie des Nachweises der Beherrschbarkeit der entwickelten BCAS durch dessen Entwicklungsteams. Die Mitglieder der drei entwickelnden Projektteams sind entweder für die Entwicklung des BCAS-Teilsystems Mensch-Maschine Schnittstelle oder für die des mechatronischen Regelsystems verantwortlich. Im HPiL Test übernehmen die Mitglieder der Projektteams des BCAS die Probanden-Rollen des Systemintegrators, des Prüfers und des Anwenders. **Tabelle 24** charakterisiert die an der Evaluation teilnehmenden sechs MMS Entwickler und sechs Mechatronik-Entwickler anhand ihres Geschlechts, dem Studienfach und dem vorhandenem Abschluss.

Tabelle 24: Charakterisierung der Probanden der 1. Evaluationsstudie

Teilsystem-Entwickler	Team	Geschlecht	Studium und vorhandener Abschluss
MMS Entwickler (N=6)	1	2x männlich	2x Maschinenbau (Bachelor)
	2	2x männlich	1x Maschinenbau (Bachelor) 1x Mechatronik (kein Abschluss)
	3	2x männlich	2x Maschinenbau (Bachelor)
Mechatronik Entwickler (N=6)	1	2x männlich	2x Maschinenbau (Bachelor)
	2	2x männlich	1x Maschinenbau (Bachelor) 1x Mechatronik (kein Abschluss)
	3	2x männlich	2x Maschinenbau (Bachelor)

Wie in Kapitel 3.3.4 ausgeführt, bemisst sich die Qualität einer Nutzerstudie an den Kriterien der **Glaubwürdigkeit**, der **internen Validität**, der **Übertragbarkeit** sowie der **Zuverlässigkeit**. Die Probanden sind alle männlich, wohingegen sich die zu repräsentierende Zielgruppe der FAS Entwickler durch einen Frauenanteil von etwa 17% auszeichnet (vergleiche Kapitel 4.2). Die Probanden studieren im Studium des Maschinenbaus oder der Mechatronik. Typische Ausrichtungen eines Maschinenbaustudiums fokussieren sich auf Mechanik-Entwicklung und beinhalten zumeist Grundlagen der Software- und Elektronikentwicklung. Mechatronik-Studiengänge fokussieren sich auf das Zusammenspiel von Mechanik, Software und Elektronik. Wie in Kapitel 3.4.3 ausgeführt beinhaltet die Entwicklung des mechatronischen Regelsystems Entwicklungsaufgaben der Software sowie der Elektrik und Elektronik. Kapitel 3.4.4 beschreibt die Entwicklungsaufgaben der MMS-Entwicklung den Bereichen der Mechanik sowie des User Experience Designs zugehörig. Zur Qualifikation für die Entwicklungsaufgaben wurden die Probanden im Rahmen der Lehrveranstaltung, in der das BCAS Entwicklungsprojekt durchgeführt wurde, in den Bereichen Systementwicklung, Mechanik-Simulation, Verhaltensmodellierung und -simulation sowie Vorgehen und Durchführung von Tests ausgebildet. Trotz der Vorqualifikation vor und während der Lehrveranstaltung kann die **Probandengruppe** zusammenfassend nur als **eingeschränkt glaubwürdig** angesehen werden in ihrer Fähigkeit, die Zielgruppe hinsichtlich Zusammensetzung und Vorkenntnissen in Entwicklung und Test abzubilden. Das Entwicklungsprojekt BCAS ist so konzipiert, dass die relevanten der in Kapitel 3.4 beschriebenen Entwicklungsaufgaben der FAS Entwicklung realitätsnah abgebildet und für die Probanden durchführbar sind. Die **Entwicklungsaufgabe** kann daher als **hinreichend glaubwürdig** angesehen werden.

Die Evaluation untersucht das neuen Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren und dient der erstmaligen Anwendung der HPBench Werkzeuge. Die Störgrößen werden durch die Schaffung gleicher Gruppengrößen, gleicher Ausgangsbedingungen für alle Probanden sowie die Nutzung der Testumgebung FDS reduziert. Insbesondere im Einsatz der erstmals eingesetzten HPBench Werkzeuge können aber Qualitätseinschränkungen des Testequipments nicht ausgeschlossen werden. Die Evaluation hat somit nur eine **eingeschränkte interne Validität**. Die Übertragbarkeit der Testergebnisse in andere Testumgebungen wird im HPiL Testverfahren angenommen, kann aber in der Evaluation selbst nicht belegt werden. Zu Beurteilung des Kriteriums der **Übertragbarkeit** wird daher in **Kapitel 7.6 eine Evaluation** mit einem anderen Testsetup durchgeführt. Die geringe Anzahl von nur 12 Probanden schränkt die statistische Signifikanz

von Ergebnissen ein. Zusammen mit der eingeschränkten Glaubwürdigkeit der Probanden ist die Evaluationsstudie damit **eingeschränkt zuverlässig**. Es kann zusammengefasst werden:

Die erste Evaluationsstudie zeichnet sich durch eine eingeschränkte Glaubwürdigkeit, interne Validität und Zuverlässigkeit sowie eine nicht beurteilbare Übertragbarkeit aus. Die Qualität der Nutzerstudie ist damit stark limitiert, Ergebnisse und Erkenntnisse sind nur eingeschränkt nutzbar.

Für die Evaluation der Anforderungen (A7) bis (A14) ist jedoch zwingend die Anwendung der HPiL Methodik im FAS Entwicklungsprozess erforderlich. Die erste Evaluationsstudie soll daher als **explorative Studie** diese Anwendung erstmals erproben. Die Ergebnisse der Studie müssen kritisch diskutiert werden.

In der Evaluationsstudie soll das BCAS mit verschiedenen Testverfahren auf Beherrschbarkeit getestet werden. Wie in Kapitel 3.4 ausgeführt, werden Teilsystem-Prototypen bereits im Stand der Technik auf Teilsystem-Ebene auf einzelnen Aspekte der Beherrschbarkeit getestet.

Den Ausführungen in Kapitel 3.4.3 folgend, wird die Fähigkeit des FAS, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden, heute in Test des mechatronischen Regelsystems mit X-in-the-Loop Tests durchgeführt. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, ist ein solcher Test auf Basis von Verhaltensmodellen im **Model-in-the-Loop (MiL) Test** möglich, wird aber heute wegen verschiedener Einschränkungen nicht durchgeführt. Die Einschränkungen, denen der MiL Test unterworfen ist, beispielsweise einer fehlende Fehlerrobustheit des Modells der Software oder dem fehlenden Schutz gegen externe Manipulationen, resultieren auf dem Verzicht von Softwarecode und seriennahe Elektronik und treten damit ebenso im HPiL Testverfahren auf. Der Vorteil, den ein Vergleich des heute möglichen MiL Tests und des neuartigen HPiL Test damit für die Evaluation bietet, ist die Nutzung derselben Verhaltensmodelle in beiden Testverfahren. Es kann also anhand desselben Entwicklungs-Prototyps hinsichtlich Kriterien wie Nutzbarkeit, Nützlichkeit oder auch Umfang des Tests evaluiert werden. Daher wird der Model-in-the-Loop Test als Referenz des Standes der Technik zum Beherrschbarkeits-Test des mechatronischen Regelsystems im Regelkreis der Mechatronik verwendet. Den Ausführungen des Kapitel 3.2.3 folgend, sind dem MiL Test die testspezifischen Rollen Prüfer und Systemintegrator zugeordnet.

Das **Testverfahren Mensch-Maschine Konzeptsimulation (KS Test)** wird nach Kapitel 3.4.4 für den Test der Beherrschbarkeits-Kriterien der Wahrnehmbarkeit von Systemanzeigen in der Entwicklung des Teilsystems Mensch-Maschine Schnittstelle eingesetzt. Die ersten dieser Tests basieren auf funktionalen AP-Prototypen, die auf Rapid Prototyping Elektronik der Anzeigen und Bedienelemente aufgespielt sind. Diese werden entsprechend der anthropometrischen und ergonomischen Vorgaben der MMS Entwicklung statische Sitzkisten integriert. Dieser erste Test von in statische Sitzkisten integrierter funktionaler MMS Prototypen in der Mensch-Maschine Konzeptsimulation wird daher als Referenz des Standes der Technik zum Beherrschbarkeits-Test der Mensch-Maschine Schnittstelle im Regelkreis der Fahrer-FAS-Interaktion verwendet. Den Ausführungen des Kapitel 3.2.3 folgend, sind dem KS Test die Rollen Anwender, Prüfer und Systemintegrator zugeordnet.

Für den **Nachweis der Beherrschbarkeit** des BCAS in den Testszenarien müssen die Entwicklungsteams im Test die Erfüllung der in Tabelle 20 zusammengestellten 26 Beherrschbarkeits-Kriterien der Prüfspezifikation nachweisen. Da der MiL und KS Test nur für den Test bestimmter Beherrschbarkeits-Kriterien nutzbar ist, muss der direkte Vergleich anhand ebendieser Kriterien durchgeführt werden. Die Beherrschbarkeits-

Kriterien des Prüfkonzeptes werden daher in die in **Tabelle 25** dargestellten drei Gruppen aufgeteilt.

Tabelle 25: Gruppierung zur Klassifizierung der Beherrschbarkeits-Kriterien der Prüfspezifikation

Gruppe 1: MiL/HPiL	Beherrschbarkeits-Kriterium ist sowohl im Model-in-the-Loop (MiL) als auch im Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Test testbar
Gruppe 2: KS/HPiL	Beherrschbarkeits-Kriterium ist sowohl im Testverfahren Mensch-Maschine Konzeptsimulation (KS) als auch im Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Test testbar
Gruppe 3: HPiL	Beherrschbarkeits-Kriterium ist nur im Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Test testbar

Das Kriterium „Das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash“ ist im MiL Test testbar. Das gesteuerte Fahrerverhaltensmodell fährt den PKW entsprechend der Vorgaben der vier Testszenarien. Zur Erzeugung der kritischen Situationen steuert ein zweites gesteuertes Fahrerverhaltensmodell das Fahrrad und führt die unfallkritischen Situationen herbei. Eine mögliche Kollision kann trotz fehlendem Kollisionsmodell durch Analyse des Abstandes sowie der Überdeckung zwischen PKW und Fahrrad identifiziert werden. Das Kriterium der Kollisionsfreiheit muss für jedes der vier Testszenarien erfüllt werden. Die Reaktion der Steuerung auf Näherung des Fahrrads kann analysiert werden, entsprechend kann die rechtzeitige Anzeige einer Warnung entsprechend der Kritikalität einer Verkehrssituation oder die Anzeige der Warnung abhängig von der jeweiligen Verkehrssituation untersucht werden. Durch eine Parametrierung des Bedien-Eingangssignals kann untersucht werden, ob das BCAS ein- oder ausgeschaltet werden und es verschiedene Betriebsmodi einnehmen kann. Die fünf Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 1 (MiL/HPiL) sind in **Tabelle 26** zusammengefasst.

Tabelle 26: Gruppe 1 – Beherrschbarkeits-Kriterien, testbar im MiL und HPiL Test

	Nr.	**Anforderung der Beherrschbarkeit**
Fahrer-Wahr-nehmung	3	Die Warnungen werden rechtzeitig entsprechend der Kritikalität der Verkehrssituation angezeigt.
	7	Die Warnungen berücksichtigen verschiedene Verkehrssituationen.
Fahrer-Entscheidung	14	Das System kann ein- und ausgeschaltet werden.
	15	Das System kann verschiedene Betriebsmodi einnehmen.
	16	Das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash

Im KS Test kann die Wahrnehmbarkeit von Systemanzeigen getestet werden. Der Proband kann die kontext-konforme Einbindung der Anzeigen und Bedienelemente in das PKW-Cockpit beurteilen. Im Rahmen von Wizard-of-Oz Tests, in denen ein Prüfer die Warnsignale durch manuelle Bedieneingaben simuliert, können die Verständlichkeit, Eindeutigkeit der Warnungen und deren Vereinbarkeit mit anderen Warnungen im Cockpit beurteilt werden. Auch kann so das Verständnis des Fahrers über Modi und Status des Systems und der ausreichenden Information, die durch die Anzeigen zu diesen gegeben werden, getestet werden. Weiterhin ist eine Interaktion des Fahrers mit den Bedienelementen möglich. Dies ermöglicht die Beurteilung von deren Nutzbarkeit zum Ein-/Ausschalten oder zum Einstellen verschiedener Betriebsmodi. Die sieben Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 2 (KS/HPiL) sind in **Tabelle 27** zusammengefasst.

Tabelle 27: Gruppe 2 – Beherrschbarkeits-Kriterium, testbar im KS und HPiL Test

	Nr.	Anforderung der Beherrschbarkeit
Fahrer-Wahr-nehmung	1	Der Fahrer hat ein klares Verständnis der System-Modi und Status.
	4	Das Bedienelement zum Ein-/Ausschalten ist für den Fahrer nutzbar.
	5	Es ist dem Fahrer möglich, die verschiedenen Betriebsmodi des Systems zu unterscheiden.
	8	Die Warnungen des Systems sind für den Fahrer verständlich und eindeutig.
	9	Die Warnungen sind mit anderen Warnungen/Informationen im Cockpit vereinbar.
	10	Der Fahrer ist ausreichend über Status und Funktion des Systems informiert.
	11	Die Position der Anzeigen und Bedienelemente passen in den Kontext bestehender MMS.

Der Test der Beherrschbarkeits-Kriterien Gruppen 1 und 2 dient maßgeblich der Evaluation der gegenüber bestehenden Testverfahren **höheren Nützlichkeit des HPiL Testverfahrens**. Die restlichen 14 Kriterien wie Vertrauen, Wachsamkeit, Akzeptanz oder Kontrollproblem, sind weder im MiL noch im KS Test testbar. Der HPiL Test der Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 3 dient daher der Evaluation, ob durch den HPiL Test Erkenntnisse in gegenüber bestehenden Testverfahren **höherer Qualität oder größerem Umfang** erlangt werden können. Die 14 Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 3 (HPiL) sind in **Tabelle 28** zusammengefasst.

Tabelle 28: Gruppe 3 – Beherrschbarkeits-Kriterium, testbar nur im HPiL Test

	Nr.	Anforderung der Beherrschbarkeit
Fahrer-Wahr-nehmung	2	Die Systemreaktionen sind konform mit der Erwartungshaltung des Fahrers: Sie korrespondieren mit vorheriger Erfahrungen und Er-wartungen aus der Nutzung ähnlicher Systeme.
	6	Die Warnungen sind der Kritikalität der Verkehrssituation angemes-sen. 12
	12	Die Warnungen sind in typischen relevanten Verkehrssituationen wahrnehmbar.
	13	Der Betrieb oder die Überwachung des Systems kann ohne eine große Änderung der Aufmerksamkeit des Fahrers in dessen Fahr-aufgabe durchgeführt werden.
Fahrer-Entschei-dung	17	Es ist möglich, das System jederzeit zu übersteuern
	18	Es ist dem Fahrer möglich, das System jederzeit ein- und auszu-schalten
	19	Die Systemgrenzen sind für den Fahrer klar verständlich
	20	Der Fahrer versteht das System-Feedback auf seine Bedieneingaben und Handlungen
Fahrer-Reaktion	21	Die Warnungen sind der Kritikalität der Gefahr angemessen
	22	Alle Mensch-Maschine Interaktionen können durch den Fahrer unterbrochen werden
	23	Alle Mensch-Maschine Interaktionen können durch den Fahrer unterbrochen werden
	24	Der Fahrer kann das System nach unbeabsichtigter Aktivierung oder Deaktivierung beherrschen

	Nr.	Anforderung der Beherrschbarkeit
Fahrer-Reaktion	25	Der Fahrer kann eine Situation beherrschen, bei der das System nicht verfügbar ist, weil die Situation außerhalb seiner Systemgrenzen ist.
	26	Fahrerhandlungen zum übersteuern des Systems sind intuitiv.

Als Versuchsdesign für die erste Evaluationsstudie wird ein 2x2 Within Subject Design mit den Testbedingungen „Testverfahren“ und „Probanden-Rolle“ verwendet. Den Vorgaben aus Kapitel 3.3.4 folgend, testet jede der zwei Probanden-Rolle jeweils zwei Testverfahren und die Ergebnisse werden anschließend verglichen. Als Probanden führen jeweils zwei Mechatronik Entwickler pro Team den Vergleich zwischen HPiL Test und MiL Test durch. Und nehmen dabei die in den Rollen Systemintegrator und Prüfer ein. Jeweils zwei MMS Entwickler pro Team führen den Vergleich zwischen HPiL Test und KS Test durch und nehmen die in den Rollen Systemintegrator, Prüfer und Anwender ein. **Tabelle 29** fasst das Versuchsdesign zusammen.

Tabelle 29: Versuchsdesign der 1. Evaluationsstudie

Stichprobengröße: N= 6 je Probanden-Rolle		**Testbedingung 2: Probanden-Rolle**	
		MMS Entwickler	**Mechatronik Entwickler**
Test-bedingung 1: Testverfahren	**Stand der Technik**	MMS Konzeptsimulation (KS Test) in der statischen Sitzkiste	Model-in-the-Loop Test (MiL Test)
	Neues Testverfahren	Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL Test)	Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL Test)

Im KS und HPiL Test übernehmen Mitglieder der Projektteams die Rolle des Anwenders, der den PKW fährt und mit dem FAS interagiert. Für diese Probanden muss eine **vertiefte Analyse** durchgeführt werden. In der Evaluation von Fahrvorgängen ist die hinreichende Abbildung des „Normalfahrers“ durch die Probanden das entscheidende Kriterium (Weitzel 2013, S. 84). Der Normalfahrer kann durch statistische Daten wie folgt charakterisiert werden: 63% der Besitzer einer deutschen Fahrerlaubnis sind zwischen 25 und 44 Jahre alt, der Anteil an Frauen und Männern liegt bei jeweils 50% (Kraftfahrt-Bundesamt 2018). Die Mehrheit der Fahrer (N=63%) hat mittlere jährliche Fahrleistungen von 5000-15000km. Hohe Fahrleistungen von über 15000km werden durch etwa 23%, niedrige Fahrleistungen von unter 5000km werden durch etwa 13% der Fahrer erbracht (Statista 2018). Wie beschrieben bildet das Testwerkzeug Fahrsimulator die reale Fahrt in hoher Abbildungsqualität und mit hohem Abbildungsumfang, jedoch nicht vollständig entsprechend der Realität ab. Der Grad der Erfahrung des Probanden mit dem Werkzeug Fahrsimulator hat daher einen signifikanten Einfluss auf das Testergebnis. Neben der Erfahrung im Fahrsimulator selbst werden in Fahrsimulationsstudien auch Vorerfahrungen mit PC-Spielen als relevant angesehen (vergleiche Reich 2017, S. 66).

Die Projektteams bestimmen insgesamt 4 Probanden für die Rolle Anwender im KS Test und HPiL Test. Projektteam 1 setzt für den KS und den HPiL Test unterschiedliche Probanden ein, Projektteam 2 und 3 jeweils denselben Probanden für KS und HPiL Test. Die Analyse von deren Charakteristika zeigt: Drei der vier Anwender haben eine niedrige, der Anwender von Projektteam 1 eine sehr niedrige jährliche Fahrleistung. Einer der Probanden war der Altersgruppe 18-24 Jahre, die anderen den Altersgrup-

pen 25-34 Jahren zugehörig. Zum Zeitpunkt der Evaluationsstudie waren die Probanden zwischen 4 und 16 Jahren im Besitz eines Führerscheins. Die Anwender der Projektteams 2 und 3 erwarben Ihren Führerschein aus Australien beziehungsweise Indien und gaben an, dort den Großteil Ihrer Fahrpraxis zu haben. Da in beiden Ländern Linksverkehr herrscht, zeichnen sich beide Anwender durch geringe Vorerfahrung der im Anwendungsfall BCAS vorgesehenen Fahrt im Rechtsverkehr und der Bedienung von Linkslenker-PKWs aus. Die durch die Projektteams ausgewählten Anwender im KS und HPiL Test bilden den „Normalfahrer“ damit nur eingeschränkt ab, die Evaluation zeichnet sich durch eine **eingeschränkte Glaubwürdigkeit** aus. er Anwender von Projektteam 1 gab mittlere Vorerfahrungen mit Fahrsimulatoren und eine mittlere PC-Spiele Nutzung von 1 bis 2 Mal pro Woche an. Die anderen drei Anwender gaben eine sehr geringe bis keine Fahrsimulator-Vorerfahrung sowie wenig bis keine monatliche PC Spieleaktivität an. Es sind daher bei der Mehrheit der Probanden Anpassungsschwierigkeiten an den Fahrsimulator, der die Realität in eingeschränkter Abbildungsqualität abbildet, zu erwarten. Es kann zusammengefasst werden:

Die Probanden, die in der ersten Evaluationsstudie die Rollen der Anwender übernehmen, bilden die Zielgruppe „Normalfahrer“ nur eingeschränkt ab. Es sind Verfälschungen aus Anpassungsschwierigkeiten an das Rechtsverkehr-Szenario und den Fahrsimulator zu erwarten.

Messmethoden und –werkzeuge der Evaluation

In der Evaluationsstudie dienen verschiedene Messmethoden und -werkzeuge zur Erfassung und Auswertung der Interaktion zwischen den Probanden und den HPBench Werkzeugen und dem Fahrsimulator während der fünf Prozessschritte des Aufbaus und Test des hybriden BCAS Prototyps. Darüber hinaus setzen die Projektteams selber verschiedene Messmethoden und -werkzeuge ein. Folgende Messmethoden und -werkzeuge werden eingesetzt:

In **computerbasierte Aufnahme von Testdaten** werden alle relevanten computergestützten Berechnungen, Simulationen, Nutzerhandlungen sowie deren Ergebnisse aufgenommen. Dies beinhaltet die Aufnahme von Fahrdaten des virtuellen PKWs in der virtuellen Umgebung des Simulationssystems, also Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrzeugbeschleunigung, Lenkwinkel oder die Betätigung des Blinkerhebels. Weiterhin werden Sensordaten der virtuellen Sensoren aufgenommen, im Anwendungsfall die Erkennung eines relevanten Objektes „Fahrrad“ sowie die Messung dessen Abstand und Relativgeschwindigkeit zum Fahrzeug. Der Aufnahme der Signale der CASE-Tools dienen weitere Kanäle. Dies betrifft primär die durch die Steuerung ausgegebene Warnstufe, die Eingriffssignale der Aktorik sowie die Signale zur Interaktion mit der jeweiligen Anwender-Rolle über Anzeigen und Bedienelemente.

Weiterhin werden die **Handlungen der verschiedenen Probanden während der Tests** aufgenommen. So dienen verschiedene Kameras und Mikrofone zum einen der Aufnahme der Interaktion zwischen Fahrsimulator, FAS und der jeweiligen Prüfer-Rolle zur Testdurchführung sowie zur Aufnahme der Auf- und Umbau-Tätigkeiten durch den jeweiligen Systemintegrator. Zum anderen dienen sie der Aufnahme der Handlungen der jeweiligen Anwender im Beherrschbarkeits-Test der Projektteams. Die Handlungen der jeweiligen Prüfer zur Testdurchführung werden zusätzlich mit Screencasts, also Videomitschnitten der Bildschirminhalte der am Test beteiligten Computer, aufgezeichnet. Während des Evaluationstests werden durch die jeweiligen Prüfer Beobachtungen der Probanden vorgenommen und fortlaufend in Testprotokollen protokolliert. Dies beinhaltet beispielsweise auch eine Zeitnahme verschiedener Handlungen der Probanden.

Zur **Aufnahme von Daten der Probanden nach dem Test** dienen verschiedene Fragebögen. Es werden standardisierte Fragebögen, die auch in heutigen MMS-Entwicklungsprozessen zur Nutzerevaluation eingesetzt werden, verwendet. Mit Hilfe des standardisierten Fragebogens „wahrgenommenen Nützlichkeit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ werden die jeweiligen Prüfer und Systemintegratoren zu ihrer Einschätzung der Nützlichkeit und Nutzbarkeit der verwendeten Test-Werkzeuge befragt. Diese korrelieren mit der Einstellung eines Nutzers gegenüber dem Werkzeug und der damit unterstützen Methoden und Prozesse sowie der Verhaltensintention des Nutzers zu dessen Nutzung (Davis 1989, S. 319). Der standardisierte NASA TLX Fragebogen dient der Einschätzung der geistigen, körperlichen und zeitlichen Anforderungen an die jeweiligen Prüfer und Systemintegratoren sowie der Ausführungsqualität, dem Aufwand und der Frustration bei der Erfüllung der jeweiligen Testaufgabe (nach Hart und Staveland 1988). Weiterhin werden die Fragebögen zur „Beherrschbarkeits-Testbarkeit MMS“ sowie „Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik“ eingesetzt. Diese erfragen die Einschätzung der Anwendbarkeit der HPBench Werkzeuge für den Systemintegrator und Prüfer für deren Aufgaben des Aufbaus, Integration und Tests der jeweiligen Prototypen. Diese spezifischen, nicht standardisierten Fragebögen sind **Anhang E** zu entnehmen.

Die Messmethoden und -werkzeuge dienen der Evaluation, ob und zu welchem Grad die in zu Beginn von Kapitel 7 aufgestellten Anforderungen in der Anwendung der HPiL Methodik erfüllt werden. **Tabelle 30** ordnet Messmethoden und -werkzeuge jeweils den Anforderungen (A1) bis (A14) zu.

Tabelle 30: Messmethoden und -werkzeuge zur Evaluation der Anforderungserfüllung in der 1. Evaluationsstudie

Nr.	Anforderung	Messmethode (Messwerkzeug)
A1	Der hybride FAS Prototyp muss für den Verwendungszweck geeignet sein, das FAS also angemessen für den umfassenden Beherrschbarkeits-Test abbilden.	• Test auf funktionale Angemessenheit und Passgenauigkeit der Mechatronik (Fahrdaten, CASE-Tools) • Analyse Angemessenheit und Passgenauigkeit der MMS • Befragung der Angemessenheit und Passgenauigkeit der MMS (Fragebogen „Beherrschbarkeits-Testbarkeit MMS“)
A2	Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss geeignet und aufgabenangemessen für den Zweck und das Untersuchungsinteresse des Beherrschbarkeits-Test sein	• Test auf funktionale Angemessenheit und Passgenauigkeit der Mechatronik (Fahrdaten, CASE-Tools)
A3	Die Anzeigen und Bedienelemente des hybriden FAS Prototyps müssen verständlich für den Anwender sein	• Test auf auslegungskonforme Reaktion des Anwenders (Fahrdaten, CASE-Tools) • Beobachtung der auslegungskonformen Reaktion • Befragung der Angemessenheit und Passgenauigkeit der MMS (Fragebogen „Beherrschbarkeits-Testbarkeit MMS“)

Nr.	Anforderung	• Messmethode (Messwerkzeug)
A4	Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss für den Anwender verständlich und durchführbar sein.	• Test auf auslegungskonforme Reaktion des Anwenders (Fahrdaten, CASE-Tools) • Befragung der Angemessenheit und Passgenauigkeit der Mechatronik (Fragebogen „Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik“) • Beobachtung der Durchführbarkeit
A5	Der Aufbau des hybriden FAS Prototyps muss für den Systemintegrator durchführbar sein.	• Test auf funktionale Angemessenheit und Passgenauigkeit der Mechatronik (Fahrdaten, CASE-Tools) • Beobachtung der Durchführbarkeit • Befragung der Anwendbarkeit der Werkzeuge für Aufbau & Integration (Fragebögen Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik & MMS“)
A6	Der HPiL -Test des hybriden FAS Prototyps muss für den Prüfer durchführbar sein	• Beobachtung der Durchführbarkeit • Befragung der Anwendbarkeit der Werkzeuge für Test (Fragebögen „Anwendbarkeit der Werkzeuge“)
A7	Die HPiL Methodik muss kompatibel mit industriellen Entwicklungs- und Testprozessen, -methoden und -werkzeugen sein	• Beobachtung der Anwendbarkeit durch Systemintegrator und Prüfer • Befragung der Anwendbarkeit der Werkzeuge für Aufbau, Integration & Test (Fragebögen Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik & MMS“)
A8	Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren vergleichbare Nutzbarkeit des HPiL Testverfahrens für den Systemintegrator und Prüfer ermöglichen.	• Beobachtung der Nutzbarkeit der HPiL Methodik im Vergleich zum MMS-und Mechatronik Testverfahren • Befragung Nutzbarkeit HPiL Testverfahren im Vergleich zum MMS-und Mechatronik Testverfahren (Fragebogen Davis Nutzbarkeit)
A9	Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren höhere Nützlichkeit des HPiL Testverfahrens für den Systemintegrator und Prüfer aufweisen.	• Befragung Nützlichkeit HPiL Testverfahren im Vergleich zur MMS-und Mechatronik Testverfahren (Fragebogen Davis Nützlichkeit)
A10	Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren vergleichbare Beanspruchung der Rollen Systemintegrator und Prüfer aufweisen	• Befragung Beanspruchungshöhe HPiL Testverfahren im Vergleich zum MMS-und Mechatronik Testverfahren (Fragebogen NASA TLX)
A11	Der Fahrsimulator im HPiL Test soll flexibler einsetzbar sein als Fahrsimulatoren des Stands der Technik.	• Analyse: Ist der Testumfang skalierbar? • Beobachtung & Zeitmessung: Schneller Umbau verschiedener MMS und Mechatronik Varianten

Nr.	Anforderung	Messmethode (Messwerkzeug)
A12	Der Aufbau der Hardware des hybriden FAS Prototyps soll weniger als 1h dauern.	• Zeitmessung
A13	Der Aufbau der Software des hybriden FAS Prototyps soll weniger als 0,5h dauern.	• Zeitmessung
A14	Durch Einsatz des HPiL Testverfahrens Tests müssen Erkenntnisse in gegenüber bestehenden Testverfahren höherer Qualität oder größerem Umfang erlangt werden können.	• Test der Beherrschbarkeit des BCAS im HPiL Test im Vergleich zur MMS-und Mechatronik Testverfahren • Zeitmessung: Vergleich des HPiL Tests zur MMS- und Mechatronik Testverfahren • Befragung der Angemessenheit und Passgenauigkeit (Fragebögen Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik & MMS“)

Setup der Testumgebungen der ersten Evaluationsstudie

Wie in Kapitel 7.1.4 beschrieben, ist der Functional Drive Simulator im Digital Cube Test Center (DCTC) des Fachgebietes Industrielle Informationstechnik der TU Berlin integriert. **Abbildung 121** zeigt das Layout des DCTC und verortet den FDS Fahrsimulator sowie das Messequipment. Dazu werden Operator Plätze dargestellt: Zugriffspunkte, von denen der jeweilige Prüfer das HPBench Operator-Panel während des Tests bedienen kann. Die an der Evaluation beteiligten Rollen sind entsprechend der Vorgaben aus Kapitel 6.3 an Ihrem jeweiligen Handlungsort dargestellt.

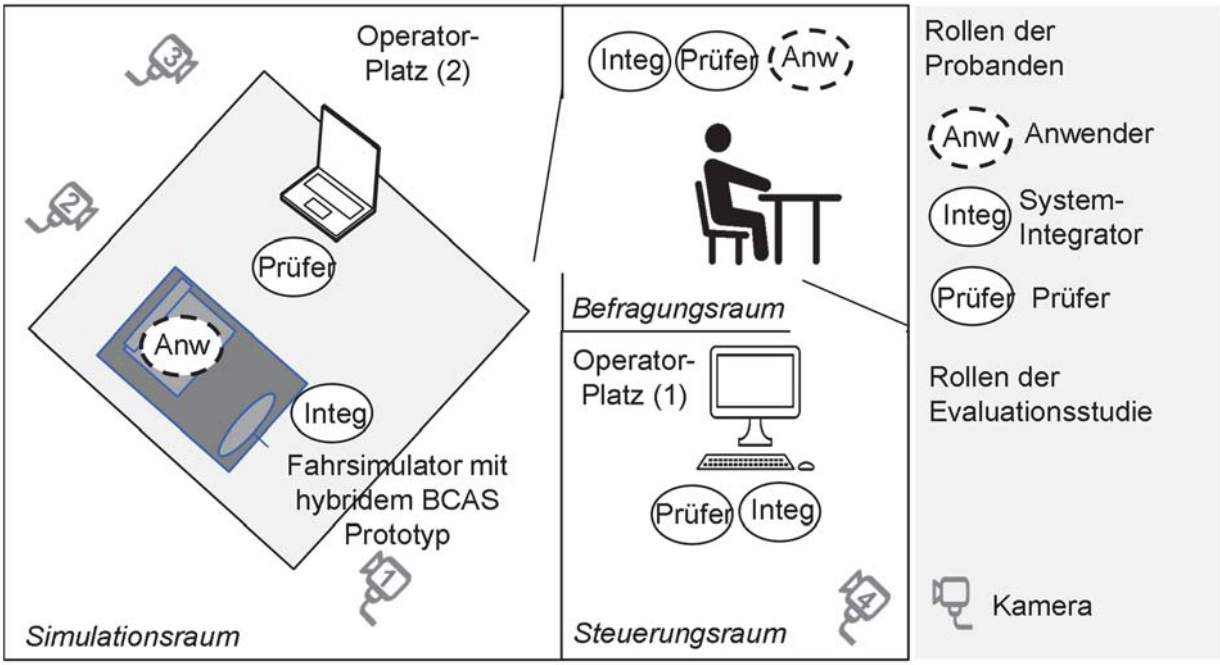


Abbildung 121: Layout des Digital Cube Test Centers für die Evaluation

Im **Simulationsraum,** in dem der Functional Drive Simulator in der 4-Seiten Visualisierung eingebunden ist, werden die hybriden BCAS Prototypen aufgebaut und die KS und HPiL Tests durchgeführt. Im Rahmen des Prozessschrittes Aufbau-Spezifikation erstellt der Systemintegrator den hybriden FAS Prototyp und integriert diesen in den

Fahrsimulator. Der Anwender sitzt während des Prozessschrittes Testdurchführung im FDS Fahrsimulator und interagiert mit den Anzeigen und Bedienelementen des BCAS. Der Prüfer steuert den Test und stellt dem Anwender gegebenenfalls Aufgaben, die dieser für einen Nachweis der Beherrschbarkeit erfüllen muss. Am Operator-Platz (2) kann der Prüfer die Parameter des MMS über das HPBench Operator-Panel verändern. Zusätzlich werden Kameras und Mikrofone zur Aufnahme der Anwender eingesetzt. Der **Steuerungsraum** wird im MiL und HPiL Test verwendet. Der Systemintegrator integriert die Prototypen des mechatronischen Regelsystems für den MiL und HPiL Test am Operator-Platz (1). Während des Prozessschrittes Testdurchführung steuert der Prüfer die Fahrsimulation sowie die Simulation der Verhaltensmodelle am Operator-Platz (1) und ändert bei Bedarf Parameter über das HPBench Operator-Panel. Während der Testdurchführung werden Fahrdaten, Sensordaten sowie Signale der CASE-Tools zur Bewertung der Beherrschbarkeit des BCAS aufgenommen. Im Prozessschritt Testaufnahme füllt der jeweilige Anwender im **Befragungsraum** die Fragebögen aus und gibt so eine qualitative Bewertung der Beherrschbarkeit des BCAS ab. Über die Kameras und Screencasts der zwei Operator-Plätze werden die Handlungen der Prüfer und Systemintegratoren während des Tests aufgenommen. Nach Abschluss der Beherrschbarkeits-Testreihen füllen die Prüfer und Systemintegratoren im Befragungsraum die Fragebögen aus und bewerten so die Nützlichkeit und Nutzbarkeit des jeweiligen Tests. Dazu bewerten die Systemintegratoren die Anwendbarkeit der bereitgestellten HPBench Werkzeuge.

Das Setup für die Testdurchführung des **Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests** ist entsprechend der Ausführungen aus Kapitel 5 aufgebaut und in **Abbildung 122** dargestellt.

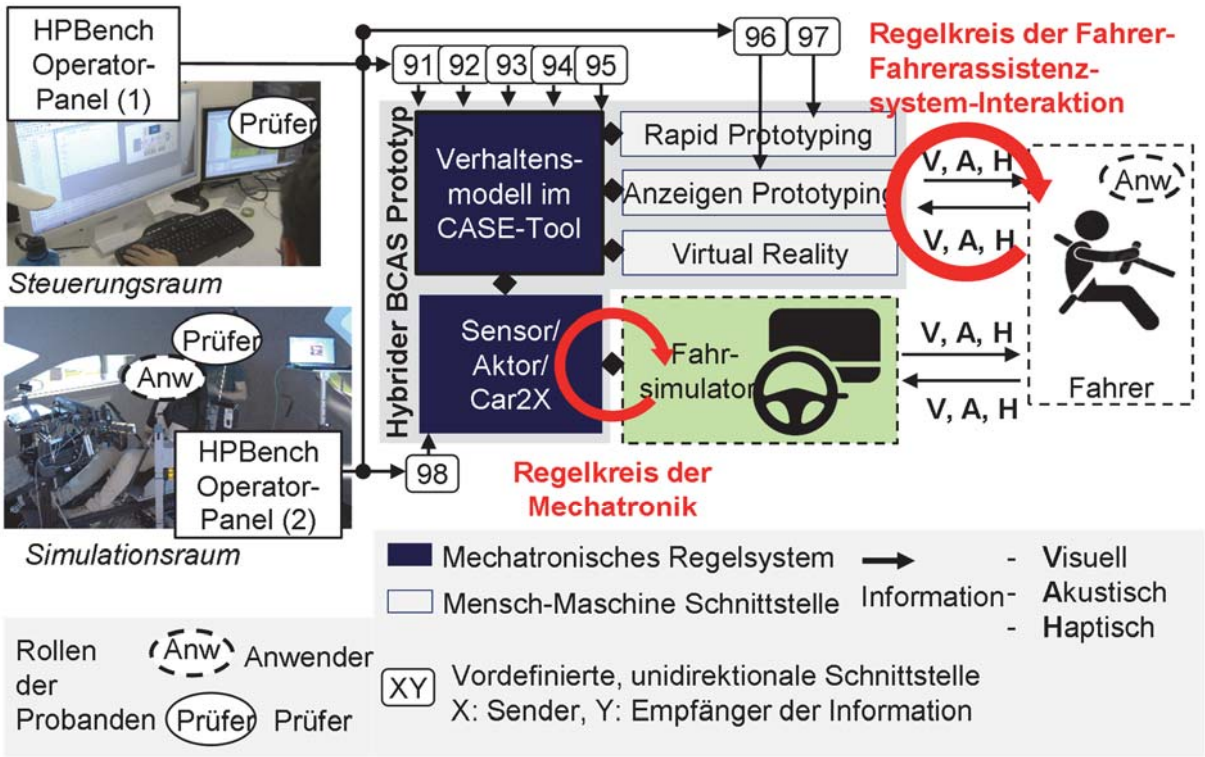


Abbildung 122: Setup und Rollen zur Testdurchführung des HPiL Tests

Der linke Teil der Abbildung zeigt den Fahrsimulator mit integriertem hybridem BCAS Prototyp sowie den Steuerungsraum, von dem aus der Test durch einen Prüfer gesteuert wird und Parameter über das HPBench Operator Panel parametrisiert werden

können. Der Anwender fährt den virtuellen PKW und interagiert mit dem BCAS. Ein weiterer Prüfer kann im Simulationsraum neben dem Fahrsimulator agieren und vom dortigen Operator-Platz (2) auf das HPBench Operator Panel zugreifen. Der Hybride BCAS Prototyp, dargestellt über die in Abbildung 86 eingeführte Darstellung, beinhaltet das vollständige BCAS. Dieses besteht aus dem mechatronischen Regelsystem und der Mensch-Maschine Schnittstelle, die in den zwei Regelkreisen der Fahrer-FAS-Interaktion mit dem Fahrer, dem virtuellen PKW und der Fahrumgebung interagieren. Über die vordefinierten Schnittstellen 91 bis 98 können die Verhaltensmodelle im CASE-Tool Dymola, die digitalen Anzeigeinhalte im AP-Tool Processing sowie die Sensoren und Aktoren in dSpace über das Operator Panel parametriert werden.

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.3 werden im **Model-in-the-Loop (MiL) Test** Verhaltensmodelle im Regelkreis der Mechatronik mit der virtuellen Fahrumgebung, eines virtuellen Fahrzeugs und eines virtuellen Fahrers durch einen Prüfer getestet. Der Test findet komplett auf Basis virtueller Modelle, implementiert auf einem Entwicklungsrechner, statt. **Abbildung 123** zeigt das eingesetzte Testsetup.

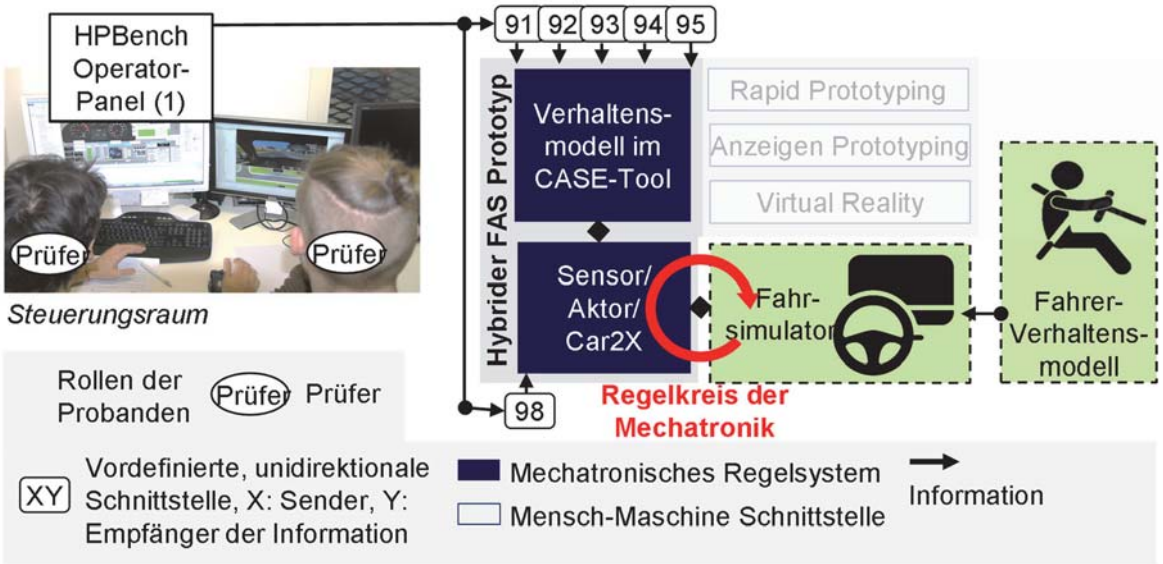


Abbildung 123: Setup und Rollen zur Testdurchführung des MiL Tests

Bei entwicklungsbegleitendem Einsatz des MiL Tests wird das FAS während der Testumsetzung solange iterativ modifiziert, bis es die Erfüllungskriterien für einen „sicheren Betrieb“ erfüllt. Im Falle des BCAS damit bis zu dem Zeitpunkt, bei dem das mit FAS ausgerüstete Fahrzeug in keinem Szenario mit dem Fahrrad kollidiert (Weitzel 2013, S. 96). Die **Wiederverwendung von Systemelementen des HPiL Tests** unterstützt den Aufbau, den Test sowie das iterative Entwicklungsvorgehen. Es werden dieselben funktionalen Prototypen des mechatronischen Regelsystems, erstellt in Dymola, die in dSpace ASM modellierten Sensor- und Aktormodelle und das HPBench Operator Panel eingesetzt. Das Operator Panel ermöglicht die Online-Parametrierung der Prototypen über vordefinierte Schnittstellen 91 bis 95 und 98 während des Tests. Der Functional Drive Simulator wird im MiL Test nicht eingesetzt, nur dessen dSpace ASM Simulationssystem zur Abbildung der virtuellen Fahrumgebung, des virtuellen PKWs und des virtuellen Fahrers. Der virtuelle Fahrer wird durch das einfachste der in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Fahrerverhaltensmodell dargestellt: **Dem gesteuerten Fahrermodell**. Ein solches Modell fährt eine vorgegebene Strecke ab und interagiert nicht mit der Umgebung. Es findet keine selbstständige Reaktion des virtuellen Fahrers auf kritische Situationen mit virtuellen Fahrradfahrern statt, die Kollision muss durch

den Bremseingriff des BCAS verhindert werden. Das gesteuerte Fahrermodell ist jedoch ausreichend für die Prüfung der Beherrschbarkeit hinsichtlich der Fähigkeit des BCAS, Unfälle durch Eingriff in die Fahrzeugsteuerung zu vermeiden und so den PKW in allen Situationen vor der Kollision mit dem Fahrrad abzubremsen.

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.4 werden im **Testverfahren Mensch-Maschine Konzeptsimulation (KS Test)** mit Rapid Prototyping Methoden erzeugte Anzeige- und Bedienelement-Prototypen in einer ergonomisch dem PKW-Cockpit vergleichbaren Sitzkiste mit Probanden getestet. Auch der KS Test kann durch Wiederverwendung von Systemelementen aus dem HPiL Test unterstützt werden: So werden die mit Hilfe des HPBench Baukastens erstellten Anzeigen und Bedienelemente übernommen. Wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben, bildet der Functional Drive Simulator die Ergonomie des PKW-Cockpits in einem für den Test ausreichenden Abbildungsumfang ab. Daher werden die Systemelemente des Cockpits (CP) sowie des haptischen Systems (HAP) des FDS als ergonomisch dem PKW vergleichbaren Sitzkiste eingesetzt. Für den Wizard-of-Oz Test, also der Simulation einer Systemfunktion durch Bedieneingaben des Prüfers, ist zusätzlich eine Steuermöglichkeit erforderlich (vergleiche Kapitel 3.3.4). Das Operator Panel bietet diese Steuermöglichkeit: Zum einen durch Ansteuerung des Arduino-Mikrocontrollers über die vordefinierte Schnittstelle 97. Über diese Ansteuerung können Ausgaben der Rapid Prototyping Anzeigen, beispielsweise Farbe von LEDs oder Vibrationsintensität des Vibrationsmotors gesteuert werden. Zum anderen durch Parameteränderung der in Processing erstellten, digitalen Anzeigeinhalte über die vordefinierte Schnittstelle 96. Diese Ansteuerung ermöglicht beispielsweise den Aufruf verschiedener Bild-, Video oder Tonsequenzen oder die Simulation einer Menüführung im Touchscreen. **Abbildung 124** zeigt das Testsetup zur Testdurchführung des KS Tests.

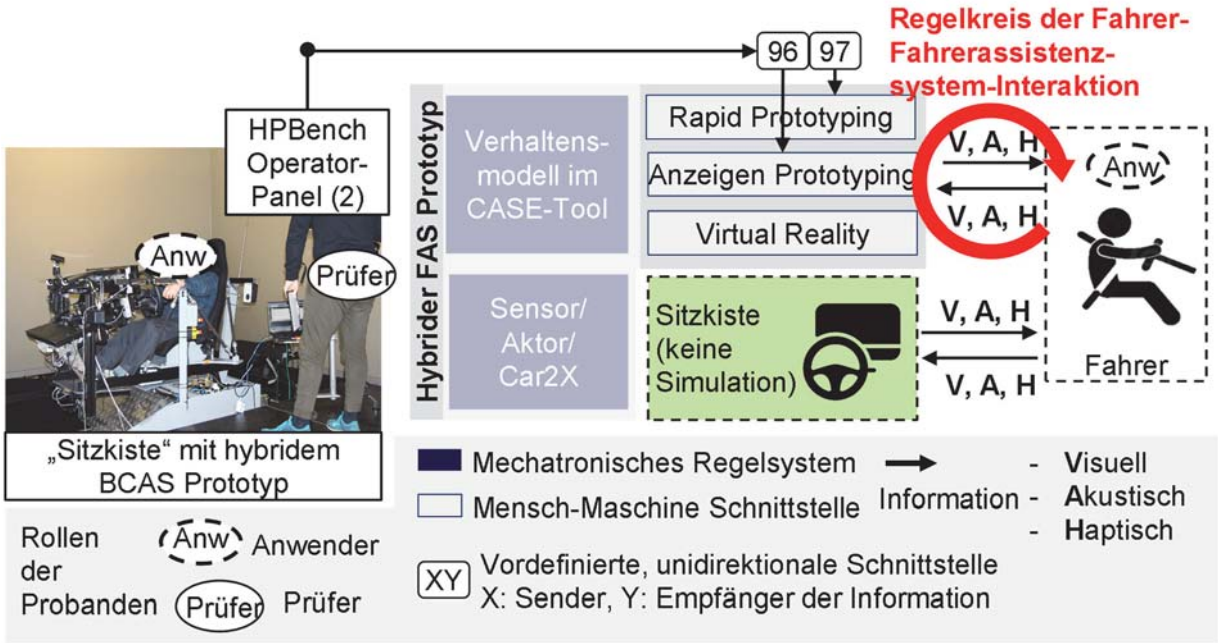


Abbildung 124: Testsetup zur Testdurchführung des KS Tests

Das Testdesign ermöglicht somit die Durchführung der ersten Evaluationsstudie: In dieser wird der hybride BCAS Prototyp durch die Probanden aus den BCAS Entwicklungsteams aufgebaut und mit den drei Testverfahren hinsichtlich Beherrschbarkeit getestet.

7.3.2 Versuchsdurchführung der 1. Evaluationsstudie

Zum Test der Beherrschbarkeit folgen die drei Entwicklungsteams dem zweistufigen Vorgehen des HPiL Prozesses. Zuerst wird der hybride FAS Prototyp durch den Systemintegrator unter Anwendung der HPBench Werkzeuge in den Prozessschritten Aufbau Planung und Aufbau Spezifikation aufgebaut und in den Fahrsimulator integriert. Anschließend erfolgen der Beherrschbarkeits-Test und dessen Auswertung in den Prozessschritten Testdurchführung, Testaufnahme sowie Testauswertung und Abschluss durch die Prüfer und Anwender. Die Mitglieder der Projektteams nehmen die jeweilige Rolle des Systemintegrators, Prüfers und Anwenders im KS, MiL und im HPiL Test ein.

Prozessschritte Aufbau Planung und Aufbau Spezifikation

Wie in Kapitel 3.2.3 ausgeführt, sollen die **Testszenarien** aus den Unfallstatistiken der Unfallursachen von PKW gegenüber Fahrrädern abgeleitet werden. Bei der Bewertung von aktiven Sicherheitssystemen wird gern auf die Einzelfallanalyse zurückgegriffen, in der aus Betrachtungen des realen Unfallgeschehens heraus Szenarien definiert werden, die repräsentativ für bestimmte Unfalltypen sind (Domsch und Negele 2008, S. 5). Die charakteristischen Szenarien lassen sich dann auf die Wirksamkeit eines Systems der aktiven Sicherheit untersuchen. Im EU Projekt „Safety for Pedestrians and Cyclists PROSPECT“ wurden insgesamt 30 relevante Unfalltypen identifiziert und aus diesen insgesamt 9 verschiedene Testszenarien für eine PKW-Fahrrad Interaktion abgeleitet (Mingkamp et al. 2017, S. 109). Diese Testszenarien, die sich hinsichtlich Relativposition und Fahrtrichtung des PKWs und des Fahrrads unterscheiden, decken insgesamt knapp 80% aller erfassten Unfälle mit Verletzungs- und Todesfolge im Deutschen Straßenverkehr ab. Die Testszenarien lassen sich in Abbiege-, Kreuzungs-, Längs- und Türöffnungsszenarien zusammen fassen (Mingkamp et al. 2017, S. 109). Letztere sind nicht relevant für die Beherrschbarkeit des PKWs, denn sie setzen ein stehendes Fahrzeug voraus. Dazu können von der Funktionsweise des BCAS – es ist eine Abbiegeabsicht durch den Fahrer zu bekunden, dieser muss den Blinker betätigen – nur Testszenarien bedient werden, in denen der PKW abbiegt. Für die Beherrschbarkeit des PKW-FAS ist die Kreuzungsrichtung des Fahrrads wenig relevant.

Für die Evaluationsstudie wurden die vier in **Abbildung 125** dargestellten Testszenarien abgeleitet. In diesen biegt der PKW links wie rechts ab, das Fahrrad fährt sowohl längs als auch quer zu dessen Fahrtrichtung. In den Testszenarien können die Unfallursachen „Abbiegen“, „Nichtgewähren der Vorfahrt“, „Fehler beim Einfahren in den Fließverkehr“, „ungenügender Sicherheitsabstand“ sowie „Nichtbeachten der Verkehrsreglung“ abgebildet werden. Es können damit alle in Kapitel 7.1.1 spezifizierten Verkehrssituationen abgebildet werden, in denen ein fahrender PKW involviert ist.

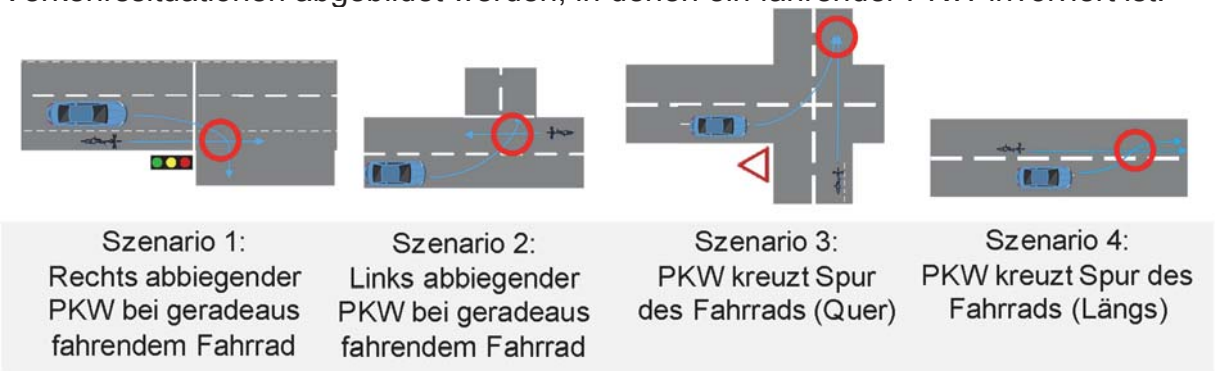


Abbildung 125: Testszenarien der ersten Evaluationsstudie

Wie beschrieben wird eine gesetzliche Verpflichtung für Abbiegeassistenzsysteme in Europa für PKW ab 2026 erwartet. Obwohl heute noch keine Vorgaben für Testmethoden von Abbiegeassistenten für PKW bestehen, bestehen bereits erste Entwürfe für LKW-basierte Abbiegeassistenten. So besteht ein Vorschlag der Vereinten Nationen, der detaillierte Spezifikationen für Testszenarien enthält (Seiniger et al. 2017, S. 327–328). Diese Spezifikationen enthalten beispielsweise Angaben zur Fahrgeschwindigkeit von Fahrrad und LKW, zu Kurvenradien, Abständen sowie den Anprallstellen des Fahrrads an den LKW. Auf Basis dieser Spezifikationen werden die detaillierten Straßenverläufe modelliert sowie das Verhalten der gesteuerten Verkehrsteilnehmer parametriert.

Mit Hilfe des HPBench Baukastens erstellen die Systemintegratoren der drei Projektteams anschließend Ihren jeweiligen hybriden BCAS Prototypen. Diese sind in **Abbildung 126** sowie **Abbildung 127** dargestellt. Die jeweils links in der Abbildung dargestellte Tabelle zeigt die in Tabelle 19 beschriebenen Lösungselemente, die die Projektteams für Ihre Anzeigen und Bedienelemente gewählt haben. Der rechte Teil der Abbildung zeigt den zum Test aufgebauten hybriden BCAS Prototyp. Im oberen Teil der Abbildung ist der MMS Prototyp gezeigt. Dieser nutzt die Elemente des HPBench Baukastens für die Abbildung der gewählten Lösungselemente mit prototypischer Anzeige- und Bedienhardware und -software. Dieser Teil des hybriden BCAS Prototyps wird im KS Test eingesetzt. Der untere Teil der Abbildung zeigt den Prototypen des mechatronischen Regelsystems. Dieser Teil des hybriden BCAS Prototyps wird im MiL Test eingesetzt. Der aus beiden Teilen gekoppelte hybride BCAS Prototyp wird im HPiL Test eingesetzt.

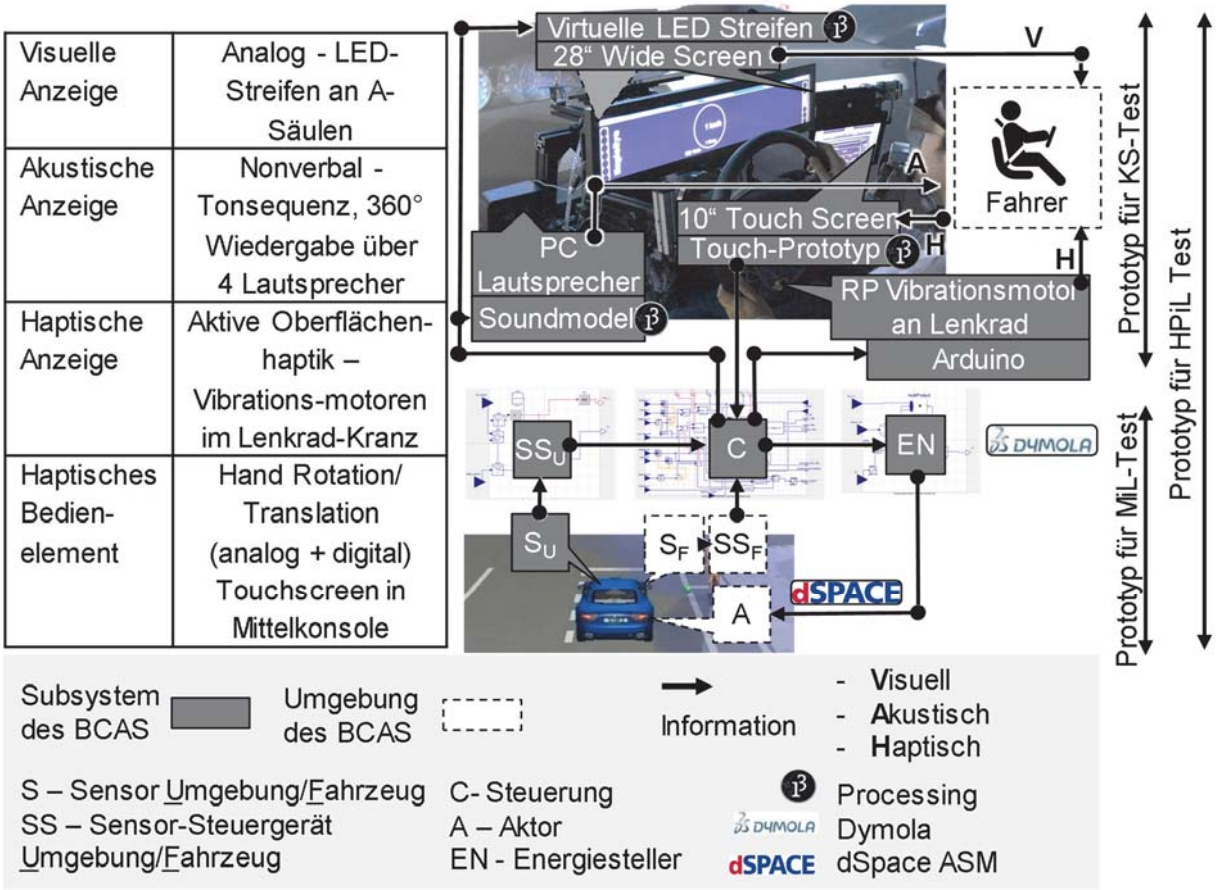
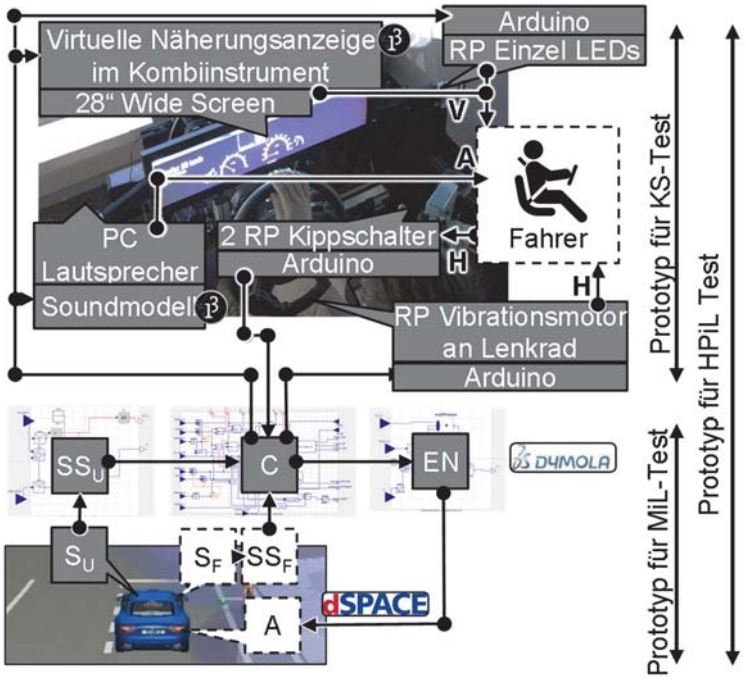
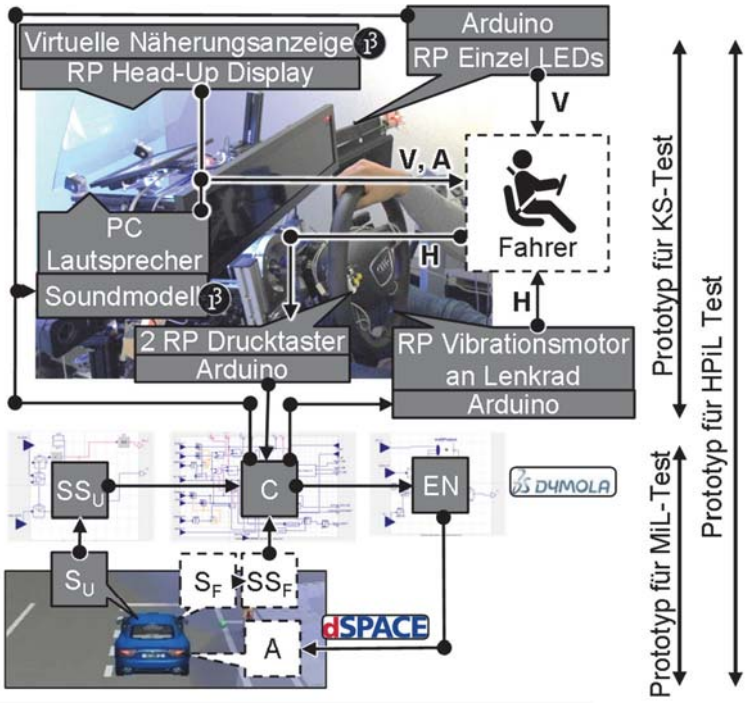


Abbildung 126: MMS Lösungselemente und Systemarchitektur des hybriden BCAS Prototyps des Projektteams 1

Visuelle Anzeige	Digitale LEDs an den Außenspiegeln Bildhaft situations-analoge Näherungs-anzeige im Kombi-Instrument
Akustische Anzeige	Nonverbal - Tonsequenz, 360° Wiedergabe über 4 Lautsprecher
Haptische Anzeige	Aktive Oberflächenhaptik - Vibrationsmotoren im Lenkrad-Kranz
Haptisches Bedien-element	Digitale Translations-bewegung von Hand/Arm Kippschalter in Mittelkonsole



Visuelle Anzeige	Digitale LEDs an den Außenspiegeln Bildhaft situations-analoge Näherungs-anzeige im Head Up Display (HUD)
Akustische Anzeige	Nonverbal - Tonsequenz, Stereo-Wiedergabe über 2 Front-Lautsprecher
Haptische Anzeige	Aktive Oberflächenhaptik - Vibrationsmotoren im Lenkrad-Kranz
Haptisches Bedien-element	Digitale Translations-bewegung von Hand/Arm, Druck-taster am Lenkrad



Subsystem des BCAS — Umgebung des BCAS — Information: - Visuell - Akustisch - Haptisch

S – Sensor Umgebung/Fahrzeug
SS – Sensor-Steuergerät Umgebung/Fahrzeug
C- Steuerung
A – Aktor
EN - Energiesteller
Processing
DYMOLA Dymola
dSPACE dSpace ASM

Abbildung 127: MMS Lösungselemente und Systemarchitektur des hybriden BCAS Prototyps der Projektteams 2 (oben) und Projektteams 3 (unten)

Prozessschritte Testdurchführung, -aufnahme, -auswertung und Abschluss

Nach erfolgtem Aufbau und Spezifikation des hybriden BCAS Prototyps erfolgt dessen Test im KS Test, MiL Test und im HPiL Test. Wie in Kapitel 7.3.1 beschrieben, setzen sich die drei Projektteams aus zwei Fachexpertengruppen-zusammen: Aus Mechatronik-Entwicklern und aus MMS Entwicklern. Im Test der Beherrschbarkeit des hybriden BCAS Prototyps durch dessen Entwicklungsteams wird in dem in **Tabelle 31** gezeigten, dreistufigen Vorgehen auf Beherrschbarkeit getestet.

Tabelle 31: Dreistufiges Testvorgehen der Entwicklungsteams in der ersten Evaluationsstudie

Schritt 1	Zuerst werden die MiL Tests zur Prüfung der 5 Beherrschbarkeitskriterien der Gruppe 1 durch die Mechatronik-Entwickler durchgeführt. Parallel testen die MMS Entwickler die 7 Beherrschbarkeitskriterien der Gruppe 2 im KS Test.
Schritt 2	Es folgt der HPiL Test (1) zur Prüfung derselben 12 Beherrschbarkeitskriterien der Gruppen 1 und 2 durch das zusammengesetzte Projektteam.
Schritt 3	Abschließend folgt der zweite HPiL Test (2) zur Prüfung der 14 Beherrschbarkeitskriterien der Gruppe 3 durch das zusammengesetzte Projektteam.

Zum Nachweis der Beherrschbarkeit werden Testdaten computerbasiert aufgenommen und die Handlungen des mit dem BCAS interagierenden Anwenders mit Kameras und Protokollen während des Tests aufgezeichnet. Dazu werden Prüflisten und Fragebogen zur testbegleitenden und nachträglichen Aufnahme subjektiver Einschätzungen des Anwenders eingesetzt (nach Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017).

Schritt 1 und 2: KS, MiL und HPiL (1) Test

In Schritt 1 und Schritt 2 werden die KS, MiL und HPiL (1) Test zum Vergleich der 12 Beherrschbarkeitskriterien der Gruppen 1 und 2 durchgeführt. **Tabelle 32** ordnet den Beherrschbarkeits-Kriterien jeweils durch die Projektteams eingesetzten Test-Ziele, Testmethoden und Werkzeuge zu. Die Nummerierung der Kriterien entspricht den Gruppen aus Tabelle 27, Tabelle 28 und Tabelle 29.

Tabelle 32: Zuordnung Testmethoden, Testziele und Werkzeuge im Test des hybriden BCAS Prototyps im Beherrschbarkeits-Test durch dessen Entwicklungsteams (Gruppe 1 und 2)

Beherrschbarkeits-Kriterium	Test-Ziel	Test-methode	Werkzeug	MiL	KS	HPiL
14, 15	Nachweis der anforderungskonformen Funktion des BCAS: Ein-/Ausschalten, Betriebsmodi, Übersteuern	Prüfung der korrekten Reaktion auf Eingaben	Plot CASE-Tool, Fahrdaten	x		x

Beherrsch-barkeits-Kriterium	Test-Ziel	Test-methode	Werkzeug	MiL	KS	HPiL
3,7, 16	Nachweis der anforderungs-konformen Funktion des BCAS: Rechtzeitige Warnung, Bremse	Prüfung der Systemfunk-tion im Sze-nario	Plot CASE-Tool, Fahrdaten	x		x
1, 4, 5, 8, 9, 10, 11	Nachweis Verständlichkeit und Nutzbarkeit des BCAS	Wizard-of-Oz Interaktions-Prüfung	Testbericht, Beobach-tung, Video, Screencast	x		
1, 4, 5, 8, 9, 10, 11	Nachweis der Verständlichkeit & Nutzbarkeit des BCAS durch den Fahrer	Interaktions-Prüfung im Szenario	Plot CASE-Tool, Fahrdaten, Testbericht, Beobach-tung, Video, Screencast			x
8, 9, 10, 11	Nachweis Verständlichkeit	Nachträgli-che Befragung	Fragebogen	x		x

Die Ergebnisse, die im KS, MiL und HPiL (1) Test durch die Projektteams erzielt wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen: Im **MiL Test** wie auch im **HPiL (1) Test** des BCAS im konnte die Beherrschbarkeit für 4 der 5 Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 1 durch alle drei Projektteams nachgewiesen werden. Beherrschbarkeits-Kriterium 16 konnte nicht vollständig erfüllt werden: In Testszenario 3 – Links abbiegendes Auto bei geradeaus fahrendem Fahrrad – konnte Projektteam 3 im **MiL Test** keine Unfallfreiheit nachweisen. Im **HPiL Test** war dieses Beherrschbarkeits-Kriteriums noch kritischer: Hier konnte nur Projektteam 1 in allen vier Testszenario eine Unfallfreiheit nachweisen. Projektteam 3 konnte diese nur für 2 der 4 Testszenarien nachweisen, Projektteam 2 dagegen in keinem der 4 Testszenarien.

Im **KS Test** konnte die Beherrschbarkeit des BCAS für alle sieben Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 2 nachgewiesen werden. Im **HPiL Test** konnte das Beherrschbarkeits-Kriterium 4 (Das Bedienelement zum Ein-/Ausschalten ist für den Fahrer nutzbar) durch Projektteam 1 nicht beurteilt werden, da der Touchscreen während der Fahrt nicht erreichbar war. Die in Kapitel 7.2.1 beschriebene eingeschränkte Abbildungsqualität der PKW-Ergonomie durch den Functional Drive Simulator verhindert in diesem Fall den Test.

Tabelle 33 fasst die Bewertung durch die Projektteams zusammen. Die Projektteams unterscheiden in Ihrer Bewertung zwischen erfolgreichem Nachweis (grün), nicht erfolgreichem Nachweis (rot) sowie nicht möglicher Beurteilung oder nicht möglichem Test (weiß). Das Beherrschbarkeits-Kriterium 16 „System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash“ wird jeweils gesondert für jedes der vier Testszenarien in der durch **Abbildung 125** beschrieben Reihenfolge aufgeführt.

Tabelle 33: Nachweis der Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppen 1 und 2 durch die Projektteams (nach Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017)

	Nr.		Beherrschbarkeits-Kriterium	MiL			KS			HPiL (1)		
			Team Nr.	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
erfolgreicher Nachweis			nicht erfolgreicher Nachweis				Nicht beurteilbar/testbar					
MiL & HPiL (1)	F.W.*	3	Die Warnungen werden rechtzeitig entsprechend der Kritikalität der Verkehrssituation angezeigt.									
		7	Die Warnungen berücksichtigen verschiedene Verkehrssituationen.									
	Fahrer-Entscheidung	14	Das System kann ein- und ausgeschaltet werden.									
		15	Das System kann verschiedene Betriebsmodi einnehmen.									
		16	Das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash (Szenario 1)									
			Das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash (Szenario 2)									
			Das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash (Szenario 3)									
			Das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash (Szenario 4)									
KS & HPiL (1)	Fahrer-Wahrnehmung	1	Der Fahrer hat ein klares Verständnis der System-Modi und Status									
		4	Das Bedienelement zum Ein-/Ausschalten ist für den Fahrer nutzbar.									
		5	Es ist dem Fahrer möglich, die verschiedenen Betriebsmodi des Systems zu unterscheiden.									
		8	Die Warnungen des Systems sind für den Fahrer verständlich und eindeutig.									
		9	Die Warnungen sind mit anderen Warnungen/Informationen im Cockpit vereinbar.									
		10	Der Fahrer ist ausreichend über Status und Funktion des Systems informiert.									
		11	Die Position der Anzeigen und Bedienelemente passen in den Kontext bestehender MMS.									

*F. W.: Fahrer-Wahrnehmung

Im MiL und HPiL (1) Tests zeigte sich Beherrschbarkeits-Kriterium 16 „das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash“ als das im Vergleich kritischste Kriterium. Zur Verdeutlichung beinhaltet **Anhang E** eine ausführliche Beschreibung zweier exemplarischer Fälle. Beiden Fällen liegen die Messdaten des Projektteams 3 zugrunde. Im ersten Fall, dem Testszenario 3, konnte das Beherrschbarkeits-Kriterium 16 nachgewiesen werden. Im zweiten Fall, Testszenario 2, konnte das Beherrschbarkeits-Kriterium 16 dagegen nicht nachgewiesen werden.

Im Anschluss an die Tests analysierten die Projektteams die Fälle, in denen kein Nachweis möglich war (Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017). Projektteam 2 verortete den nicht möglichen Nachweis des Beherrschbarkeits-Kriteriums 16 bei Fehlern im BCAS. So bremste das BCAS im HPiL Test zu spät im Szenario 2 (links abbiegen) sowie Szenario 3 (Quer kreuzen). Weiterhin gab Projektteam 2 an, das die Bremse im Szenario 1 (rechts abbiegen) und Szenario 4 (längs kreuzen) des HPiL Test zu früh beziehungsweise fehlerhaft auslöst. Es wurde insbesondere die Kritikalität der Bremsung in Szenario 4 hervorgehoben: Der PKW verzögerte stark auf seiner eigenen Spur bei parallel fahrendem Fahrrad, es kam auch ohne Lenkbewegung zu (Fehl-) Auslösungen des BCAS. Projektteam 3 verortete den nicht möglichen Nachweis des Beherrschbarkeits-Kriteriums 16 bei Fehlern im BCAS, aber auch bei dem unrealistischen Setup des Testszenarios sowie bei Fehlern des Anwenders. Als Fehler des BCAS wurde das zu späte Bremsen in Szenario 1 (rechts abbiegen) sowie Szenario 2 (links abbiegen) angegeben. Szenario 2 ist besonders kritisch für das BCAS des Projektteams 3, es kommt auch im MiL Test zu einer Nichterfüllung. Die zu späte Bremsung des BCAS in Szenario 2 (links abbiegen) wurde mit einem unrealistisch modellierten Fahrrad erklärt: So ist dessen Geschwindigkeit ist für die Simulation zeitweilig an die Fahrzeuggeschwindigkeit gekoppelt, eine Beschleunigungsänderung des PKWs zieht eine Beschleunigungsänderung des Fahrrads nach sich. Nach Analyse des Projektteams sollte das BCAS bei einem realistisch modellierten Fahrrad vor der Kollision bremsen. Der bei Projektteam 3 nicht mögliche Nachweis in den Testszenarien 3 (quer kreuzen) und 4 (längs kreuzen) wurde auf das schlechte Timing des Anwenders zurückgeführt. Dieses ist, wie bereits in der initialen Analyse in Kapitel 7.3.1 beschrieben, möglicherweise auf das die fehlende Fahrpraxis im Rechtsverkehr des Anwenders zurückzuführen.

Schritt 3: HPiL (2) Test

Im Rahmen der HPiL (2) Tests wurden die 14 weiteren Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 3 getestet. **Tabelle 34** zeigt die Ergebnisse, die die Projektteams erzielen konnten. In der Bewertung wird wieder zwischen erfolgreichem Nachweis (grün), nicht erfolgreichem Nachweis (rot) sowie nicht möglicher Beurteilung oder Test (weiß) unterschieden.

Tabelle 34: Nachweis der Beherrschbarkeits-Kriterien der Gruppe 3 durch die Projektteams (nach Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017).

	Nr.		Beherrschbarkeits-Kriterium	HPiL (2)		
			Team Nr.	**1**	**2**	**3**
erfolgreicher Nachweis	nicht erfolgreicher Nachweis		Nicht beurteilbar/testbar			
HPiL (2)	**F.-W***	2	Die Systemreaktionen sind konform mit der Erwartungshaltung des Fahrers: Sie korrespondieren mit vorheriger Erfahrungen und Erwartungen aus der Nutzung ähnlicher Systeme.			
		6	Die Warnungen sind der Kritikalität der Verkehrssituation angemessen.			
		12	Die Warnungen sind in typischen relevanten Verkehrssituationen wahrnehmbar.			
		13	Der Betrieb oder die Überwachung des Systems kann ohne eine große Änderung der Aufmerksamkeit des Fahrers in dessen Fahraufgabe durchgeführt werden.			

		Nr.	Beherrschbarkeits-Kriterium	HPiL (2)		
			Team Nr.	1	2	3
erfolgreicher Nachweis			nicht erfolgreicher Nachweis	Nicht beurteilbar/testbar		
	F.-E.**	17	Es ist möglich, das System jederzeit zu übersteuern.			
		18	Es ist dem Fahrer möglich, das System jederzeit ein- und auszuschalten.			
		19	Die Systemgrenzen sind für den Fahrer klar verständlich.			
		20	Der Fahrer versteht das System-Feedback auf seine Bedieneingaben und Handlungen.			
HPiL (2)	Fahrer-Reaktion	21	Die Warnungen sind der Kritikalität der Gefahr angemessen.			
		22	Alle Mensch-Maschine Interaktionen können durch den Fahrer unterbrochen werden.			
		23	Alle Bedieneingaben können jederzeit rückgängig gemacht, korrigiert oder verändert werden.			
		24	Der Fahrer kann das System nach unbeabsichtigter Aktivierung oder Deaktivierung beherrschen			
		25	Der Fahrer kann eine Situation beherrschen, bei der das System nicht verfügbar ist, weil die Situation außerhalb seiner Systemgrenzen ist.			
		26	Fahrerhandlungen zum übersteuern des Systems sind intuitiv.			
*F. W.: Fahrer-Wahrnehmung, **F.E.: Fahrer-Entscheidung						

Die Ergebnisse, die durch die Projektteams erzielt wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen: 6 der 14 Beherrschbarkeits-Kriterien konnten vollständig durch die Projektteams getestet oder beurteilt werden. Sowie zwei weitere Beherrschbarkeits-Kriterien teilweise getestet oder beurteilt. Dabei war der Nachweis der Beherrschbarkeit in 4 Fällen nicht möglich.

Im Anschluss an die Tests analysierten die Projektteams die Fälle, in denen kein Nachweis möglich war (Grohmann et al. 2017; Croker et al. 2017; Engel et al. 2017). Obwohl die Funktionalität im Bedienkonzept vorgesehen war, war es dem Anwender von Projektteam 1 und 2 nicht möglich, das BCAS durch Bedienung des Touchscreens oder des Schalters in der Mittelkonsole zu übersteuern. Dagegen war es dem Anwender von Projektteam 3 möglich, das BCAS jederzeit über die Taster am Lenkrad zu übersteuern. Die Fehlerquelle für den nicht möglichen Nachweis liegt damit jeweils im unzureichenden Bedienkonzept der Projektteams 1 und 2. In einer nachträglichen Befragung beurteilte der Anwender des Projektteams 2 die dazugehörigen Bedienhandlungen als nicht intuitiv, womit in diesem Fall eine Bewertung von Beherrschbarkeitskriterium 26 erfolgte.

In einer nachträglichen Befragung des Anwenders des Projektteams 3 wurde die Distanzanzeige über das Head Up Display als unzureichend lesbar bewertet. Warnungen waren in typischen relevanten Verkehrssituationen nur akustisch und haptisch, jedoch nicht visuell wahrnehmbar. Als Fehlerquelle wurde das durch den HPBench Baukasten bereitgestellte Head Up Display identifiziert: Dessen Projektor ist nicht lichtstark genug und kann damit nicht geeignet, ein Head Up Display für den PKW in der erforderlichen Qualität abzubilden.

Die durch die Teams gesammelten Ergebnisse und Analysen wurden abschließend im **HPiL Prüfbericht** zusammengefasst.

7.3.3 Auswertung der 1. Evaluationsstudie

Wie in Kapitel 7.3.1 beschrieben, dienen verschiedene Messmethoden und -werkzeuge zur Erfassung und Auswertung der Interaktion zwischen den Probanden, den HPBench Werkzeugen und dem Fahrsimulator während der fünf durchgeführten Prozessschritte des HPiL Prozesses. Zur Evaluation, ob die in Kapitel 7 zusammengefassten Anforderungen (A1) bis (A14) erfüllt sind, wird einem dreistufigen Vorgehen gefolgt:

[1] Analyse der HPiL Prüfberichte und Messdaten der Projektteams.
[2] Analyse der Beobachtungsprotokolle, Zeitnahme Kameraaufzeichnungen und Screencasts.
[3] Nachträgliche Befragung der Probanden mit den Fragebogen „wahrgenommenen Nützlichkeit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“, „NASA TLX Fragebogen“, „Beherrschbarkeits-Testbarkeit MMS“ und „Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik“. Sowie der Analyse der gewonnenen Ergebnisse.

Die folgenden Ausführungen zeigen diese Schritte und beschreiben die Erkenntnisse, die hinsichtlich der Anforderungserfüllung gewonnen werden können. Dabei wird der Bezug zu Tabelle 30, in der die Anforderungen mit den Messmethoden und -werkzeugen verknüpft sind, gezogen und kursiv markiert hervorgehoben.

[1] Analyse der HPiL Prüfberichte und Messdaten der Projektteams.

Es wird im MiL und HPiL Test gezeigt, dass die Verhaltensmodelle des mechatronischen Regelsystems das BCAS **funktional angemessen** und dessen **mechatronische Funktionen passgenau** abbildet *(→ Anforderungen A1, A2).*

Die im MiL Test mit Messdaten aus Fahrsimulation und CASE-Tool prüfbaren Anforderungen an die Beherrschbarkeit, können mit dem HPiL Test in **höherer Qualität geprüft** werden (→ *Anforderung A14*): Die Testergebnisse der Projektteams 2 und 3 zeigen die Unfallvermeidung zwischen PKW und Fahrrad im MiL Test, wohingegen eine Kollision im HPiL Test stattfindet. Wie im Beispiel des HPiL Tests in Szenario 2 (Links abbiegen) exemplarisch gezeigt wurde, führt das nicht-ideale Verhalten des Fahrers an der Systemgrenze des BCAS zum Fehler. Und auch andere Fehlerfälle, wie das starke Verzögern des PKWs auf seiner Spur bei nahezu Parallelfahrt zum Fahrrad, weisen auf im MiL Test nicht identifizierte Fehler der Spezifikation oder des Verhaltensmodells des BCAS hin. Die abschließende Analyse des HPiL Tests durch die Projektteams, in **Anhang E** aufgeführt, stützt diese Annahme. Nach Projektteam 3 kann der MiL Test zu guten Erkenntnissen für einige Anforderungen führen (nach Engel et al. 2017). Aber erst der Test gekoppelter FAS, zusammengesetzt aus mechatronischem Regelsystem und MMS, erlaubt die Erkennung von Fehlern der Beherrschbarkeit. So konnten die im Verhaltensmodell gesetzten Grenzen durch Projektteams 2 erst im HPiL Test als nicht korrekt erkannt werden (Croker et al. 2017). Das System versagt dann, „wenn der Fahrer Verkehrsregeln verletzt“ (Grohmann et al. 2017). Zusammenfassend kann festgehalten werden: **Die Qualität der Testergebnisse steigt durch den Austausch des virtuellen durch einen realen Fahrer** vom MiL zum HPiL Test. Durch dessen nichtprädiktives Verhalten steigen die Anforderungen an das FAS im Test, im Besonderen wenn der Fahrer außerhalb erwarteter Grenzen und Verkehrsregeln agiert.

Wie im HPiL (2) Test gezeigt wird, können **mit dem HPiL Test** im Vergleich zum MiL Test **mehr** Beherrschbarkeits-Kriterien geprüft werden *(→ Anforderung A14*). Dies war nach der Vor-Analyse, die während des Aufbaus des hybriden BCAS Prototyps durch-

geführt wurde, bereits zu erwarten und konnte durch die Prüfung von 6 der 14 Anforderungen im HPiL (2) Test bestätigt werden. Den neu hinzugekommenen Beherrschbarkeits-Kriterien ist gemein, dass eine Bewertung der Beherrschbarkeit durch den Fahrer selbst erfolgen muss, dieser für die Bewertung aber den Kontext des Regelkreises der Mechatronik – also der Reaktion des BCAS auf Inputs von Fahrumgebung und Fahrzeug – benötigt. Aus den Messergebnissen der Projektteams in der Fahrsimulation und den CASE-Tools ist nicht klar erkennbar, ob der Anwender oder das BCAS jeweils die Bremsung auslöst. Damit sind **Beherrschbarkeits-Kriterien, die eine auslegungskonforme Reaktion des Fahrers auf Warnungen testen, nicht prüfbar**. So erfordert beispielsweise die vollständige Prüfung des Beherrschbarkeits-Kriteriums 20 „Der Fahrer versteht das System-Feedback auf seine Bedieneingaben und Handlungen“ eine Differenzierung der Bremsung durch BCAS oder den Anwender. Erst so können Zusammenhänge zwischen Warnung und Fahrer-Reaktion identifiziert werden.

[2] Analyse der Beobachtungsprotokolle, Zeitnahme, Kameraaufzeichnungen und Screencasts.

Durch **Beobachtungen der Probanden** sowie die **Analyse der Videoaufzeichnungen nach dem Test** konnte Folgendes gezeigt werden: Die Prozesse und Methoden der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik **konnten durch die Probanden angewendet** werden (→ *Anforderung A4, A5, A6)*. Entlang der zwei Prozessschritte des Prozessteils „Integration des hybriden FAS Prototyps“ konnten die Systemintegratoren unter Anwendung der HPiL Methoden durch alle drei Projektteams ein für den Verwendungszweck geeigneten hybrider Prototyp des BCAS aufbauen sowie dessen Test planen und vorbereiten. Entlang der Prozessteils „HPiL Test des hybriden FAS Prototyps“ konnten diese BCAS Prototypen dann unter Anwendung der HPiL Methoden durch die Anwender und Prüfer erfolgreich getestet werden.

In den zwei Prozessschritten des Prozessteils Aufbau des hybriden FAS Prototyps wurden folgende Limitationen beobachtet:

- Der Systemintegrator hat Schwierigkeiten, das Gesamtsystem „hybrider BCAS Prototyp“ zu überblicken und zu verstehen (speziell die Aufgabenverteilung zwischen den Softwareelementen).
- Änderungen an Schnittstellen und deren Ein- und Ausgangskanälen zeigten weitreichende und tiefere Auswirkungen auf Modelle als bei dem MiL Test.
- Funktionsprobleme der Anzeige- und Bedienelemente führen zu den größten Verzögerungen in Aufbau und Integration zum hybriden FAS Prototyp.

Es konnten insgesamt sieben verschiedene Auf- und Umbauphasen zeitlich erfasst werden *(→ Anforderung A10, A11, A12).* Es wurde eine durchschnittliche Zeit von rund **16min** (Standardabweichung SD = 11min) für Softwareänderungen festgestellt. Hardwareänderungen konnten im Schnitt in **35min** umgesetzt werden (SD = 21min). Das iterative Vorgehen, die teilweise parallele Arbeit der Projektteams an den hybriden FAS Prototypen sowie die vielen, verschiedenen Änderungen machte jedoch die detaillierte Aufnahme der Zeiten für Hard- und Softwareaufbau schwierig: So konnten nur sieben exemplarische Messungen, die untereinander eine hohe Standardabweichung zeigen, vorgenommen werden.

In Summe bestätigen die Beobachtungen die angestrebten Entwicklungsprämissen zur Unterstützung der Integration des hybriden FAS Prototyps: Die Bereitstellung der HPBench Werkzeuge ermöglicht dem Projektteam den **frühzeitigen Fokus auf den**

Test. Die **Zeit für die Fehlerbehebung** bei Einbindung und Verknüpfung neuer Prototypenelemente konnte gegenüber konventionellen Vorgehensweisen **stark reduziert** werden. Der **Systemintegrator benötigt weniger Kenntnisse** über Kommunikationsprotokolle und deren Umsetzung. Die Bereitstellung der vorkonfigurierten HPBench Baukastenelemente **spart Zeit und Aufwand im Auf- und Umbau** der hybriden Anzeige- und Bedienelemente.

Im den drei Prozessschritten des Prozessteils HPiL Test des hybriden FAS Prototyps können folgende Limitationen **beobachtet** werden:

- Die Anwender zeigen auslegungskonforme Reaktionen auf Anzeigen und können die Bedienelemente größtenteils bedienen *(→ Anforderung A3).*
- Das HPBench Operator-Panel ermöglicht die schnelle Parametrierung der Verhaltensmodelle sowie Veränderung von Anzeigen durch den Prüfer während des Tests *(→ Anforderung A6).*
- Die Modularität des HPBench Baukastens erleichtert den Umbau zwischen den Tests.
- Die Beherrschung des virtuellen PKWs ist für einige Anwender schwierig. Das führt zu verschiedenen Fahrfehlern, zumeist in der Kurvenfahrt *(→ Anforderung A4).*
- Nicht reaktive Verkehrsteilnehmer (Gegenverkehr, Fahrrad) werden durch Anwender als irritierend bezeichnet und führten teilweise zur Verfälschung von Testergebnissen
- Da nur ein Fahrsimulator sowie eine dSpace ASM Lizenz bestand, war die Testzeit der Projektteams stark limitiert.
- Die Interaktion mit den in der Mittelkonsole platzierten Bedienelementen der Projektteams 1 und 2 wirkt eingeschränkt. Die Anwender müssen teilweise um die Aufhängung des Simulatorsitzes herumgreifen.

In Summe bestätigen die Beobachtungen die angestrebten Entwicklungsprämissen zur Unterstützung der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps: Die Nutzung des HPBench Operator Panels ermöglicht einen **effizienten Test für den Prüfer**. **Hardwareänderungen** an den Prototypen können durch den **HPBench Baukasten schnell durchgeführt** werden.

Die in **Abbildung 128** aufgeführten Zeiten für die Durchführung der jeweiligen Tests wurden aufgenommen *(→ Anforderung A10, A14).* Im Schnitt benötigten die Projektteams für den MiL Test etwa 45min, für den KS Test etwa 33min und HPiL Test etwa 34min.

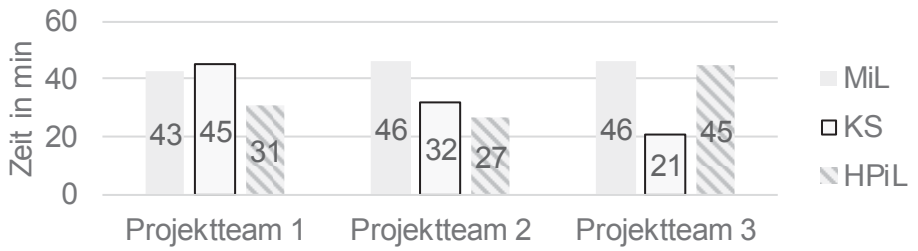


Abbildung 128: Dauer der Testdurchführung MiL, KS und HPiL Tests

Die Durchführung des HPiL Tests scheint vergleichbar oder weniger Zeit zu erfordern als die des MiL und des KS Tests. Die aufgenommenen Werte sind jedoch wegen dem kleinen Stichprobenumfang von n=3 statistisch nicht aussagekräftig. Weiterhin führten die Projektteams zu Beginn der MiL Test noch Parameteränderungen über das Operator-Panel durch. Die tatsächliche MiL Zeit war somit geringer als die erfasste Zeit.

Zudem begünstigt die Testreihenfolge Lerneffekte vom KS Test und MiL Test zum HPiL Test. Es ist damit nicht auszuschließen, dass der erneute Test in derselben oder veränderter Reihenfolge andere Ergebnisse erbringt.

Aus der Zusammenführung der **Ergebnisse und Erkenntnisse der Projektteams sowie der Beobachtungen der Probanden** können die Angemessenheit und Passgenauigkeit der Mensch-Maschine Schnittstelle des hybriden BCAS Prototyps gefolgert werden:

Die **Funktion der Anzeigen und Bedienelemente** kann durch deren hybride Prototypen spezifikationsgerecht wiedergegeben werden *(→ Anforderung A1)*. Im Test kann deren **Verständlichkeit und Eindeutigkeit** sowie **Geometrie und Form** im Test durch die Anwender bewertet werden. *(→ Anforderung A3)*. Aus den Beobachtungsprotokollen des Testleiters sowie der nachträglichen Analyse der Videos kann zudem gefolgert werden, dass die **Interaktionen zwischen Anwender und hybridem Prototyp** innerhalb des validen Mittelbereiches des HPiL Fahrsimulators **natürlich wirken**. Der Anwender verhält sich dort wie im realen PKW *(→ Anforderung A4).* Die im KS Test durch Befragung und Beobachtung der Anwender geprüften Anforderungen an die Beherrschbarkeit können mit dem **HPiL Test in höherer Qualität geprüft werden** *(→ Anforderung A14)*. So zeigt sich bei der Prüfung der Nutzbarkeit des Bedienelementes zum Ein-Ausschalten des Projektteams 1 das der Touchscreen zwar im Stand gut, während der Fahrt jedoch unzureichend bedienbar ist. Darüber hinaus zeigt sich, dass Warnungen und Informationen wie Systemstatus während der dynamischen Fahrt als schlechter wahrnehmbar und weniger eindeutig bewertet werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit Angaben der Literatur. Muss der Fahrer im Fahrzeug die Interaktion mit dem FAS zeitgleich mit der primären Fahraufgabe durchführen, verteilt sich dessen Aufmerksamkeit zwischen beiden (Bubb 2015, S. 640). Gerade bei hoher Beanspruchung durch die Fahraufgabe können damit Anzeigen schlechter wahrgenommen werden, Bedienaufgaben erfolgen mit größerer Verzögerung. Die höhere Qualität zeigt sich in der größeren Realitätsnähe des Tests und damit besseren Übertragbarkeit auf die reale Fahrzeugführung.

Gegenüber dem KS Test können **mehr Anforderungen geprüft werden** *(→ Anforderung A14)*. Wie zuvor ausgeführt, können nun auch Anforderungen geprüft werden, die eine Bewertung durch den Fahrer im Regelkreis mit dem mechatronischen Regelsystem erfordern.

[3] Nachträgliche Befragung der Probanden mit Fragebögen

Durch die Fragebögen **„Beherrschbarkeits-Testbarkeit MMS“** sowie **„Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik“** wurden die Systemintegratoren und Prüfer zu Anwendbarkeit der bereitgestellten Werkzeuge der HPiL Methodik für ihre fachspezifischen Anforderungen befragt. In den Fragebögen wurde Aussagen zur Bewertung bereitgestellt und durch die jeweiligen sechs Systemintegratoren **(SI)** und Prüfer **(P)** der Mechatronik beziehungsweise der Mensch-Maschine Schnittstelle in einer fünfstufigen Bewertungsskala beurteilt. Die jeweiligen Rollen bewerten jeweils die Prozessschritte, die Sie nach den Ausführungen in Kapitel 6.3 verantworten. Der Systemintegrator verantwortet die Schritte zum Aufbau der Prototypen und deren Integration in den Fahrsimulator vor dem Test. Der Prüfer verantwortet die Schritte zur Testdurchführung und der Anpassung der Prototypen während des Tests.

Abbildung 129 zeigt die Ergebnisse dieser Beurteilung für die Integration und den Test des mechatronischen Regelsystems.

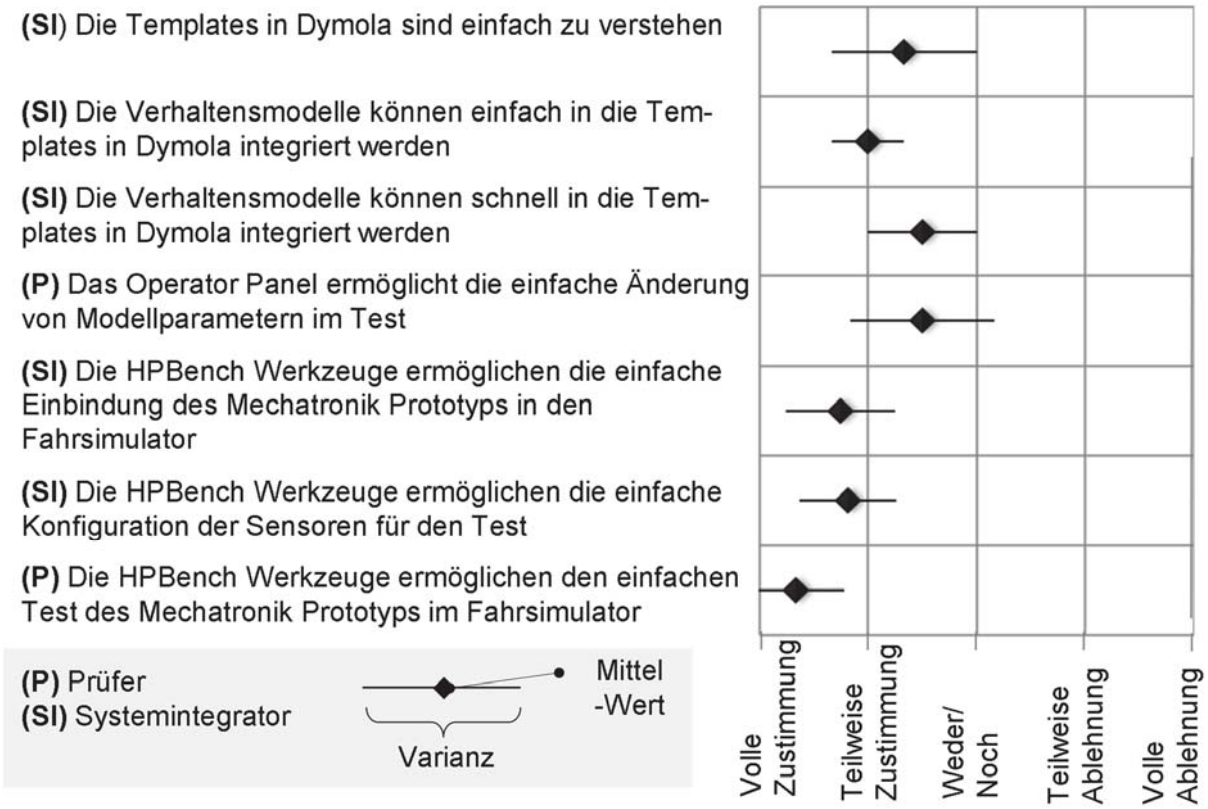


Abbildung 129: Beurteilung der Anwendbarkeit der HPBench Werkzeuge für die Aufgaben des Aufbaus, der Integration und des Tests des Mechatronischen Regelsystems

In der Beurteilung der Verständlichkeit und Anwendbarkeit wird durch den Systemintegrator die Werkzeug-Unterstützung für die Einbindung des Mechatronik Prototyps in den Fahrsimulator und die Konfiguration der Sensoren durch die teilweise bis volle Zustimmung zu den Aussagen positiv beurteilt. Die Anwendbarkeit und Verständlichkeit der HPBench Templates wird im Vergleich dazu schlechter, aber immer noch gut beurteilt. Die Werkzeuge ermöglichen nach Einschätzung der Prüfer den einfachen Test des Mechatronik-Prototyps, Modellparametern sind aber während des Tests nicht in jedem Fall einfach änderbar. Zusammenfassend wird durch die mehrheitliche Zustimmung zu den Aussagen die Verständlichkeit der HPBench Templates sowie die Anwendbarkeit der HPBench Werkezeug für die Aufgaben der Integration und des Tests des mechatronischen Regelsystems bestätigt.

Abbildung 130 zeigt die Ergebnisse der Beurteilung für die Integration und den Test der Mensch-Maschine Schnittstelle. Der Systemintegrator beurteilt die Anwendbarkeit der Werkzeuge zum Aufbau der MMS Prototypen, also die HPBench Templates (Processing) sowie die Elemente des Baukastens, durch die teilweise bis volle Zustimmung zu den Aussagen mehrheitlich mit Zustimmung. Im Vergleich ist der Aufbau visueller Anzeigen besser unterstützt als der Aufbau haptischer und insbesondere akustischer Anzeigen und Bedienelemente. Die Werkzeugunterstützung zur Einbindung der MMS in den Fahrsimulator wird ebenso zustimmend bewertet. Die HPBench Werkzeuge ermöglichen nach Einschätzung des Prüfers darüber hinaus einen einfachen Test des MMS Prototyps und schnelle Änderungen an Soft- und Hardware während des Tests.

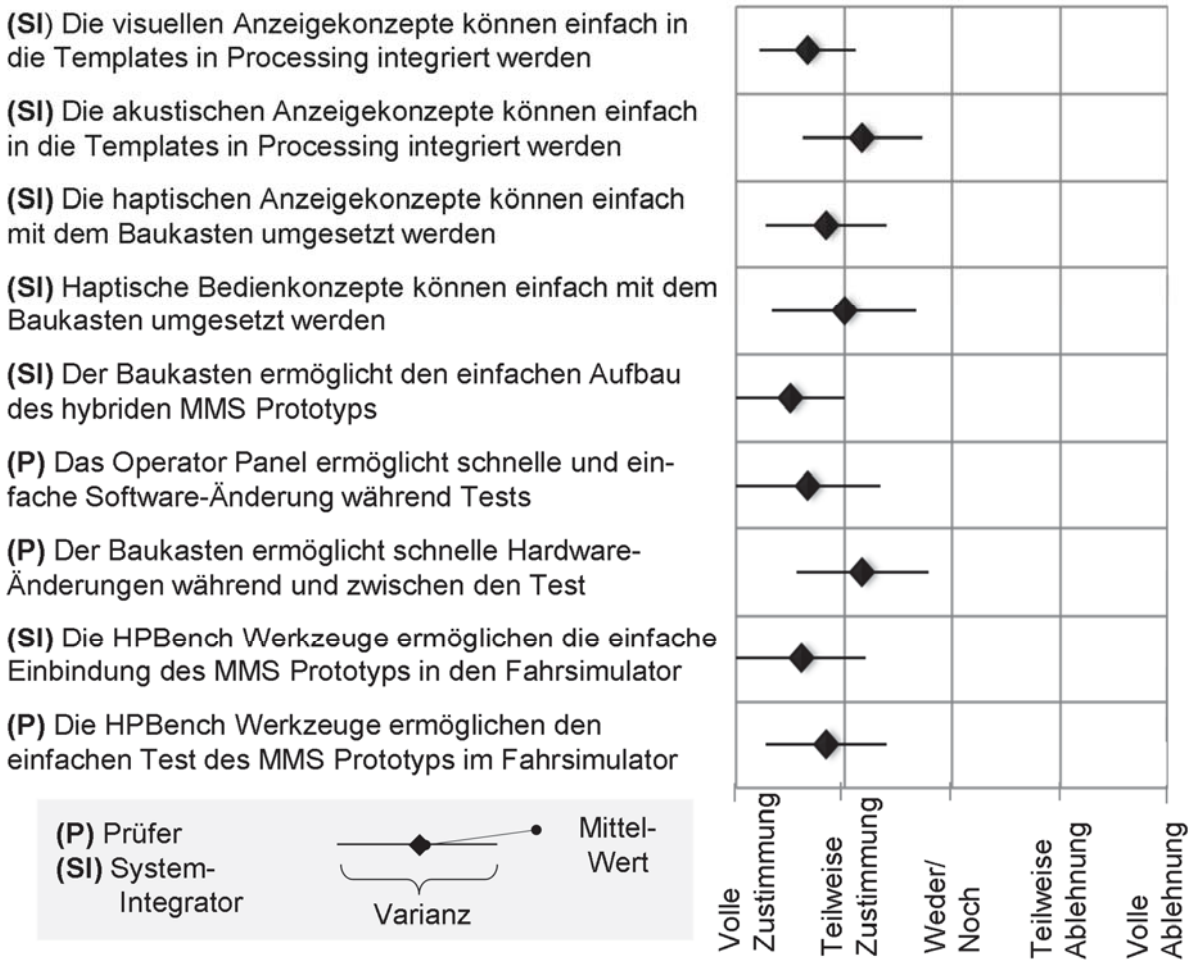


Abbildung 130: Beurteilung der Anwendbarkeit der HPBench Werkzeuge für die Aufgaben des Aufbaus, der Integration und des Tests der Mensch-Maschine Schnittstelle

Zusammenfassend kann als Ergebnis der Befragung festgehalten werden: Die Beurteilung der Systemintegratoren und Prüfer zeigt eine **Anwendbarkeit der HPBench Werkzeuge** für Aufbau, Integration und Test der Prototypen des mechatronischen Regelsystems und der Mensch-Maschine Schnittstelle (→ *Anforderungen A5, A6, A7*). Durch die geringe Teilnehmerzahl ergibt sich jedoch keine statistische Signifikanz.

Um die **Nutzbarkeit der HPiL Methodik** *(→ Anforderung A8)* zu evaluieren, wurden die Prüfer zu einer Einschätzung der Nutzbarkeit des durch Sie jeweils eingesetzten Testverfahrens des Standes der Technik sowie des HPiL Tests zur Prüfung derselben Beherrschbarkeits-Kriterien befragt. Es wurden Aussagen durch die Prüfer in einer fünfstufigen Bewertungsskala im ersten Teil des Fragebogens „wahrgenommenen Nützlichkeit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ bewertet. Beide Erhebungen wurden anschließend miteinander verglichen. **Abbildung 131** zeigt die Ergebnisse dieser Beurteilung. Im Vergleich mit dem MiL Test wird der HPiL Test (1) hinsichtlich drei der sechs Nutzbarkeits-Aspekte im Durchschnitt für besser eingeschätzt, der MiL Test in den anderen drei Nutzbarkeits-Aspekten. Im Vergleich wird der KS Test für fünf der sechs Nutzbarkeits-Aspekte im Mittel für besser als der HPiL Test (1) eingeschätzt. Die Unterschiede zeigen im gepaarten t-test keine statistische Signifikanz. Obwohl eine Tendenz für eine im Vergleich zum HPiL Test bessere Nutzbarkeit des KS Test erkennbar ist, lassen die Ergebnisse der Befragung keinen eindeutigen Trend

im Vergleich der Nutzbarkeit erkennen. Anforderung (A8) kann daher nicht bewertet werden. Ausführliche Messwerttabellen sind **Anhang E** zu entnehmen.

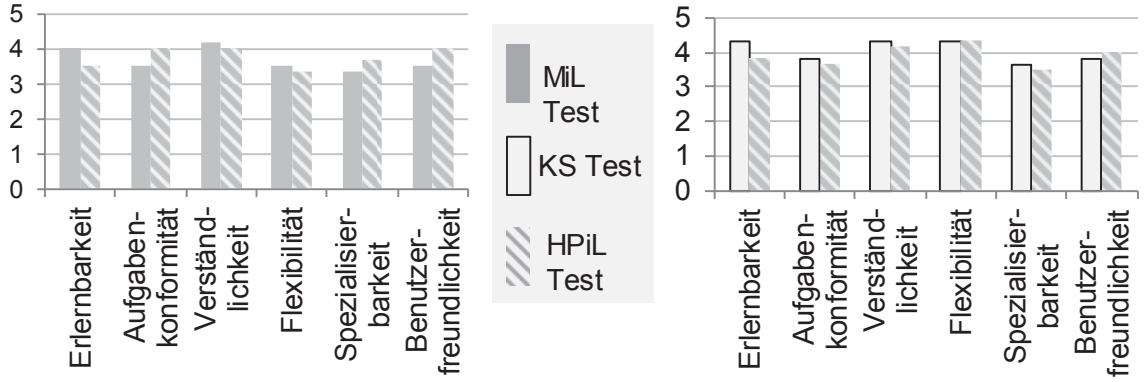


Abbildung 131: Beurteilung der wahrgenommenen Nutzbarkeit im Vergleich zwischen MiL und HPiL sowie KS und HPiL Test durch die Prüfer

Um die **Nützlichkeit der HPiL Methodik** *(→ Anforderung A9)* zu evaluieren, wurden die Prüfer im zweiten Teil des Fragebogens zu einer Einschätzung der Nützlichkeit der durch Sie jeweils eingesetzten Methodik des Stand der Technik sowie der HPiL Methodik zur Prüfung derselben Beherrschbarkeits-Kriterien befragt. Beide Erhebungen wurden anschließend miteinander verglichen. **Abbildung 132** zeigt die Ergebnisse dieser Beurteilung. Im Vergleich mit dem MiL Test wird der HPiL Test hinsichtlich drei der sechs Nutzbarkeits-Aspekte im Durchschnitt für besser eingeschätzt. Im Vergleich mit dem KS Test wird der HPiL Test in allen sechs Nutzbarkeits-Aspekten im Durchschnitt für schlechter eingeschätzt. Die Unterschiede zeigen im gepaarten t-test keine statistische Signifikanz. Obwohl eine Tendenz für eine im Vergleich zum HPiL Test bessere Nutzbarkeit des KS Test erkennbar ist, lassen die Ergebnisse der Befragung keinen eindeutigen Trend im Vergleich der Nutzbarkeit erkennen. Das Ergebnis erlaubt daher keine Bewertung von Anforderung (A9). Ausführliche Messwerttabellen sind **Anhang E** zu entnehmen.

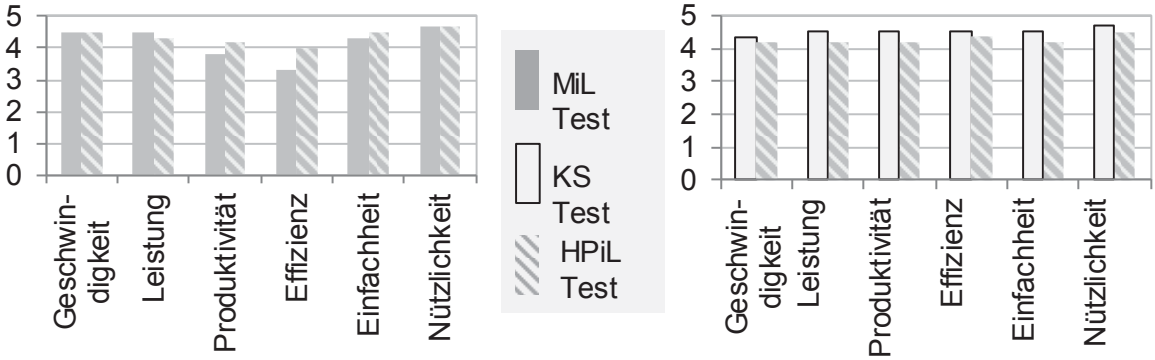


Abbildung 132: Beurteilung der wahrgenommenen Nützlichkeit im Vergleich des MiL und HPiL sowie KS und HPiL Tests durch die Prüfer

Zur **Evaluation der Beanspruchungshöhe** *(→ Anforderung A10)* wurden die Prüfer mit dem standardisierten Fragebogen NASA TLX befragt. Dabei mussten die Probanden Aussagen zu verschiedenen Aspekten Ihrer Beanspruchung bei der Erfüllung der Testaufgabe auf einer Skala von 0% bis 100% bewerten. Die Erhebungen wurden jeweils nach dem Test durchgeführt und anschließend für MiL und HPiL Test (1) sowie KS und HPiL Test (1) verglichen.

Abbildung 133 zeigt den Vergleich der Mittelwerte sowie deren Varianz zwischen MiL und HPiL Test (1). **Abbildung 134** zeigt den Vergleich der Mittelwerte sowie deren Varianz zwischen KS und HPiL Test (1).

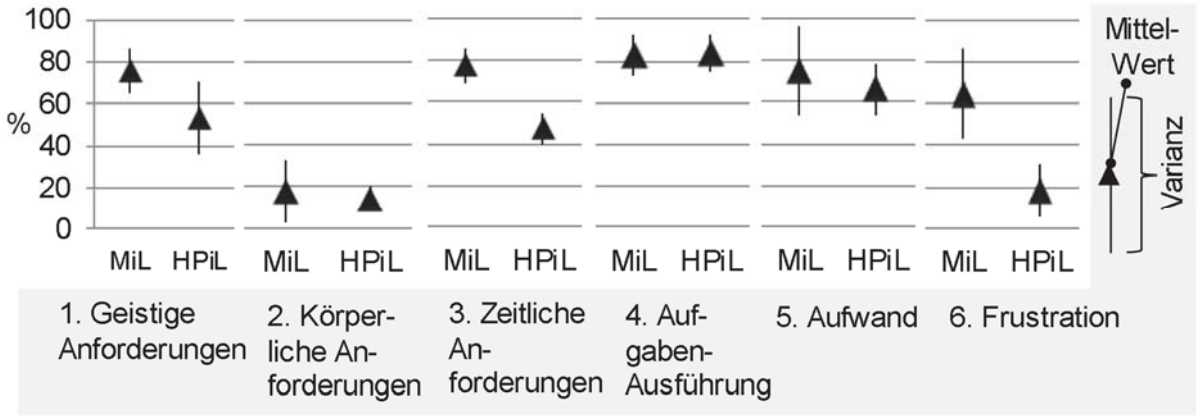


Abbildung 133: Beurteilung der Beanspruchungshöhe im Vergleich des MiL und HPiL Tests durch die Prüfer (nach Buchholz und Stark 2017, S. 78)

Der MiL Test wird gegenüber dem HPiL Test zeitlich anfordernder und frustrierender eingeschätzt. Im gepaarten t-test zeigte sich für beide Aspekte jeweils eine statistische Signifikanz. Auch in den Aspekten Aufwand, geistige und körperliche Anforderungen ist der MiL Test fordernder, jedoch ohne statistische Signifikanz. Es kann festgehalten werden: HPiL Tests werden in den Aspekten zeitlicher Aufwand und Frustration für weniger beanspruchender als MiL Tests eingeschätzt. Darüber hinaus deuten die Messwerte eine vergleichbare oder geringere Beanspruchung im HPiL Test in den restlichen Aspekten an.

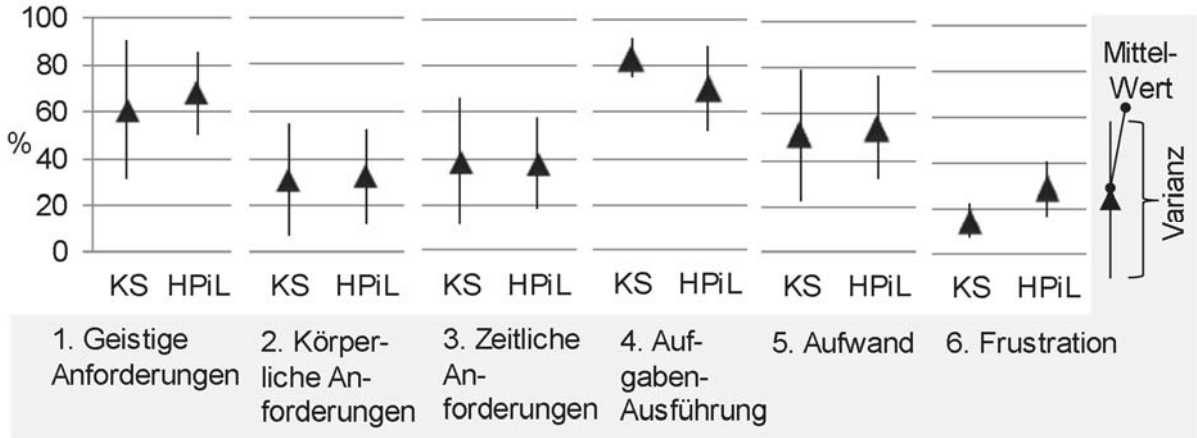


Abbildung 134: Beurteilung der Beanspruchungshöhe im Vergleich des KS und HPiL Tests durch die Prüfer (nach Buchholz und Stark 2017, S. 78)

Der HPiL Test ist im Mittel als stärker beanspruchend sowie aufwändiger, frustrierender und mit schlechteren Aufgaben-Ausführungsqualität als der KS Test bewertet. Allerdings variieren die Einschätzungen der Prüfer für die einzelnen Aspekte zum Teil stark. Nur in den Aspekten Aufgabenausführung und Frustration scheint ein Trend erkennbar, eine statistische Signifikanz ist aber in keinem Fall gegeben. Zusammenfassend deuten die Messwerte eine vergleichbare bis höhere Beanspruchung des HPiL gegenüber dem KS Test an. Die ausführliche Messwerttabellen, zuvor bereits durch Buchholz und Stark veröffentlich (Buchholz und Stark 2017, S. 78), sind **Anhang E** zu entnehmen.

In Bezug auf die initial gestellten Anforderungen (A1) bis (A14) kann damit das folgende Fazit aus der ersten Evaluationsstudie gezogen werden:

Die Prozessschritte zum Aufbau des hybriden BCAS Prototypen und dessen Integration in den Fahrsimulator sind für den Systemintegrator durchführbar. Die HPBench Werkzeuge wurden als anwendbare, nutzbare und nützliche Unterstützung für den Aufbau der Prototypen des mechatronischen Regelsystems und der Mensch-Maschine wahrgenommen. Die HPiL Methodik zeigt sich kompatibel mit den im Aufbau des hybriden FAS Prototypen eingesetzten industriellen Entwicklungsmethoden und -werkzeugen. Im Schnitt wurden die Anforderungen an die Zeit für die Software- und Hardwareänderungen eingehalten. Die geringe Vorerfahrung der Probanden im Vergleich zur Zielgruppe der erfahrenen Prüfer lässt hinsichtlich den Ausführungszeiten Verbesserungen erwarten. Die Ergebnisse, die in der Evaluation des Aufbaus des hybriden BCAS Prototypen gewonnen wurden, können aufgrund der eingeschränkten Glaubwürdigkeit sowie geringen Anzahl der Systemintegratoren nur eine Tendenz aufzeigen. Ein Nachweis, der einen statistisch signifikanten Beleg der Anforderungen erlaubt, kann nicht erbracht werden.

Im HPiL Test der drei hybriden BCAS-Prototypen konnten insgesamt 18 der 26 Beherrschbarkeitskriterien getestet werden. Ein Nachweis der Beherrschbarkeit konnte durch die Prüfer der Projektteams für 13 bis 15 der Beherrschbarkeitskriterien erbracht werden. Damit konnte gezeigt werden, dass der HPiL Test für den Verwendungszweck geeignet und der hybride FAS Prototyp angemessen für den umfassenden Beherrschbarkeits-Test ist. Im Test zeigten sich die eingesetzten HPBench Werkzeuge nutzbar und nützlich für die Aufgaben des Prüfers. Der Vergleich der MiL Test und HPiL Test sowie KS Test und HPiL Test durch die Prüfer zeigen sich keine statistischen Signifikanzen hinsichtlich Nutzbarkeit und Nützlichkeit. Der MiL Test wird im Vergleich für zeitlich aufwändiger und frustrierender eingeschätzt. Obwohl eine statistische Signifikanz vorliegt, ist die Validität dieser Einschätzung angesichts der geringen Vorerfahrung der Prüfer fraglich. Zudem wurde der MiL Test vor dem HPiL Test durchgeführt, Lerneffekte sind nicht auszuschließen. Die eingeschränkte Glaubwürdigkeit und Zuverlässigkeit, die aus der geringen Anzahl der Prüfer resultiert, erlaubt keinen statistisch signifikanten Nachweis der Anforderungen. Die Verständlichkeit des hybriden BCAS Prototyps sowohl des mit diesem durchgeführten HPiL Test konnte in der Interaktion zwischen Anwender und FAS gezeigt werden. Die eingeschränkte Abbildung der Zielgruppe „Normalfahrer“ durch die Anwender schränkt die Aussagekraft dieser Ergebnisse ein. Darüber hinaus zeigen sich Störgrößen, die auf die limitierten Vorerfahrungen von zwei der vier Anwender im Rechtsverkehr zurückgeführt werden können. Die eingeschränkte Qualität des Testequipments sorgt für eine zusätzlich eingeschränkte interne Validität der Evaluationsstudie. Neben den in Kapitel 7.3.2 aufgeführten, durch die Projektteams berichteten Einschränkungen der Testszenarien, kann insbesondere der geringe Detailgrad sowie die mangelhafte Tiefenwahrnehmung der dSpace ASM Visualisierung als Quelle für die mehrfach auftretenden Abbiegefehler ausgemacht werden. Aufgrund der eingeschränkten Glaubwürdigkeit, internen Validität und Zuverlässigkeit der Evaluation können daher keine statistisch signifikanten Nachweise hinsichtlich einer Erfüllung der Anforderungen erbracht werden.

In der nachfolgenden zweiten Evaluationsstudie soll auf den Erkenntnissen, die im Rahmen der ersten Evaluationsstudie gesammelt werden konnten, aufgebaut und weitere HPiL Tests durchgeführt werden. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.4.2, sollen diese Tests mit einer signifikanten Gruppe naiver Probanden ohne Bezug zum Entwicklungsprozess in der Rolle des Anwenders durchgeführt werden.

7.4 Aufbau des hybriden FAS Prototyps und Test der Beherrschbarkeit mit naiven Probanden

In der **zweiten Evaluationsstudie** liegt der Fokus auf dem Prozessteil „Test des hybriden FAS Prototyps“: Es soll die Beherrschbarkeit des BCAS im Test mit naiven Testern nachgewiesen werden. **Abbildung 135** verortet das Vorgehen im FAS Entwicklungsprozess.

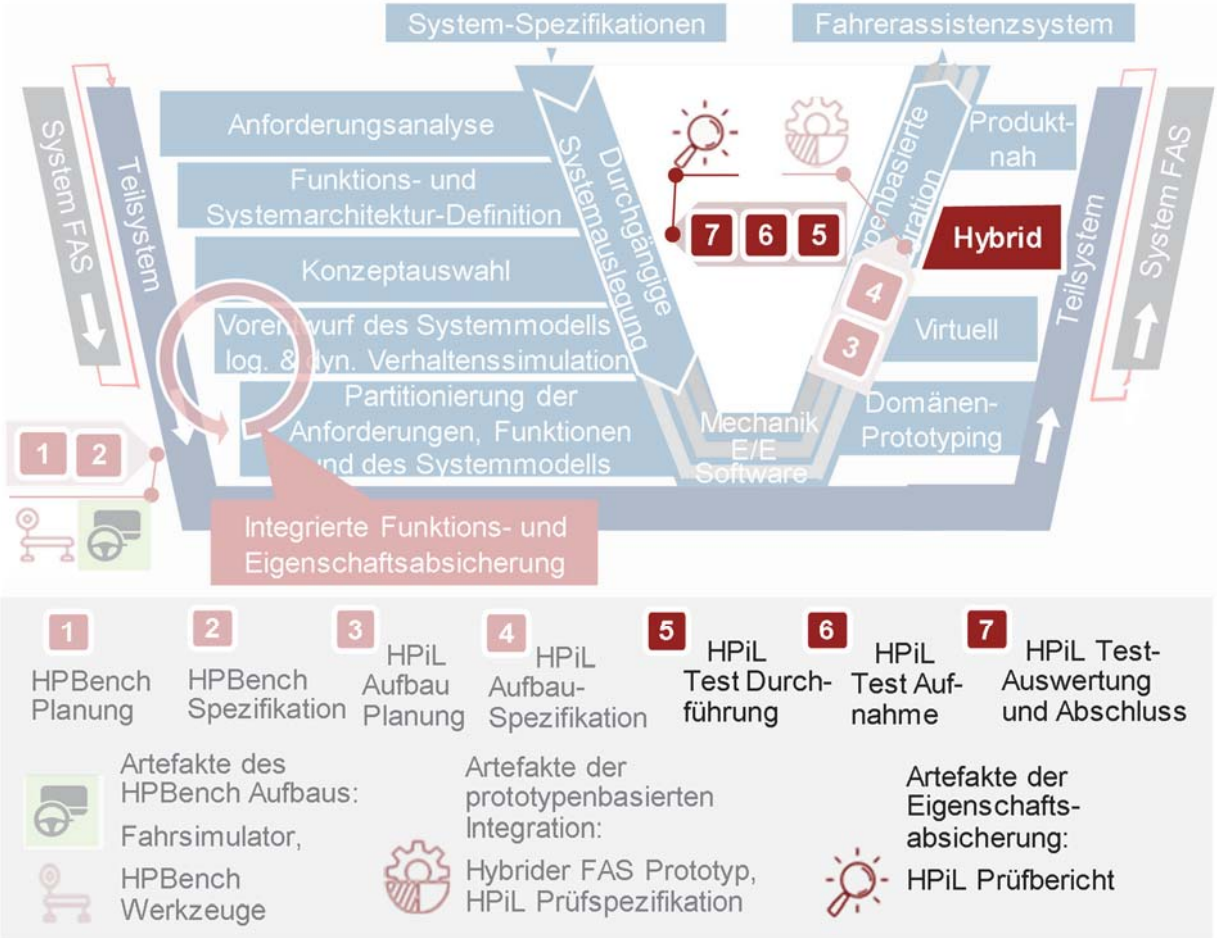


Abbildung 135: Prozessteil „Test des hybriden FAS Prototyps“ zur Durchführung der zweiten Evaluationsstudie

7.4.1 Versuchsdesign der 2. Evaluationsstudie

An der zweiten Evaluationsstudie nahmen insgesamt 24 Probanden – davon 5 Frauen und 19 Männer – mit einem Altersdurchschnitt von 33 Jahren teil (Standardabweichung SA = 8 Jahre). Wie in Kapitel 7.3.1 beschrieben, ist in der Evaluation von Fahrvorgängen die **hinreichende Abbildung des „Normalfahrers“ durch die Probanden** das entscheidende Kriterium. Die nachfolgenden Ausführungen dienen daher der Bewertung der Probanden.

Die Probanden gaben eine durchschnittliche Fahrerfahrung von 12 Jahren an. Alle Probanden besitzen einen Führerschein, der in Deutschland oder in einem europäischen Land mit Rechtsverkehr erworben wurde. Sieben Probanden gaben an, nicht oder nur weniger als 500km im Jahr zu fahren. Die restlichen Probanden äußerten sich wie folgt: Fünf Probanden geben eine Jahresfahrleistung von bis zu 5000km an. Sechs Probanden gaben eine Fahrleistung zwischen 5000km und 15000km an. Sechs wei-

tere Probanden gaben eine Fahrleistung von mehr als 15000km an. Der Altersdurchschnitt der Probanden-Kollektivs entspricht dem in Kapitel 7.3.1 beschriebenem Normalfahrer, die Verteilung der Geschlechter weicht mit 21% dagegen signifikant von den 50% Frauenanteil des Normalfahrers ab. Auch die jährliche Fahrleistung weicht signifikant vom Normalfahrer ab. So ist die Fahrergruppe mit mittleren Fahrleistungen mit nur etwa 35% unterdurchschnittlich stark vertreten. Dieser Fakt kann möglicherweise auch auf den Ort der Erhebung zurückgeführt werden. So ergab eine Analyse der Fahrzeugnutzung-bezogenen Kundendaten eines KFZ-Vergleichsportals für den Raum Berlin eine gegenüber dem Bundesvergleich um 2000km geringere durchschnittliche Fahrleistung (CHECK24 Studien 2018). Es kann damit angenommen werden, das eine hinreichende Übereinstimmung mit dem Fahrer des Anwendungsfalles BCAS vorhanden ist. Damit kann zusammengefasst werden: Die **Probandengruppe stimmt mit der Zielgruppe „Normalfahrer“ nicht vollständig, jedoch für den Anwendungsfall hinreichend** überein. Die Probandengruppe wird damit als **glaubwürdig** angenommen.

Die Probanden gaben mehrheitlich Vorerfahrungen mit FAS an (19 Nennungen). Im Rahmen der Studie besonders die Vorerfahrungen mit Abstandswarnsystemen (13 Nennungen) sowie Kollisionsvermeidungssystemen (7 Nennungen) relevant. Für die Bewertung von FAS sind diese Vorerfahrungen hilfreich, da auch eine eingeschränkte Abbildungsqualität des FAS Prototyps eine Übertragungsleistung durch den Probanden erlaubt. Durch 13 der 24 der Probanden wurde keine bis wenig Vorerfahrung in Fahrsimulatorstudien angegeben, 6 der 24 Probanden gaben dagegen hohe bis sehr hohe Erfahrungen in solchen Studien an. Insgesamt gaben zudem 21 der 24 Probanden an, regelmäßig PC Spiele zu spielen. Die geringe Vorerfahrung der Mehrheit der Probanden lässt Anpassungsschwierigkeiten im Fahrsimulator erwarten. Die Nutzung von PC Spielen durch die Mehrheit der Probanden sollte den Umgang mit der digitalen Versuchstechnik vereinfachen. Es kann somit angenommen werden, dass die Probandengruppe gute Fähigkeiten ausweist, mit Störgrößen umzugehen, die sich aus Einschränkungen der Versuchstechnik ergeben. Es kann damit eine gute **interne Validität der Tests angenommen werden.**

Zur Beurteilung des Kriteriums der **Übertragbarkeit** wird in **Kapitel 7.6 eine Evaluation** mit einem anderen Testsetup durchgeführt. Der Umfang der Probandengruppe übersteigt die in Kapitel 3.4.2 beschriebene Mindestanzahl für einen Nachweis der Beherrschbarkeit von 20 Probanden. Sowohl die Auswahl als auch die Anzahl der Probanden lässt damit erwarten, dass sich die Ergebnisse auch bei größerer Anzahl an Probanden oder geänderter Testdauer nicht wesentlich verändern: Die Evaluationsstudie ist **zuverlässig**. Es kann zusammengefasst werden:

Die zweite Evaluationsstudie kann als glaubwürdig, mit einer hohen internen Validität und als zuverlässig angenommen werden. Die Übertragbarkeit auf andere Setups wird später beurteilt. Zusammenfasst wird die Qualität der Nutzerstudie als hoch angenommen, Ergebnisse und Erkenntnisse besitzen eine hohe, statistisch valide Aussagekraft.

Zum Test wird das **BCAS des Projektteams 1** gewählt. Wie in Kapitel 7.3.2 gezeigt wurde, erfüllt dieses als einziges die kritische Anforderung „das System stoppt das Fahrzeug vor dem Crash“ in allen vier Testszenarien. Für die zweite Studie wurden einige Modifikationen vorgenommen: Für eine bessere Erkennbarkeit wurden die LED-Streifen, die im ursprünglichen Anzeige-Design des Projektteams 1 an den A-Säulen angebracht sind, links und rechts vom Kombi-Instrument angeordnet. Um die mangelhaften Bedienbarkeit des Touchscreens zu verbessern, wurde die Position und Größe der Bedienfelder im Touch-Prototyp verändert. Wie in Kapitel 7.4.2 gezeigt wurde, wird

Beherrschbarkeits-Kriterium 17 „Es ist möglich, das System jederzeit zu übersteuern“ durch das BCAS des Projektteams 1 nicht erfüllt. Eine mögliche Lösung, die im Stand der Technik in vergleichbaren FAS eingesetzt wird, wäre ein „Kickdown“, eine starke Betätigung des Gaspedals zur Übersteuerung der Bremse bei Notbremsung (nach Bergrath 2015). Für den Test der Anforderungen an die Beherrschbarkeit kann diese Funktion jedoch sehr gut verwendet werden, um das Verständnis der Probanden über die Systemgrenze des BCAS zu prüfen. Daher wurde diese Funktion nicht implementiert: Das zu **testende BCAS enthält damit bewusst keine Funktionen zur Übersteuerbarkeit** durch den Fahrer.

Versuchsdesign und Messmethoden

Im Test nehmen die Probanden die Rolle Anwender ein und sollen das BCAS im KS Test und im HPiL Test testen und bewerten. Wie in der ersten Evaluationsstudie dient der KS Test hierbei wieder als Referenz-Testverfahren des Stands der Technik. Wegen der in der HPBench Planung in Kapitel 7.2.1 beschriebene Limitationen der Visualisierung von PKW und Fahrumgebung durch dSpace ASM wurde die Nutzergruppe für diesen Test im Prozessteil „Aufbau der HPBench“ eingeschränkt. Es wird angenommen, dass nur Experten die Funktion des BCAS auch ohne hochwertige Visualisierung beurteilen können. Da auch die hochwertigere Visualisierung mit Unity3D limitiert nutzbar ist, wird dem in Kapitel 7.2.1 vorgeschlagenen Lösungsansatz gefolgt:

Die Tests der 2. Evaluationsstudie werden mit gering detaillierter, schneller Visualisierung in dSpace ASM sowie mit hochdetaillierter, langsamer Visualisierung in Unity3D durchgeführt. Die erforderlichen Tests werden im Folgenden als „**HPiL Test (dSpace)**“ sowie „**HPiL Test (Unity3D)**“ bezeichnet. Die jeweilige Evaluierbarkeit wird in der Auswertung des Tests besonders beleuchtet.

Die Nutzung der hochdetaillierten Unity3D hat zusätzliche Vorteile für den KS Test: Visuelle Anzeigen können durch virtuelle geometrische Modelle dargestellt und mittels Virtual Reality Anzeigetechnologie ausgegeben werden. Die bessere Positions- und Lagetreue der visuellen Anzeigen sowie die detaillierte Abbildung des PKW-Cockpits erhöht die Immersitivität gegenüber den Rapid Prototyping Anzeigen der ersten Evaluationsstudie. Als Versuchsdesign wird ein 1x3 Within Subject Design mit der Testbedingung „Testverfahren“ verwendet: Jeder Proband testet also jeweils alle drei Testverfahren. **Tabelle 35** fasst das Versuchsdesign zusammen.

Tabelle 35: Versuchsdesign der 2. Evaluationsstudie

Stichprobengröße: N= 24		
Test-bedingung: Test-verfahren	**Stand der Technik**	MMS Konzeptsimulation mit Sitzkiste (Unity3D)
	Neues Testverfahren (1)	Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests (Unity3D)
	Neues Testverfahren (2)	Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test (dSpace)

In der 2. Evaluationsstudie werden verschiedene Messmethoden und -werkzeuge zur Erfassung und Auswertung der Interaktion zwischen dem Anwender und dem BCAS und angewendet. Für die **computerbasierte Aufnahme von Testdaten** sowie Aufnahme der **Handlungen der Probanden während der Tests** werden die bereits in der ersten Evaluationsstudie eingesetzten Messmethoden und -werkzeuge verwendet.

Zur **Aufnahme von Daten der Probanden nach dem Test** dienen Fragbögen. Der bereits in der 1. Evaluationsstudie eingesetzte standardisierte NASA TLX Fragebogen wird zur Einschätzung der Beanspruchung der Probanden durch die Testaufgabe eingesetzt. Weiterhin wird eine Bewertung des Produkterlebnisses mit Hilfe des standardisierten meCUE-Fragebogen durchgeführt (Minge et al. 2013). Ziel dieses Fragebogens ist die ganzheitliche Erfassung des Nutzungserlebens. Ergänzend wird durch den nicht standardisierten Fragebogen „Bewertbarkeit der Beherrschbarkeit“ eine Bewertung von Beherrschbarkeit die der Fahrer-Wahrnehmung und Fahrer-Entscheidung zuzuordnen sind, erfragt. Es sollen durch den Anwender einerseits Beherrschbarkeits-Kriterien bewertet werden, die auch ohne aktive Fahrt gut bewertbar sind, beispielsweise die Nutzbarkeit der Bedienelemente, die Verständlichkeit und Eindeutigkeit der Warnungen oder die Position der Anzeigen und Bedienelementen im Kontext des Cockpits. Andererseits sollen Beherrschbarkeits-Kriterien bewertet werden, die den Kontext der Fahrt benötigen, beispielsweise die Wahrnehmbarkeit von Warnungen in bestimmten Verkehrssituationen oder die Angemessenheit deren Kritikalität für die jeweilige Verkehrssituation. Zur Evaluation des Verständnisses, das die Anwender vom BCAS haben, wird die Bewertung der Übersteuerbarkeit des BCAS (Beherrschbarkeits-Kriterium 17) erfragt: Wird durch die Probanden erkannt, dass keine derartige Funktion im BCAS umgesetzt ist? Alle drei Fragebögen (NASA TLX, Bewertung des Produkterlebnisses und Bewertung der Beherrschbarkeit) werden jeweils nach jedem Test erhoben. Nach Durchführung der drei Tests werden die Probanden im nicht standardisierten Fragebogen „Bewertung der Beherrschbarkeit im Vergleich“ zu einem Vergleich der drei Testverfahren auf Basis der zuvor erfragten Beherrschbarkeits-Kriterien befragt. Die zwei spezifischen, nicht standardisierten Fragebögen sind **Anhang F** zu entnehmen. Beherrschbarkeits-Kriterien die der Fahrer-Reaktionen zuzuordnen sind, werden durch **Beobachtungen** analysiert.

Zur Evaluation, ob und zu welchem Grad die in Kapitel 7.1 aufgestellten Anforderungen (A1) bis (A14) in der Durchführung des HPiL Tests erfüllt werden, ordnet die nachfolgende **Tabelle 36** diesen jeweils die Messmethoden und -werkzeuge zu. Da in der ersten Evaluationsstudie bereits verschiedene Beherrschbarkeits-Kriterien nachgewiesen wurden, liegt der Fokus auf den fehlenden Nachweisen. Darüber hinaus sollen diejenigen Beherrschbarkeits-Kriterien untersucht werden, deren Beurteilung oder Test im Rahmen der ersten Evaluationsstudie nicht möglich war. **Die 2. Evaluationsstudie betrachtet nur den Test, nicht jedoch die Integration des hybriden BCAS Prototyps**: Die Anforderungen, die dem Aufbau und der Integration des hybriden FAS Prototyps zuzurechnen sind, werden nicht analysiert.

Tabelle 36: Messmethoden und -werkzeuge zur Evaluation der Anforderungserfüllung in der 2. Evaluationsstudie

Nr.	Erfüllungskriterium	Messmethode (Messwerkzeug)
A1	Der hybride FAS Prototyp muss für den Verwendungszweck geeignet sein, das FAS angemessen für den umfassenden Beherrschbarkeits-Test abbilden.	• Analyse der Angemessenheit und Passgenauigkeit der MMS • Befragung mit „Bewertbarkeit der Beherrschbarkeit“ Fragebogen • Befragung der Bewertung des Produkterlebnis mit meCUE Fragebogen

Nr.	Erfüllungskriterium	• Messmethode (Messwerkzeug)
A2	Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss geeignet und aufgabenangemessen für den Zweck und das Untersuchungsinteresse des Beherrschbarkeits-Test sein.	• Test auf funktionale Angemessenheit und Passgenauigkeit der Mechatronik (Fahrdaten, CASE-Tools)
A3	Die Anzeigen und Bedienelemente des hybriden FAS Prototyps müssen verständlich für den Anwender sein	• Test auf auslegungskonforme Reaktion des Anwenders (Fahrdaten, CASE-Tools) • Beobachtung: Reagiert der Anwender auf Anzeige, kann er die Bedienelemente bedienen? • Befragung mit „Bewertbarkeit der Beherrschbarkeit“ Fragebogen
A4	Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss für den Anwender verständlich und durchführbar sein.	• Test auf auslegungskonforme Reaktion des Anwenders (Fahrdaten, CASE-Tools) • Befragung mit „Bewertbarkeit der Beherrschbarkeit“ Fragebogen • Befragung der Beanspruchung (NASA TLX) • Befragung der Bewertung des Produkterlebnis mit meCUE Fragebogen
A9	Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren höhere Nützlichkeit des HPiL Testverfahrens für den Systemintegrator und Prüfer aufweisen.	• Befragung mit „Bewertung der Beherrschbarkeit im Vergleich“ Fragebogen
A14	Durch Einsatz des HPiL Testverfahrens Tests müssen Erkenntnisse in gegenüber bestehenden Testverfahren höherer Qualität oder größerem Umfang erlangt werden können.	• Test der Beherrschbarkeit des BCAS mit HPiL Test im Vergleich zu KS Test (Fahrdaten, CASE-Tools) • Vergleich der Ergebnisse Bewertung des Produkterlebnis mit meCUE Fragebogen zwischen KS und HPiL Test

7.4.2 Versuchsdurchführung der 2. Evaluationsstudie

Der Test wird im Functional Drive Fahrsimulator (FDS) durchgeführt, es wird wieder das in **Abbildung 121** dargestellte Layout verwendet. Es werden KS Tests und HPiL Test durchgeführt, deren Setup den Beschreibungen aus Kapitel 7.3.1 entsprechen. In den Tests sitzt der Anwender im Functional Drive Fahrsimulator und interagiert mit den Anzeigen und Bedienelementen des BCAS. Die Tests werden durch einen Testleiter durchgeführt, der die Aufgaben des Prüfers übernimmt. Zur Messung der Aufgabenausführung beobachtet der Testleiter den Anwender bei seinen Handlungen und protokolliert diese. Kameras, Mikrofone und Screencasts zeichnen dabei die Handlungen des Anwenders auf. Wie in der Auswertung der 1. Evaluationsstudie gezeigt wurde, sind in den bisherigen Testszenarien nicht alle Beherrschbarkeits-Kriterien testbar. Zudem ist der Test des BCAS in dessen normalen Operationsbereich nicht ausreichend: Wie in Kapitel 3.4.2 ausgeführt, müssen auch Tests an den Systemgrenzen sowie bei

Systemfehlern durchgeführt werden. Daher wurden für die 2. Evaluationsstudie die in **Abbildung 136** dargestellten zusätzliche Testszenarien 5 und 6 hinzugefügt. Nachdem die Testszenarien 1 bis 4 das BCAS innerhalb seines Normalbetriebs testen, dienen beide neuen Testszenarien der Überprüfung der Beherrschbarkeit an der Systemgrenze. **Testszenario 5** dient der Prüfung der Beherrschbarkeit des BCAS nach der Abbiegesituation. In dem Szenario befindet sich das Fahrrad vor dem Abbiegen innerhalb der Warngrenze des BCAS, der Fahrer wird gewarnt. Das Fahrrad startet seine Straßen-Überquerung erst nachdem das Auto die Kurve passiert hat. Zusätzlich sind Sichtbehinderungen eingebaut: Der Fahrer sieht das Fahrrad nicht. **Testszenario 6** dient der Prüfung der Beherrschbarkeit des BCAS bei hoher Geschwindigkeit außerhalb seines normalen Einsatzbereiches in der Stadt. So wird ein Überholmanöver bei hoher Geschwindigkeit in einem Landstraßen-Szenario simuliert. Das Fahrrad schert kurz vor Start des Überholmanövers aus. In beiden neuen Szenarien 5 und 6 können insbesondere noch nicht nachgewiesene Beherrschbarkeits-Kriterien getestet werden. So ist das Verständnis des Fahrers über Systemgrenzen sowie dessen Aufmerksamkeit bei der Überwachung gut prüfbar. Um einen effizienten Ablauf der Tests zu gewährleisten, wurden die sechs Testszenarien in eine durchgängige Teststrecke integriert. In dieser durchfährt der Proband die Testszenarien im HPiL Test in der Sequenz 2, 1, 5, 4, 3, 6.

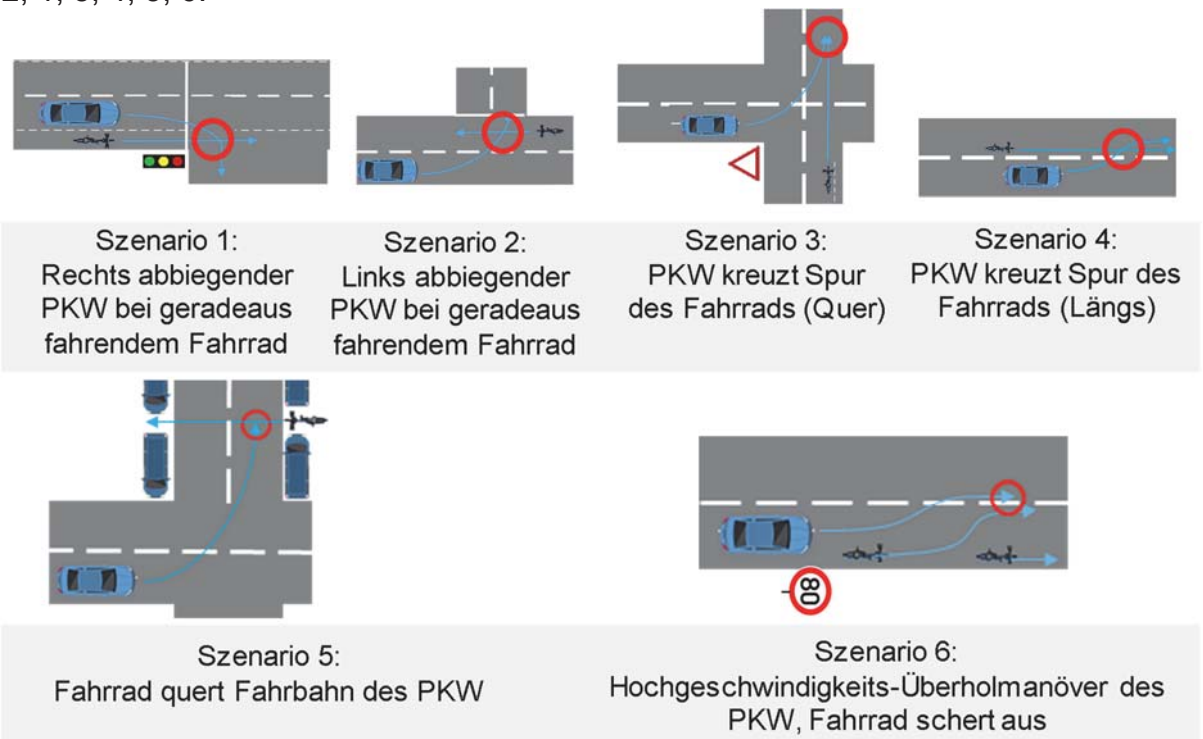


Abbildung 136: Testszenarien der zweiten Evaluationsstudie

Alle Probanden testen den hybriden BCAS Prototypen mit jeder der drei Testbedingungen. Um die interne Validität des Tests zu gewährleisten, variiert die Reihenfolge: So führen 8 der 24 der Probanden zuerst den KS Test, gefolgt vom HPiL Test (dSpace) und dem HPiL Test (Unity3D) durch. Weitere 8 Probanden testen in der Reihenfolge HPiL Test (Unity3D), KS Test und HPiL Test (dSpace). Die letzten 8 Probanden testen in der Reihenfolge HPiL Test (dSpace), HPiL Test (Unity3D) und KS Test.

Die Probanden durchfahren die Teststrecke im HPiL Test jeweils **zwei Mal**. Einmal mit aktiviertem Modus 1 (das BCAS warnt). Und einmal mit aktiviertem Modus 2 (das BCAS bremst, sobald Warnstufe 3 erreicht ist).

Mit Hilfe des HPBench Baukastens wurde der in der nachfolgenden **Abbildung 137** dargestellte hybriden BCAS Prototyp aufgebaut. Die Abbildung fokussiert sich auf die Änderungen gegenüber dem Ursprungsentwurf des Projektteams 1. Die nicht dargestellten akustischen und haptischen Anzeigen und Bedienelemente sind entsprechend Abbildung 126 implementiert.

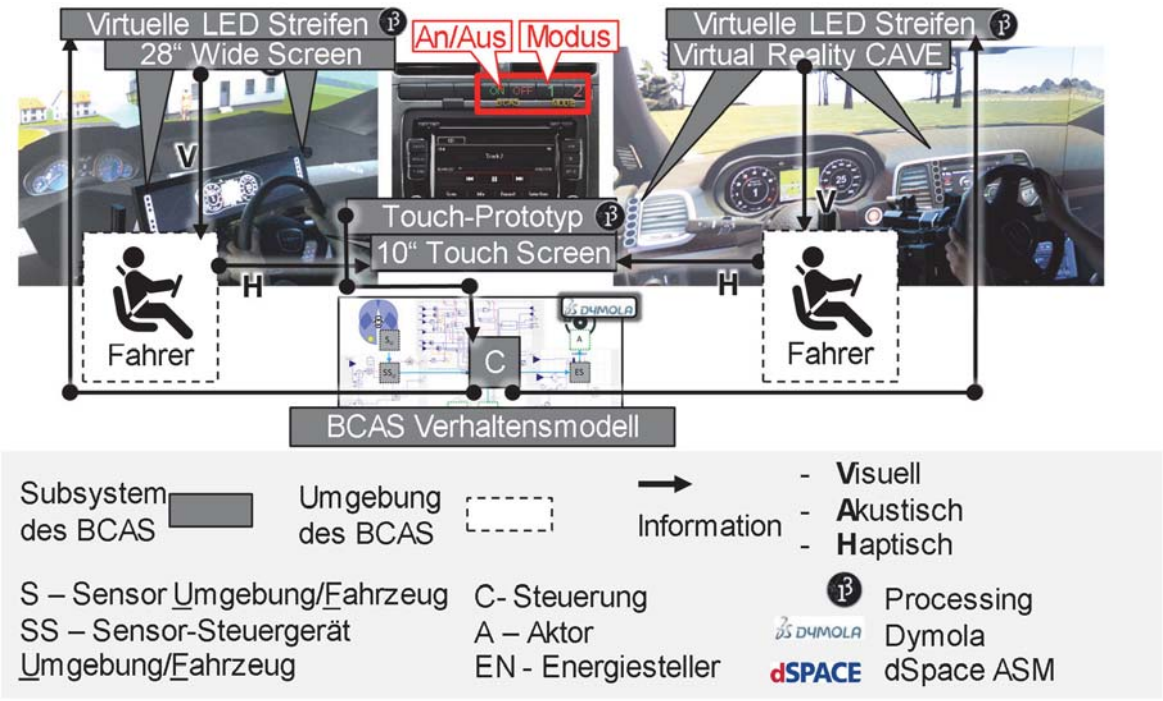


Abbildung 137: (Links) Hybrider BCAS Prototyp mit dSpace Visualisierung, (Rechts) Hybrider BCAS Prototyp mit Unity3D Visualisierung

Prozessschritte Testdurchführung, -aufnahme, -auswertung und Abschluss

Nach erfolgtem Aufbau und Spezifikation des hybriden BCAS Prototyps erfolgt dessen Test im KS Test und im HPiL Test. Zum Nachweis der Beherrschbarkeit werden Testdaten computerbasiert aufgenommen und die Handlungen des mit dem BCAS interagierenden Anwenders mit Kameras und Protokollen während des Tests aufgezeichnet. Dazu werden Prüflisten und Fragebogen zur testbegleitenden und nachträglichen Aufnahme subjektiver Einschätzungen des Anwenders eingesetzt.

In den Tests konnten die *Beherrschbarkeitskriterien 7, 14 und 15* nachgewiesen werden: Die Warnungen des BCAS berücksichtigen verschiedene Verkehrssituationen, das BCAS kann ein- und ausgeschaltet werden und kann verschiedene Betriebsmodi einnehmen. Die Beobachtungen des Testleiters weisen darüber hinaus darauf hin, dass die Überwachung des BCAS ohne eine große Änderung der Aufmerksamkeit des Fahrers in dessen Fahraufgabe durchgeführt werden kann (*Beherrschbarkeitskriterium 13)*. Mit dem Versuchsdesign der 2. Evaluationsstudie kann hier jedoch kein Nachweis erbracht werden. Zur Durchführung eines Nachweises der Aufmerksamkeit in einem zukünftigen Test wird eine Erweiterung des Versuchsdesigns um die Durchführung einer Zweitaufgabe vorgeschlagen (nach Reich 2017, S. 76). Es konnte gezeigt werden, dass die Systemreaktionen konform mit der Erwartungshaltung des Fahrers sind (*Beherrschbarkeitskriterium 2)*. Die Messwerte zeigen, dass Warnungen durch das BCAS rechtzeitig entsprechend der Kritikalität der Verkehrssituation angezeigt werden (*Beherrschbarkeitskriterium 3)*. Die Reaktionen des Anwenders auf die Anzeige weisen darüber hinaus darauf hin, dass dieser die Modi und Status des BCAS

versteht (*Beherrschbarkeitskriterium 1)*. Ebenso weisen die Anwender -Reaktionen darauf hin, dass ein Verständnis über das System-Feedback besteht (*Beherrschbarkeitskriterium 20)*.

Bei mehreren Testszenarien kommt es zur Kollision zwischen PKW und Fahrrad *(Beherrschbarkeitskriterium 16).* Besonders viele Kollisionen traten in den Testszenarien 2 (links abbiegen) und 5 (Fahrrad quert die Fahrbahn des PKW) auf. Testszenario 6 (Hochgeschwindigkeits-Überholmanöver des PKW) zeigte ein mangelhaftes Verständnis der Systemgrenzen des BCAS durch den Anwender *(Beherrschbarkeitskriterium 19).* Die meisten Anwender überholten das Fahrrad ohne den Blinker zu setzen, wie es nach §5 der Straßenverkehrsordnung erforderlich wäre (Hafeneder 2019). Die betroffenen Anwender konnten das Überholmanöver erfolgreich durchführen. Wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, wird das BCAS aber erst nach Aktivierung des Blinkers aktiviert. Durch die Fehlbenutzung konnte gezeigt werden, dass der Anwender die kritische Situation auch bei einer Nichtverfügbarkeit des BCAS beherrschen kann *(Beherrschbarkeitskriterium 25).* Durch die Bedienung des Ein-/Ausschalters konnte gezeigt werden, dass alle Mensch-Maschine Interaktionen durch den Fahrer unterbrochen sowie rückgängig, korrigiert oder verändert werden können *(Beherrschbarkeitskriterien 22, 23).* Wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, ist die Auslösung der visuellen Anzeige an den Blinker gekoppelt: Links blinken aktiviert die linke Anzeige. Mehrere Anwender kritisierten in diese Kopplung als unpassend und nicht eindeutig, da eher eine Korrelation zwischen der Position des Fahrrades und der jeweiligen Anzeige angenommen wurde *(Beherrschbarkeitskriterium 8).* Ebenso wurde die Ausgestaltung der akustischen Anzeige kritisiert. Es wurde insbesondere die Auswahl der Töne, deren Unterscheidbarkeit untereinander bemängelt. Dazu wurde bemängelt, dass die Anzeige der Kritikalität einer Verkehrssituation nicht Erwartungskonform ist.

Im Fragebogen **Bewertung der Beherrschbarkeit** wurden die Anwender zu einer Bewertung der Beherrschbarkeits-Kriterien 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12 und 17 aufgefordert. Für Kriterium 8 wird zwischen der Verständlichkeit (8a) und der Eindeutigkeit (8b) der Warnungen des BCAS unterschieden. Für Kriterium 11 wird zwischen der Kontext-Konformität der Position der Anzeigen (11a) und der Bedienelemente (11b) mit anderen Mensch-Maschine Schnittstellen des PKW-Cockpits unterschieden. Im Fragebogen wird eine absolute Aussage, beispielsweise „Die Warnungen des FAS sind verständlich“, getroffen. Der Anwender bewertet diese über eine fünfstufige Bewertungsskala von „keiner Zustimmung“ (Stufe 1) bis „vollständige Zustimmung“ (Stufe 5). Eine zusätzliche Wahloption ist „keine Bewertung im vorliegenden Test möglich“. Der Nachweis der Beherrschbarkeit wird angenommen, wenn die durchschnittliche Bewertung des Kriteriums größer als 4, das heißt 80% der möglichen Bewertung entspricht. **Abbildung 138** zeigt die Auswertung dieses Tests und gibt den Mittelwert sowie die Varianz der Bewertung der Anwender in jedem der der Testverfahren an. Die Farbe Grün markiert den Bereich zwischen Stufe 4 und 5, in dem der erfolgreiche Nachweis der Beherrschbarkeit angenommen wird.

Die Auswertung zeigt: Über alle drei Testverfahren konnten drei Beherrschbarkeitskriterien durch eine Note größer als 4 nachgewiesen werden. Die Anwender beurteilen das Bedienelement zum Ein-/Ausschalten für den Fahrer nutzbar *(Beherrschbarkeitskriterium 4)* und durch den Fahrer anwendbar, um das BCAS jederzeit auszuschalten *(Beherrschbarkeitskriterium 18).* Die Betriebsmodi des BCAS waren für den Anwender unterscheidbar *(Beherrschbarkeits-Kriterium 5).*

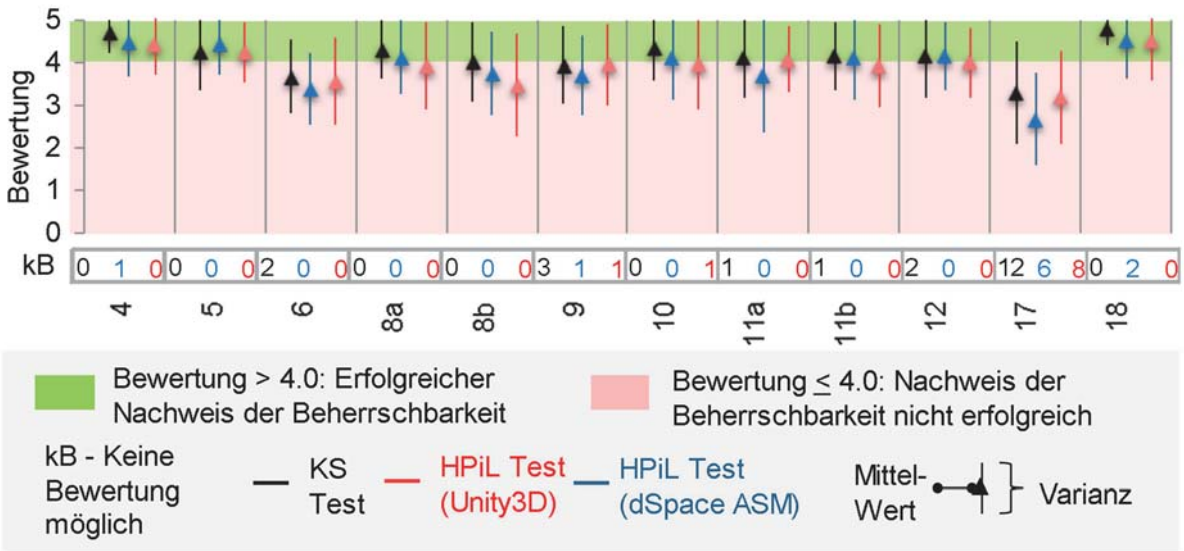


Abbildung 138: Durchschnittliche Bewertung der Beherrschbarkeits-Kriterien durch die Anwender in der 2. Evaluationsstudie

Die Angemessenheit von Warnungen für die Kritikalität der jeweiligen Verkehrssituation des BCAS wurde mit einer durchschnittlichen Note von 3,6 bewertet *(Beherrschbarkeitskriterium 6).* Durchweg mit Noten kleiner als 4 bewertet ist auch die Eindeutigkeit der Anzeigen *(Beherrschbarkeitskriterium 8b).* Wie erkennbar, korreliert diese Bewertung mit der zuvor beschriebenen Anwenderkritik. Auch die Vereinbarkeit der Warnungen mit anderen Informationen im Cockpit wurde mit einer Note kleiner 4 bewertet *(Beherrschbarkeitskriterium 9).* Die Möglichkeit, das BCAS jederzeit durch den Fahrer zu übersteuern, wurde mit denen im Vergleich schlechtesten Durchschnittsnoten von 3,3 und geringer bewertet *(Beherrschbarkeitskriterium 17).* Durchschnittlich 9 von 24 Anwendern gaben in diesem Kriterium eine Nicht-Bewertbarkeit an. Diese Angabe lässt auf ein Verständnis der Funktion durch die betroffenen Anwender schließen, denn es ist wie beschrieben keine Funktionen zur Übersteuerbarkeit des BCAS integriert. Der Sachverhalt, dass weiterhin die Mehrheit der Anwender eine – wenn auch vergleichsweise schlechte – Bewertung abgaben, kann indirekt auf einen Mangel im Verständnis der Systemgrenze des BCAS hinweisen *(Beherrschbarkeitskriterium 19).* Dabei zeigten sich die größten Unterschiede zwischen der Bewertung im KS Test und im HPiL Test (dSpace ASM): Im KS Test gab die Hälfte der Anwender diese Bewertung ab, im HPiL Test (dSpace ASM) ein Viertel der Anwender. Zur Bewertung der Intuitivität der Handlungen, die zum übersteuern des BCAS erforderlich sind, wurde auf die Ergebnisse des Fragebogens meCUE zur Bewertung des Produkterlebnisses zurückgegriffen. Wie im nachfolgenden Kapitel 7.4.3 ausgeführt, wurde eine durchschnittliche Bewertung 5,6 von 7, also ein Wert von 80% der möglichen Maximalbewertung vergeben.

Die Verständlichkeit der Anzeigen, deren ausreichende Informationsbereitstellung über Status und Funktion des BCAS sowie die Wahrnehmbarkeit der Warnungen in typischen Verkehrssituationen wurde im KS Test und HPiL Test (dSpace ASM) jeweils besser als 4 bewertet, im HPiL Test (Unity3D) dagegen schlechter als 4 *(Beherrschbarkeitskriterien 8a, 10,12).* Ebenso gab es differenzierte Bewertungen über die Kontext-Konformität der Position der Anzeigen und Bedienelemente. Im KS Test und im HPiL Test (Unity3D) wurde die kontext-konforme Position der Anzeigen mit einer Bewertung größer 4 bestätigt *(Beherrschbarkeitskriterium 11a).* Im KS Test und im HPiL

Test (dSpace ASM) wurde auch die kontext-konforme Position der Bedienelemente bestätigt *(Beherrschbarkeitskriterium 11b).*

Für fünf der 24 Anwender wurden im Anschluss an die Testszenarien **ergänzende Untersuchungen** durchgeführt. In diesen wurde das BCAS durch den Testleiter deaktiviert. Die Deaktivierung erfolgt zu zufälligen Zeitpunkten, die für den Anwender nicht nachvollziehbar waren. Durch dieses Setup konnte für alle fünf Probanden gezeigt werden, dass das eine Beherrschung der Fahraufgabe auch nach unbeabsichtigter Deaktivierung möglich ist *(Beherrschbarkeitskriterium 24).*

Es können damit insgesamt 14 der 26 Beherrschbarkeits-Kriterien nachgewiesen werden. Wie beschrieben kann *Beherrschbarkeits-Kriterium 13* nicht getestet werden. Da keine Möglichkeit zur Übersteuerung vorhanden ist, kann *Beherrschbarkeitskriteriums 26* (Fahrerhandlungen zum übersteuern des Systems sind intuitiv) ebenso nicht bewertet werden. Die nachstehende **Tabelle 37** fasst die Bewertung zusammen.

Tabelle 37: In der 2. Evaluationsstudie nachgewiesene Beherrschbarkeits-Kriterien des BCAS

Typ	Nr.	Typ	Nr.	Typ	Nr.	Typ	Nr.
Fahrer-Wahrnehmung	1	Fahrer-Wahrnehmung	8a / 8b	Fahrer-Entscheidung	14	Fahrer- Reaktion	21
	2		9		15		22
	3		10		16		23
	4		11a / 11b		17		24
	5		12		18		25
	6		13		19		26
	7				20		

Erfolgreicher Nachweis	Nicht erfolgreicher Nachweis	Nicht beurteilbar/testbar

Nachdem die Beherrschbarkeit selbst bewertet wird, folgt die Auswertung der 2. Evaluationsstudie. In dieser wird evaluiert, ob die in Tabelle 36 zusammengefassten Anforderungen (A1), (A2), (A3), (A8) und (A14) an den HPiL Test erfüllt sind.

7.4.3 Auswertung der 2. Evaluationsstudie

In der Auswertung wird einem dreistufigen Vorgehen gefolgt:

[1] Analyse der HPiL Prüfberichte und Messdaten der Tests
[2] Analyse der Beobachtungsprotokolle, Zeitnahme Kameraaufzeichnungen und Screencasts.
[3] Nachträgliche Befragung der Probanden mit den Fragebogen „NASA TLX Fragebogen“, „Bewertung des Produkterlebnisses“, „Bewertung der Beherrschbarkeit“ und „Bewertung der Beherrschbarkeit im Vergleich“. Sowie der Analyse der gewonnenen Ergebnisse.

Die folgenden Ausführungen zeigen diese Schritte und beschreiben die Erkenntnisse, die hinsichtlich der Anforderungserfüllung gewonnen werden können. Dabei wird der Bezug zu Tabelle 36, in der die Anforderungen mit den Messmethoden und -werkzeugen verknüpft sind, gezogen.

[1] Analyse der HPiL Prüfberichte und Messdaten der Tests.

Die Analyse der computerbasierten Aufnahme von Testdaten zeigt eine auslegungskonforme Reaktion der Anwender im HPiL Test. Dies lässt auf eine Verständlichkeit der Anzeigen des hybriden FAS Prototyps sowie der HPiL Tests für den Anwender schließen *(→ Anforderung A3, A4).*

Exemplarisch zeigen die nachfolgenden Abbildungen die während dem Durchfahren der Teststrecke gewonnenen Messergebnisse aus Fahrdaten und CASE-Tools für jeweils eine der HPiL Testbedingungen. **Abbildung 139** und **Abbildung 140** zeigen diese für die Fahrt in Modus 2 des BCAS, das heißt mit Bremseingriff in der letzten Eskalationsstufe, für den HPiL Test (dSpace ASM) und HPiL Test (Unity3D). Beide Messdaten ermöglichen die Differenzierung zwischen dem Eingriff des Anwenders und dem des BCAS in allen sechs Szenarien. Im ersten Testszenario der Strecke, Testszenario 2 (Links abbiegen), greift das BCAS stark und wiederholt ein, während vom Anwender keine Reaktion ersichtlich ist. Den Vorgaben der Entwicklungsprojektes aus Kapitel 7.1.2 folgend, ist die Reaktion auslegungskonform, denn durch die hohe Differenzgeschwindigkeit zwischen PKW und Fahrrad Ergebnis ist die Zeit bis zur Kollision t_{TC} gering. Es kommt zu einem frühen Bremseingriff. Dagegen zeigt das vorletzte Testszenario der Strecke, Szenario 3 (Fahrrad kreuzt quer) nur eine Reaktion des Anwenders, das BCAS reagiert nicht. Auch diese Reaktion des BCAS und des Anwenders sind auslegungskonform, da es im Szenario nur zu geringen Differenzgeschwindigkeiten zwischen den quer oder parallel zueinander fahrenden PKW und Fahrrad kommt. Das BCAS warnt, der Anwender bremst auslegungskonform.

Zum Vergleich zeigt **Abbildung 141** eine Fahrt in BCAS Modus 1, das heißt ohne Bremseingriff. In den Szenarien 2, 1, 5, 4 und 3 wird durch den Anwender eine Bremsung ausgelöst, jeweils kurz nachdem das BCAS in die erste Warnstufe auslöst.

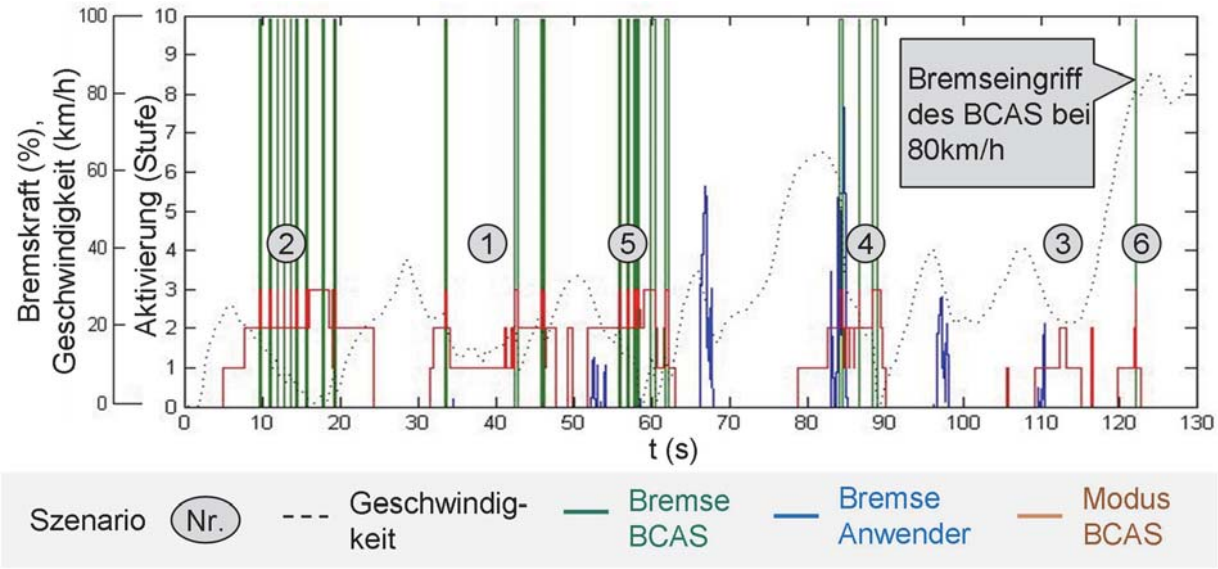


Abbildung 139: Exemplarische Testdaten des HPiL Tests (dSpace ASM) - BCAS Modus 2

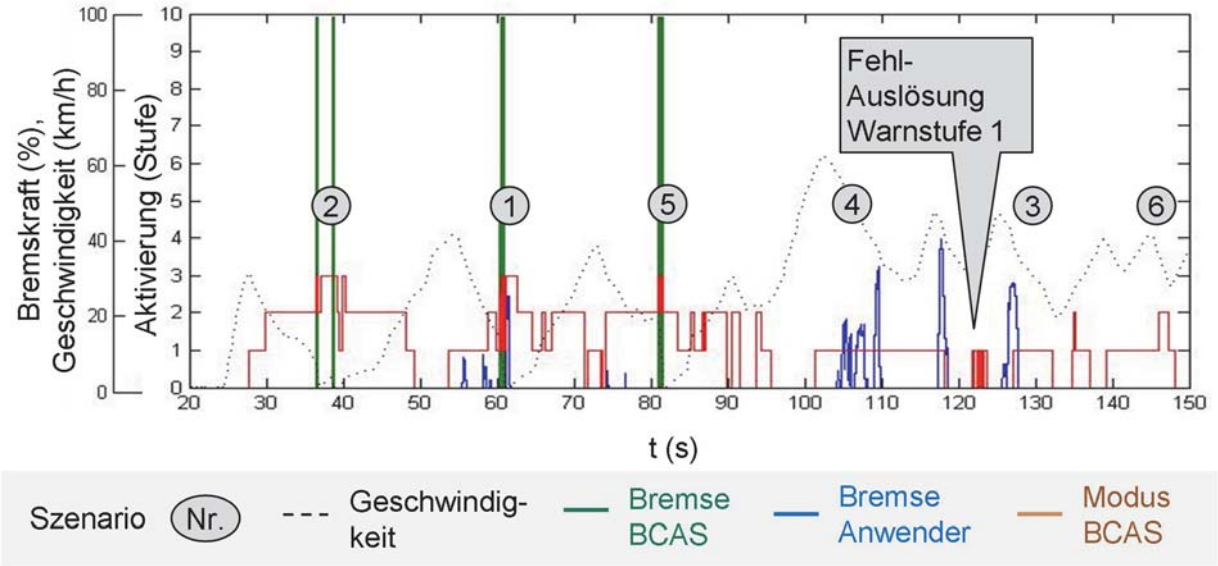


Abbildung 140: Exemplarische Testdaten des HPiL Tests (Unity3D) - BCAS Modus 2

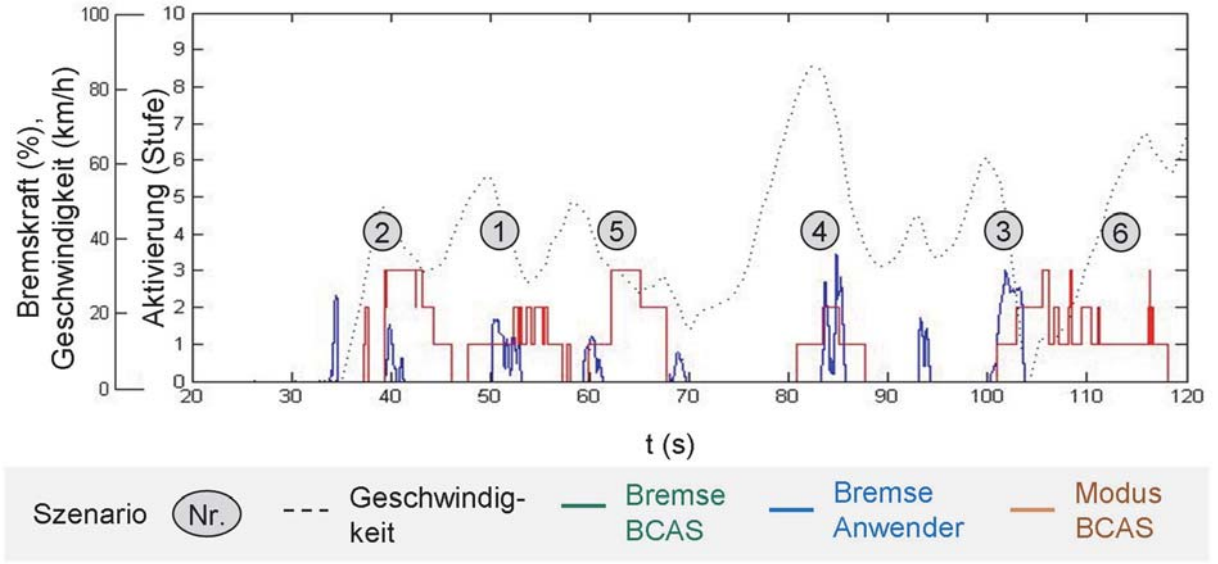


Abbildung 141: Exemplarische Testdaten des HPiL Tests (dSpace) - BCAS Modus 1

Wie beschrieben ermöglicht Testszenario 6 den Test außerhalb der Systemgrenze des BCAS. Es ist aber auch ein Test an der Systemgrenze möglich. Exemplarisch kann dies anhand der in **Abbildung 139** dargestellten Testdaten gezeigt werden. Der Anwender überholt das Fahrrad und setzt dabei den Blinker. Das BCAS reagiert bei kritischer Annäherung an das Fahrrad mit einem harten Bremseingriff, zu erkennen in **Abbildung 139** bei etwa t = 120s. Dieser findet bei einer Geschwindigkeit von etwa 80km/h während einer Lenkbewegung durch den Fahrer statt: Eine hochkritische Situation für die Fahrzeug-Stabilität, die während der Tests in mehreren Fällen zum Kontrollverlust und ausbrechen des PKWs geführt haben. Im Test an der Systemgrenze des BCAS konnte demnach ein Fehler identifiziert werden, der zu einer Nicht-Beherrschbarkeit des BCAS in einer hochkritischen Situation führt.

Die Nutzung einer durchgängigen Teststrecke ermöglicht eine Evaluation der Interaktion auf den „Verbindungsetappen“ außerhalb der eigentlichen Testszenarios. So wurden dort verschiedene, zuvor unentdeckte Fehl-Auslösungen der visuellen Anzeige

beobachtet und im Test durch die Probanden kritisiert. In **Abbildung 140** ist eine solche Fehlauslösungen erkennbar: Nach Durchfahrung von Szenario 4 kommt es bei etwa t = 122s zu einer Fehl-Auslösung der Warnstufe 1, obwohl kein Fahrrad in der Nähe ist. Die Detailanalyse zeigt hier einen Sensorfehler. So wird durch den linken Sensor irrtümlich ein Objekt erkannt. In der nachträglichen Befragung gaben Anwender einen Zusammenhang mit der schlechten Bewertung von Beherrschbarkeitskriterium 6 an. In beiden aufgeführten Fällen konnten neuartige, zuvor nicht erkannte Fehlertypen entdeckt werden. Es konnte somit klar gezeigt werden, dass Beherrschbarkeit-Kriterien im HPiL Test in gegenüber dem KS Test **höherer Qualität geprüft** werden können *(→ Anforderung A14).*

Im **Vergleich zwischen den Setups im HPiL Testsetups** zeigen die Messdaten eine höhere Dynamik der Fahrt des Anwenders im HPiL Test (dSpace ASM). So ist die Bremskraft des Anwenders im HPiL (dSpace ASM) Test im Schnitt 15-20% höher als im HPiL Test (Unity3D). Die erreichte Maximalgeschwindigkeit sogar um bis zu 50%. Daraus ergeben sich die für das BCAS kritischeren Situationen im HPiL Test (dSpace ASM). Wie in den Messwerten aus **Abbildung 139** und **Abbildung 140** erkennbar ist, greift die höchste Warnstufe 3 des BCAS öfter ein und bremst den PKW.

[2] Analyse der Beobachtungsprotokolle, Zeitnahme Kameraaufzeichnungen und Screencasts.

Aus den in Kapitel 7.4.2 beschriebenen Beherrschbarkeits-Nachweisen kann auf die Angemessenheit und Passgenauigkeit der Mensch-Maschine Schnittstelle des hybriden BCAS Prototyps gefolgert werden *(→ Anforderung A1).* Die Kameraaufzeichnungen und Screencasts zeigen bei der nachträglichen Analyse natürlich wirkende Interaktionen zwischen Anwender und hybridem BCAS Prototyp. Durch die Anpassung der Touch-Bedienflächen des BCAS konnte gegenüber der ersten Evaluationsstudie die Bedienbarkeit des Touchscreens verbessert werden. Die Kameraaufzeichnungen des HPiL Test (Unity3D) zeigen Probleme vieler Anwender, bei höherer Geschwindigkeit in Kurven auf der Fahrbahn zu bleiben. Diese Beobachtung kann durch die zu geringe Framerate der Unity3D Visualisierung erklärt werden. Der Anwender erhält eine verzögerte visuelle Rückmeldung der Fahrzeugbewegung. Bei Kurvenfahrt wird die relative Position des PKWs zur Kurve falsch eingeschätzt, der Anwender neigt dazu, den PKW weniger stark einzulenken als es erforderlich wäre. Eine Korrelation dieser Beobachtungen mit den Probandendaten zeigt, dass Anwender mit viel Videospielerfahrung in dieser Situation weniger große Probleme haben als solche mit wenig oder gar keiner Videospielerfahrung.

[3] Nachträgliche Befragung der Probanden mit Fragebögen

Die Analyse der in **Abbildung 138** dargestellten **Bewertung der Beherrschbarkeit** durch die HPiL Anwender zeigt: Die Beherrschbarkeit des BCAS wird für die meisten Beherrschbarkeits-Kriterien im KS Test höher bewertet als in beiden HPiL Tests. Durchschnittlich wird das BCAS mit der Bewertung 4,1, bei beiden HPiL Tests mit der Bewertung 3,9 bewertet. Eine Vorerfahrung der Anwender mit vergleichbaren FAS, beispielsweise Abstandswarnsystemen und Kollisionsvermeidungssystemen, änderte diese Bewertung nicht wesentlich (KS Test: 4,2/4,1, HPiL Test (dSpace ASM und Unity3D): 4,0/3,9). Anwender, die entweder eine überdurchschnittliche Vorerfahrung mit Fahrsimulatoren oder in der FAS Entwicklung angaben, bewerteten das BCAS im Schnitt mit 3,8/3,8 (KS Test) und 3,7/3,6 (HPiL Test (dSpace AS und Unity3D)). Der gepaarte t-test zeigt für keinen dieser Vergleiche eine statistische Signifikanz der Unterschiede. Das BCAS wird in den Beherrschbarkeits-Kriterien 6, 12, und 17, deren

Bewertung den Kontext der Fahrt erfordert, bei allen drei Testbedingungen um 0,5 Bewertungspunkte schlechter bewertet als in den Anforderungen, in denen dieser Kontext nicht erforderlich ist. Diese Beherrschbarkeits-Kriterien werden im KS Test auch im Mittel um 0,2 Bewertungspunkte höher bewertet als in den HPiL Tests. Im Vergleich zu allen anderen Bewertungen ist Beherrschbarkeits-Kriterium 17 (Übersteuerbarkeit des BCAS) signifikant schlechter bewertet. Besonders häufig wird dieses Kriterium als nicht bewertbar bezeichnet (13 Nennungen). Probanden, die entweder eine überdurchschnittliche Vorerfahrung mit Fahrsimulatoren oder in der FAS Entwicklung angaben, gaben dabei sämtlich „keine Bewertbarkeit“ an. Auch im HPiL Test gaben 6 beziehungsweise 8 Probanden eine Nicht-Bewertbarkeit an. Es sind somit keine Vorteile einer Vorerfahrung erkennbar. Im Vergleich zwischen HPiL Test (dSpace ASM) und HPiL Test (Unity3D) ist nur bei der Bewertung der Beherrschbarkeits-Kriterium 17 ein größerer Unterschied von knapp 0,5 Bewertungspunkten erkennbar. Auch dieser Unterschied zeigt sich im gepaarten t-test als nicht signifikant.

Die **Beanspruchungshöhe** im jeweiligen Test durch die Probanden wird im NASA TLX Fragebogen erfragt *(→ Anforderung A4)*. Dabei mussten Aussagen zu verschiedenen Aspekten der Beanspruchung bei der Erfüllung der Testaufgabe auf einer Skala von 0% bis 100% bewertet werden. **Abbildung 141** zeigt die statistische Auswertung dieses Tests. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Anforderungen, der Aufwand sowie die Frustration bei allen drei Testverfahren im Mittel unterdurchschnittlich hoch, also geringer als 50% eingeschätzt werden. Selbiges gilt auch für die Aufgabenausführung. Auch hier zeigt die Einschätzung aller Anwender unterdurchschnittliche bis maximal durchschnittliche Qualität. Der KS Test wird am wenigsten beanspruchend eingeschätzt. So sind hier sowohl die geistigen, körperlichen und zeitlichen Anforderungen am niedrigsten. Auch der Aufwand und die Frustration wird im Vergleich am geringsten eingeschätzt. Hinsichtlich der Qualität der Aufgabenausführung werden dagegen beide HPiL Tests als besser eingeschätzt. Der gepaarte t-test zeigt für den Vergleich zwischen KS Test und HPiL Test (Unity3D) für sämtliche Aspekte eine statistische Signifikanz. Der Vergleich zwischen KS Test und HPiL Test zeigt dagegen keine Signifikanz. Der Vergleich der beiden HPiL Testverfahren zeigt: Der HPiL Test (Unity3D) wird geistig und körperlich anfordernder, aufwändiger und frustrierender eingeschätzt. Die Aufgabenausführung wird dagegen besser eingeschätzt. Eine Signifikanz ist jedoch in keinem der Fälle nicht erkennbar.

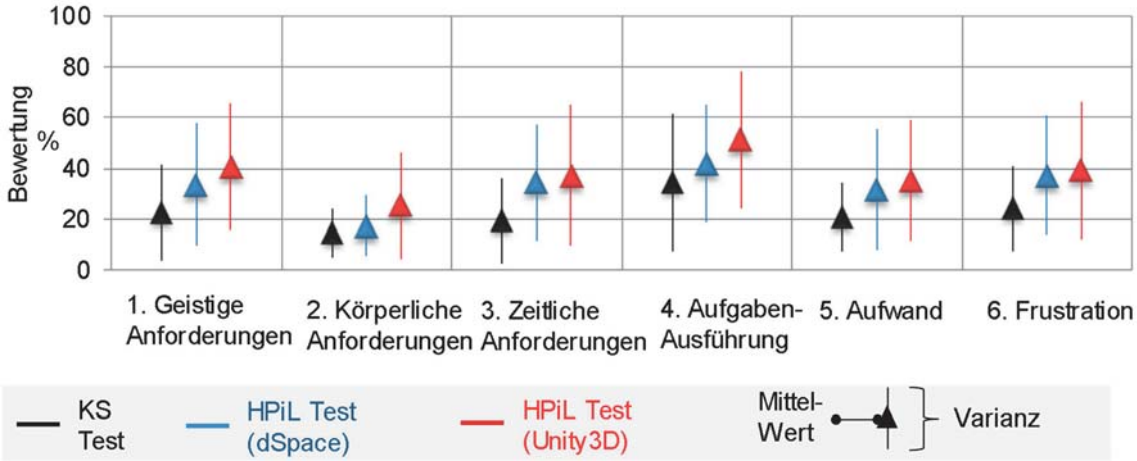


Abbildung 142: Beurteilung der Beanspruchungshöhe in der 2. Evaluationsstudie

Im Fragebogen **meCUE zur Bewertung des Produkterlebnisses** müssen die Anwender nach jedem Test eine Bewertung von insgesamt 28 Aussagen zum BCAS in einer 7-stufigen Bewertungsskala von „Stimme zu“ bis „Lehne ab“ vornehmen. Abschließend wird ein differenziertes Gesamturteil auf einer 11-stufigen Skala abgegeben. **Abbildung 143** zeigt die statistische Auswertung dieses Tests. Der jeweilige Mittelwert ist gesondert markiert. Eine Bewertung oberhalb des Mittelwertes wird als positiv, unterhalb des Mittelwertes als negativ definiert.

Die Bewertungen können folgenden subjektiven Einschätzungen zugeordnet werden (nach Thüring und Miller 2014, S. 49):

- Die Werte in den Modulen I und II zu Produktwahrnehmung zeigen eine gute Wahrnehmung der Nützlichkeit sowie der Bedien- und Erlernbarkeit des BCAS. Das Produkt wird damit als intuitiv wahrgenommen. Die visuelle Ästhetik des BCAS wird durchschnittlich wahrgenommen. Es wird es jedoch nicht als Statussymbol wahrgenommen. Darüber hinaus geben die Anwender eine nur sehr schwache Bindung zum BCAS an.
- Die Werte im Modul III (Nutzeremotion) zeigen sowohl unterdurchschnittliche positive wie auch negative Emotionen in der Nutzung des BCAS. Weder bewirkt dessen Nutzung Zufriedenheit, Entspannung oder Begeisterung noch ein Gefühl der Hilflosigkeit, Wut oder Frustration beim Nutzer.
- Nutzungsintention und Produktloyalität werden im Modul IV leicht unterdurchschnittlich bewertet. Das BCAS motiviert nicht zum weiteren Gebrauch, es schreckt eher ab und es wird kein entschiedener Vorteil im Vergleich zu anderen Produkten erkannt.
- Zusammenfassend geben die Anwender als Gesamturteil eine **negative Bewertung** von durchschnittlich -0,8 Bewertungspunkten für das BCAS an.

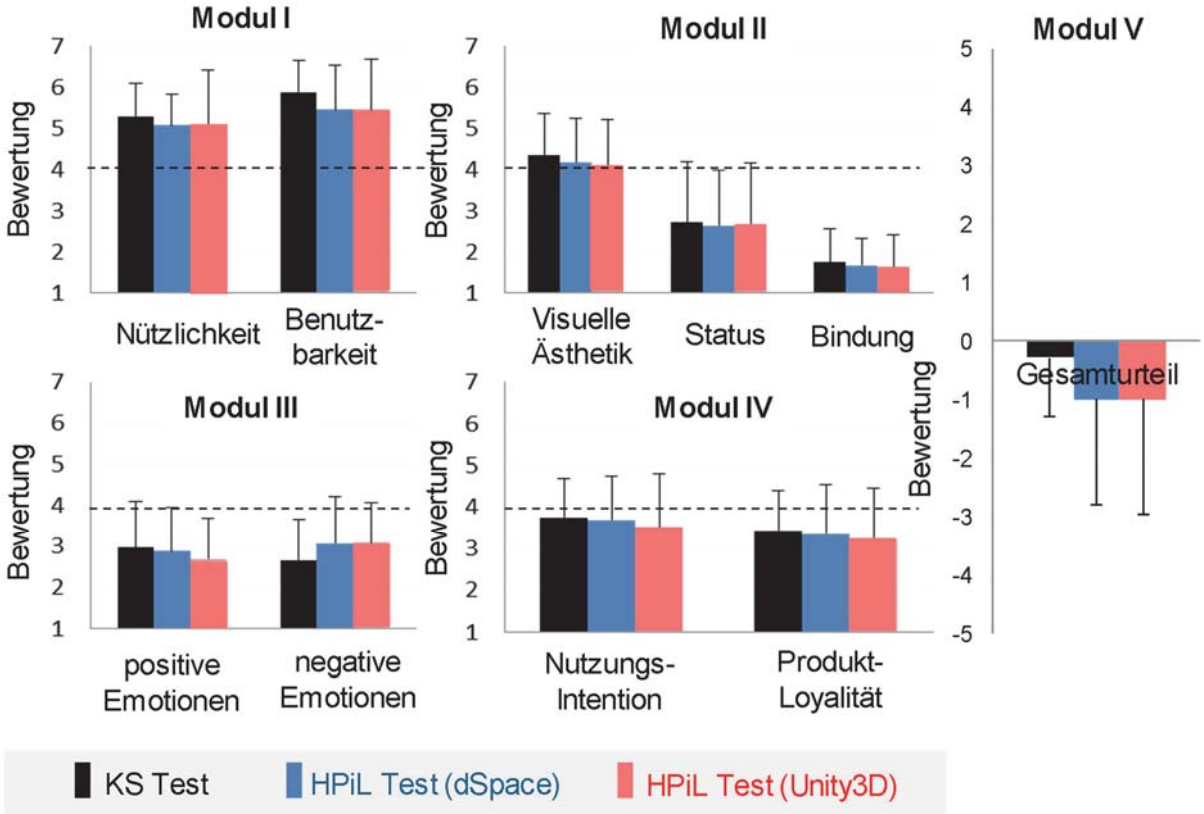


Abbildung 143: Bewertung des Produkterlebnisses durch die Anwender in der 2. Evaluationsstudie

Die durchschnittliche Bewertung des Produkterlebnisses mit dem BCAS unterscheidet sich in allen Testverfahren um maximal 0,6 von 7 Bewertungspunkten. Das BCAS wird im KS Test in allen Produkterlebnis-Kategorien positiver wahrgenommen als in den HPiL Tests. Im gepaarten t-Test zeigen die Unterschiede zwischen KS Test und HPiL Test (dSpace ASM und Unity3D) in den Aspekten Nützlichkeit, Benutzbarkeit sowie negativen Emotionen eine statistische Signifikanz. Weiterhin zeigt auch der Vergleich KS Test und HPiL Test (Unity3D) eine statistische Signifikanz im Aspekt der positiven Emotionen. Der Vergleich der beiden HPiL Tests zeigt leicht unterschiedliche Bewertungen, eine Signifikanz ist aber nicht erkennbar.

Nach Abschluss aller drei Tests wurden die Anwender zur **Bewertung der Beherrschbarkeit im Vergleich** der eingesetzten Testverfahren befragt. In der Befragung sollten die Anwender sollten das für jedes der 12 Beherrschbarkeits-Kriterien das zum Nachweis der Beherrschbarkeit am besten, zweitbesten und drittbesten geeignete Testverfahren auswählen. Die Anwender vergaben dazu die Noten 1 (bestgeeignetes Testverfahren) bis Note 3 (am wenigsten geeignetes Testverfahren). Eine Mehrfach-Vergabe derselben Bewertung war möglich. Sowie die Angabe „Bewertung ist nicht möglich“. **Abbildung 144** zeigt die statistische Auswertung dieser Befragung.

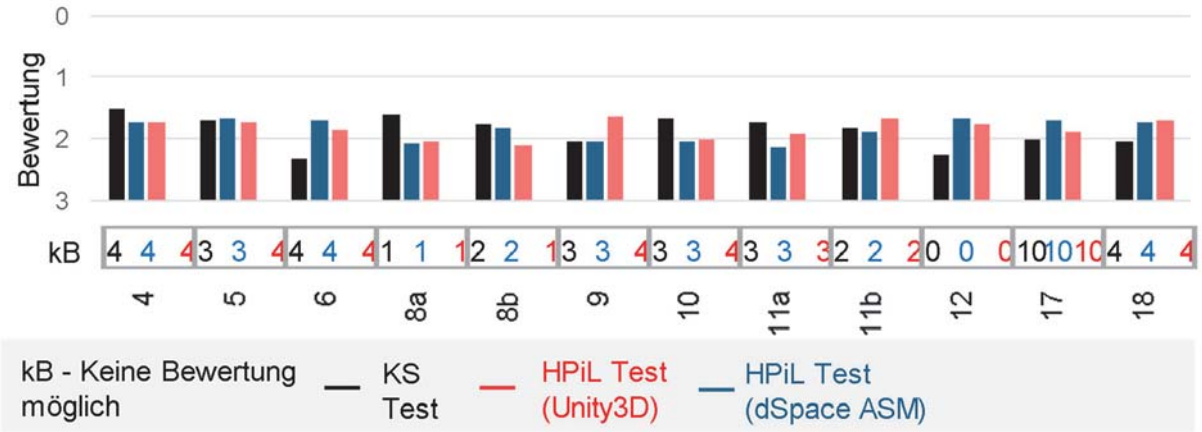


Abbildung 144: Bewertung der Anwender zum Vergleich der Testverfahren

Im Vergleich der KS Test und der HPiL Tests sind jeweils Präferenzen der Anwender für den Nachweis der einzelnen Beherrschbarkeits-Kriterien erkennbar. So wird der KS Test durch eine Mehrheit der Anwender für den Nachweis der *Beherrschbarkeitskriterien 4, 8a, 10 und 11a* am besten geeignet eingeschätzt. Beide HPiL Tests werden mit vergleichbarer Note für den Nachweis der *Beherrschbarkeitskriterien 6, 12, 17 und 18* am besten geeignet eingeschätzt. Der HPiL Test (Unity3D) wird gegenüber dem KS Test und HPiL Test (dSpace) für den Test der *Beherrschbarkeits-Kriterien 9 und 11b* geeigneter eingeschätzt. Um die Signifikanz dieser Unterschiede einschätzen zu können, wurden gepaarte t-Tests berechnet. Bei zwei Vergleichen wurde eine statistische Signifikanz für ein Signifikanzniveau von $\alpha < 0.05$ ermittelt. So wurde der HPiL Test (dSpace) gegenüber dem KS Test sowohl für den Test der Angemessenheit der Warnungen hinsichtlich deren Kritikalität für die Verkehrssituation *(Beherrschbarkeitskriterium 6*) als auch deren Wahrnehmbarkeit in typischen relevanten Verkehrssituationen (*Beherrschbarkeitskriterium 12*) für signifikant besser geeignet eingeschätzt.

Der Vergleich der HPiL Tests zeigt Präferenzen der Probanden für den Einsatz des HPiL Tests (dSpace ASM) für den Test von Beherrschbarkeits-Kriterien, die einen Kontext der Fahrt benötigen *(Beherrschbarkeitskriterien 6, 12, 17*). Auch die Eindeutigkeit von Warnungen des BCAS wird hier besser beurteilbar eingeschätzt *(Be-*

herrschbarkeits-Kriterium 8a). Der HPiL Test (Unity3D) wird dagegen für die Bewertung der Anzeigen und Bedienelemente, die keinen Kontext der Fahrt benötigen, als besser nutzbar bewertet *(Beherrschbarkeitskriterien 9, 11a, 11b, 18). Beherrschbarkeits-Kriterium 17* erfragt die Eignung der Testverfahren für den Test der Übersteuerbarkeit des BCAS. Wie in Kapitel 7.4.1 beschrieben, wurde die Funktion „Übersteuerbarkeit“ für die 2. Evaluationsstudie entfernt. Durch jeweils 10 der 24 Anwender wurde korrekt erkannt, dass keine Bewertung möglich ist.

In Bezug auf die an die zweite Evaluationsstudie gestellten Anforderungen (A1), (A2), (A3), (A4), (A9) und (A14) kann damit das folgende Fazit gezogen werden:

Durch HPiL Test des hybriden BCAS-Prototyps konnten insgesamt 24 der 26 Beherrschbarkeitskriterien getestet werden. Das nicht testbare Kriterium 26 („Fahrerhandlungen zum übersteuern des Systems sind intuitiv“) wurde durch das Versuchsdesign der Evaluation ausgeschlossen, die erforderlichen Funktionen wurden aus dem BCAS entfernt. Auch der Test des zweiten, nicht testbaren Kriteriums 13 („Der Betrieb oder die Überwachung des Systems kann ohne eine große Änderung der Aufmerksamkeit des Fahrers in dessen Fahraufgabe durchgeführt werden.“) ist, wie in Kapitel 7.4.2 beschrieben, durch das Versuchsdesign eingeschränkt. Es konnte gezeigt werden, dass der hybride BCAS Prototyp sowie der HPiL Test für den Test der Beherrschbarkeit geeignet und aufgabenangemessen ist. Im Test konnte ein Nachweis für die Beherrschbarkeit für 14 dieser 24 Beherrschbarkeitskriterien erbracht werden. Wie in Kapitel 7.4.1 gezeigt wurde, bilden die Probanden der zweiten Evaluationsstudie den „Normalfahrer“ hinreichend für den Test eines FAS im urbanen Raum ab. Die Probandengruppe der naiven Probanden, die im Test die Rolle des Anwenders einnehmenden, sind glaubwürdig. Die Bewertungen sowie die Beobachtungen der Testleiter zeigen eine Verständlichkeit der Anzeigen und Bedienelemente des hybriden BCAS Prototyps für die Anwender. Sowie die Verständlichkeit und Durchführbarkeit der Aufgaben im HPiL Test. Durch Abgleich mit den Probandendaten konnte gezeigt werden, dass Vorerfahrungen im Fahrsimulator oder in der Entwicklung von FAS die Bewertungen der Beherrschbarkeit nicht signifikant ändern.

Im Vergleich der zwei Visualisierungsoptionen „dSpace ASM“ und „Unity3D“ zeigen die Befragungen keine statistisch signifikanten Unterschiede. Es lassen sich aber Tendenzen erkennen: So wird der HPiL Test (Unity3D) wird anfordernder, aufwändiger und frustrierender eingeschätzt. Die Aufgabenausführung wird dagegen besser eingeschätzt. Auch wird das Produkterlebnis im HPiL Test (Unity3D) mehrheitlich schlechter bewertet. In der Einschätzung des direkten Vergleiches gaben die Probanden Präferenzen für die Nutzungsfelder der beiden Visualisierungsoptionen an: Der HPiL Test (dSpace ASM) wird für den Test von Beherrschbarkeits-Kriterien, die einen Kontext der Fahrt benötigen, für besser eingeschätzt. Der HPiL Test (Unity3D) wird dagegen für die Bewertung der Anzeigen und Bedienelemente, die keinen Kontext der Fahrt benötigen, als besser nutzbar bewertet. Trotz Limitationen der Testumgebung in der Darstellung der virtuellen Fahrt – unter anderem resultierend durch Einschränkungen im Bewegungssystems, der Visualisierung oder der Abbildung der Ergonomie des PKWs – weisen die Beobachtungen und erfolgreichen Tests der Beherrschbarkeit darauf hin, dass die Probanden mehrheitlich die erforderliche Anpassungsleistung erbringen können. Sowie mit Störgrößen resultierend aus den Einschränkungen, umgehen können. Die Qualität der Testumgebung sowie die Fähigkeit der Probanden, Störgrößen abzufangen und mit Einschränkungen umzugehen, führen zu einer hohen internen Validität der 2. Evaluationsstudie.

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, stellen neuartige, hochautonome Fahrfunktionen ab SAE Level 3 hohe Herausforderung an den zukünftigen Beherrschbarkeits-Test. Nachfolgend sollen im Rahmen der dritten Evaluationsstudie exemplarisch die Fähigkeit des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahrens für den Beherrschbarkeits-Test verschiedener, mit dem hoch autonomen Fahren verknüpfter Gestaltungstrends gezeigt werden.

7.5 Beherrschbarkeits-Test zukünftiger, hochautonomer Fahrerassistenzsysteme

Die Umsetzung hochautonomer Fahrzeuge erfordert die Zusammenführung verschiedener Fähigkeiten heutiger FAS. So müssen für eine vollständige Fahrzeugautonomie sowohl die Lenkung, die Geschwindigkeitsteuerung als auch die Überwachung der Fahrumgebung und des Fahrzeugs durch das zukünftige FAS übernommen werden. Zudem muss die wechselseitige Übergabe zwischen Fahrer und System durch passend gestaltete Anzeigen und Bedienelemente gehandhabt werden (vergleiche Kapitel 3.1). Die fahrzeuginterne Vernetzung verschiedener bestehender FAS ist daher eine wichtige Grundlage für die Entwicklung neuartiger hochautonomer Fahrzeuge. Diese Systeme werden durch eine **zunehmende Intelligenz** und **Individualisierung für die spezifischen Bedürfnisse und Wünsche des Fahrers** gekennzeichnet sein. Die dritte Evaluationsstudie dient der Untersuchung der Nutzbarkeit des HPiL Tests für die Untersuchung dieser für das hochautonome Fahren wichtigen zwei Gestaltungstrends. Im ersten Teil der Evaluation soll die Beherrschbarkeit eines kundenindividuellen Bicycle Collision Avoidance Systems (BCAS) im Test mit naiven Probanden ohne Bezug zum Entwicklungsprozess getestet werden. Im zweiten Teil der Evaluation soll die Beherrschbarkeit des BCAS in einer Multi-FAS Interaktion mit einem weiteren, in die Lenkung des PKWs eingreifenden FAS getestet werden. Das **Lane Keeping Assistant System (LKAS)** ist ein aktives Spurhalte-FAS, das auf Kamera-Sensoren zur Erkennung der Fahrstreifen der Straße basiert. Werden links und rechts vom PKW Fahrstreifen erkannt, wird dieser durch einen Aktor-Eingriff in die Lenkung in die Fahrbahnmitte positioniert. Das LKAS stellt ein FAS nach SAE Level 1 dar. **Tabelle 38** klassifiziert diese beiden Systeme entsprechend der Vorgaben aus Kapitel 3.1.1.

Tabelle 38: Kategorisierung des BCAS und des LKAS im Anwendungsfall

SAE Level	Bezeichnung Fahrerassistenzsystem	Informations-Beschaffung				Eingriff			Anzeige		
		Fahrzeug-Sensor	Umfeld-Sensor	Fahrer-Sensor	Car2X	In Bremssystem	In Lenksystem	In Motorsteuerung	Visuell	Akustisch	Haptisch
1	Kunden-individuelles Bicycle Collision Avoidance System (BCAS)	x	x		o	x		o	x	x	x
1	Lane Keeping Assistant System (LKAS)	x	x				x		x		

Legende: **x**: Erforderlich, **o**: Optional

Werden beide FAS gleichzeitig betrieben, wird sowohl Lenkung wie auch Geschwindigkeitssteuerung übernommen: Der PKW ist partiell automatisiert, das gekoppelte FAS entspricht damit einem SAE Level 2 System. Die Modellierung des LKAS wird im CASE-Tool MATLAB/Simulink durchgeführt. MATLAB/Simulink ist das in vielen Bereichen gebräuchlichste Tool für die System-Simulation und Analyse (Abel und Bollig 2006, S. 30; Bieser 2007, S. 53). MATLAB/Simulink findet beispielsweise Anwendung in der Entwicklung von Antrieben, FAS, Batteriesystemen oder Aktorik (nach Seiffert und Rainer 2008, S. 167; MathWorks). **Abbildung 145 (Links)** zeigt den in MATLAB/Simulink modellierten Prototyp des LKAS, bestehend aus Sensor-Steuergerät SS_U, Steuerung C und Energiesteller ES. Der Messfühler S_U zur Erfassung der Fahrstreifen ist in dSpace ASM modelliert. Zur Interaktion mit dem Fahrer besitzt das LKAS eine Touchscreen-Fläche in der Mittelkonsole, deren im AP Tool erstellten digitalen Anzeigeinhalte in **Abbildung 145 (Rechts)** dargestellt sind. Eine Bedienung dient der Aktivierung/Deaktivierung des LKAS.

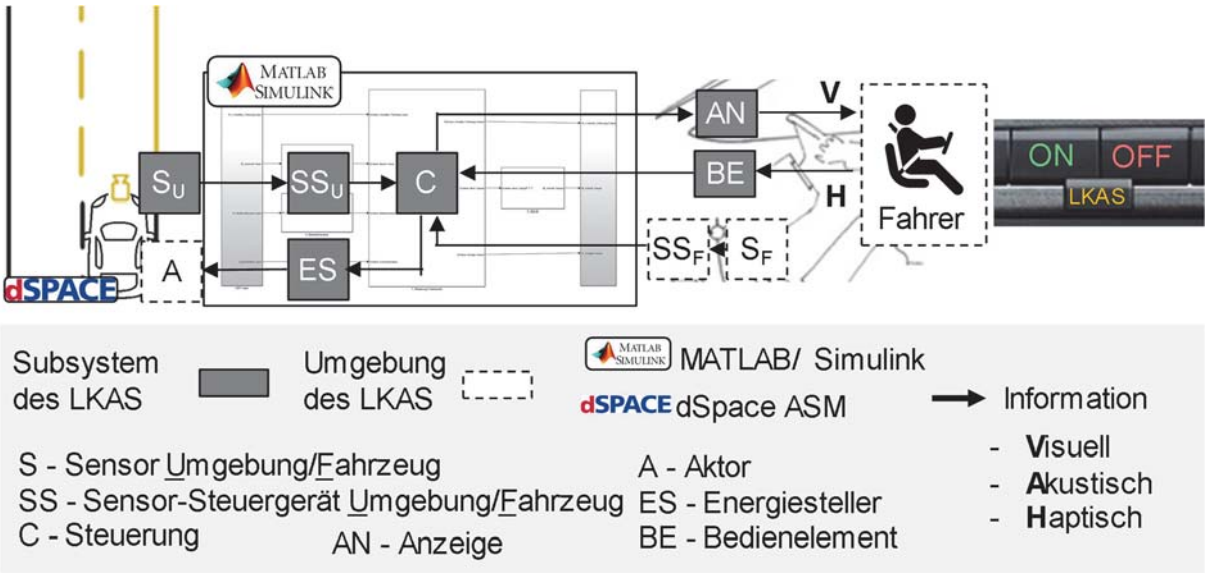


Abbildung 145: Teilsystem-Prototypen des LKAS – (Links) Prototyp des mechatronischen Regelsystems, (Rechts) Prototyp des Touchscreens des LKAS

Versuchsdesign der dritten Evaluationsstudie

An der dritten Evaluationsstudie nehmen insgesamt 7 Probanden teil. Die Stichprobe hat folgende Charakteristika: Ein Frauenanteil von rund 14%, ein Altersdurchschnitt von 32 Jahren (Standardabweichung SA = 4 Jahre). Die Probanden gaben eine durchschnittliche Fahrerfahrung von 14 Jahren an. Die mittlere jährliche Fahrleistung wurde durch zwei Probanden mit geringen Fahrleistungen bis zu 500km angegeben. Ein Proband gab Fahrleistungen von 500-5000km an, zwei Probanden Fahrleistungen von 5000-15000km und zwei Probanden Fahrleistungen von mehr als 15000km. Hinsichtlich dieser Charakteristika ist dieses Probandengruppe mit der Probandengruppe der zweiten Evaluationsstudie vergleichbar. Daher wird analog zu dieser angenommen, das der „Normalfahrer“ für den Test eines FAS im Urbanen Raum hinreichend abgebildet und damit **glaubwürdig** ist.

Die Probanden gaben mehrheitlich Vorerfahrungen mit FAS an (6 Nennungen). Im Rahmen der Studie sind die Vorerfahrungen mit Abstandswarnsystemen (3 Nennungen) sowie Kollisionsvermeidungssystemen (1 Nennung) hervorzuheben. Für die Bewertung von FAS sind diese Vorerfahrungen hilfreich, da auch eine eingeschränkte

Abbildungsqualität eine Übertragungsleistung durch den Probanden erlaubt. Durch etwa die Hälfte der Probanden wurde keine bis wenig Vorerfahrung in Fahrsimulatorstudien angegeben. Insgesamt gaben 4 der 6 Probanden an, regelmäßig PC Spiele zu spielen. Die geringe Fahrsimulator-Vorerfahrung der Mehrheit der Probanden lässt Anpassungsschwierigkeiten im Fahrsimulator erwarten. Die Nutzung von PC Spielen durch die Mehrheit der Probanden sollte den Umgang mit der digitalen Versuchstechnik vereinfachen. Es kann angenommen werden, dass die Probandengruppe gute Fähigkeiten ausweist, mit Störgrößen umzugehen, die sich aus Einschränkungen der Versuchstechnik ergeben. Es kann damit eine **gute interne Validität** der Tests angenommen werden.

Zur Beurteilung des Kriteriums der **Übertragbarkeit** wird in **Kapitel 7.6 eine Evaluation** mit einem anderen Testsetup durchgeführt. Der geringe Umfang der Probandengruppe lässt nicht erwarten, dass sich die Ergebnisse auch bei größerer Anzahl an Probanden oder geänderter Testdauer nicht wesentlich verändern. Die dritte Evaluationsstudie ist damit nicht **zuverlässig**. Es kann zusammengefasst werden:

Die dritte Evaluationsstudie ist glaubwürdig und zeichnet sich durch eine hohe interne Validität aus. Die Übertragbarkeit wird später beurteilt. Durch die geringe Probandenanzahl ist keine Zuverlässigkeit gegeben. Die Qualität der Nutzerstudie ist damit stark limitiert, Ergebnisse und Erkenntnisse sind nur eingeschränkt nutzbar.

Die **Evaluation wird in zwei Teilen** durchgeführt, die jeweils eine Testbedingung mit zwei verschiedenen Varianten im 2x1 Within-Subject Design gegeneinanderstellen:

Teil 1 der Evaluation testet **zwei verschiedene individualisierte BCAS** gegeneinander. Es werden die Parameter „Zeit bis zur Kollision“ t_{TC} sowie „Bremsverzögerung des BCAS“ paarweise angepasst. Entsprechend löst Variante A des BCAS erst spät die Warnungen sowie die Notbremsung aus, verzögert dafür mit hoher Bremsverzögerung. Variante B warnt und bremst frühzeitig, verzögert dafür weniger stark. Das Versuchsdesign ist in **Tabelle 39** abgebildet.

Tabelle 39: Versuchsdesign „BCAS Varianten“

Testdesign: 2x1 within-subject Design		**Stichprobengröße:** N= 7
Test-bedingung: Mechatronik-Parameter	**Variante 1**	BCAS Variante A time to collision t_{TC} klein, hohe Brems-Verzögerung
	Variante 2	BCAS Variante B time to collision t_{TC} groß, geringe Brems-Verzögerung

Die Probanden übernehmen die Rolle des Anwenders. Beide BCAS Varianten werden nach Abschluss des Tests im Fragebogen „Vergleich der BCAS Varianten“ bewertet. Der Fragebogen, der in **Anhang G** dargestellt ist, beinhaltet den Vergleich der BCAS-Varianten hinsichtlich Stresslevel, Aufgabenerfüllung und Reaktion auf Kritikalität der Verkehrssituation. Abschließend wird erfragt, welche der zwei Varianten durch die Probanden im Kauf bevorzugt würde.

Teil 2 der Evaluation vergleicht die **Beherrschbarkeit des durch die Probanden bevorzugten BCAS mit der kombinierten Nutzung von BCAS und LKAS**. Das Versuchsdesign mit der Testbedingung „Eingesetztes FAS“ ist in **Tabelle 40** abgebildet.

Tabelle 40: Versuchsdesign „Multi-FAS Interaktion“

Testdesign: 2x1 within-subject Design		**Stichprobengröße:** N= 7
Testbedingung: **Eingesetztes FAS**	**Referenz:** **Single-FAS**	BCAS/ bevorzugte Variante
	Neue Bedingung: **Multi-FAS**	BCAS/ bevorzugte Variante + LKAS

Im standardisierten Fragebogen „wahrgenommenen Nützlichkeit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ geben die Anwender nach dem Test eine Einschätzung zur Nützlichkeit und Nutzbarkeit des BCAS beziehungsweise der Kombination aus BCAS und LKAS. Darüber hinaus dient der Fragebogen „Bewertung der Beherrschbarkeit“ der Bewertung ausgewählter Beherrschbarkeits-Kriterien. Es werden die Beherrschbarkeits-Kriterien 2 („Erwartungskonformität der Systemreaktion“), 6 („Angemessenheit von Warnungen“), 18 („Möglichkeit der Aktivierung/Deaktivierung“), 19 („Verständnis der Systemgrenzen“) und 20 („Verständnis des Systemfeedbacks auf Eingaben“) erfragt. Darüber hinaus wird die subjektive mentale Belastung des Probanden durch die wirkenden FAS erfragt. Der Fragebogen ist **Anhang G** zu entnehmen

Versuchsdurchführung der dritten Evaluationsstudie

Die Tests nutzen das in Kapitel 7.4 beschriebene Testlayout: Der Anwender sitzt in beiden Tests im FDS Fahrsimulator und interagiert mit den Anzeigen und Bedienelementen des BCAS. Im Test durchfährt der Proband die Teststrecke der zweiten Evaluationsstudie. Die Testszenarien werden wieder in der Sequenz 2, 1, 5, 4, 3, 6 durchfahren. Zur Visualisierung wird in allen Tests dSpace ASM eingesetzt.

Abbildung 146 zeigt den hybride BCAS/LKAS Prototyp für die dritte Evaluationsstudie.

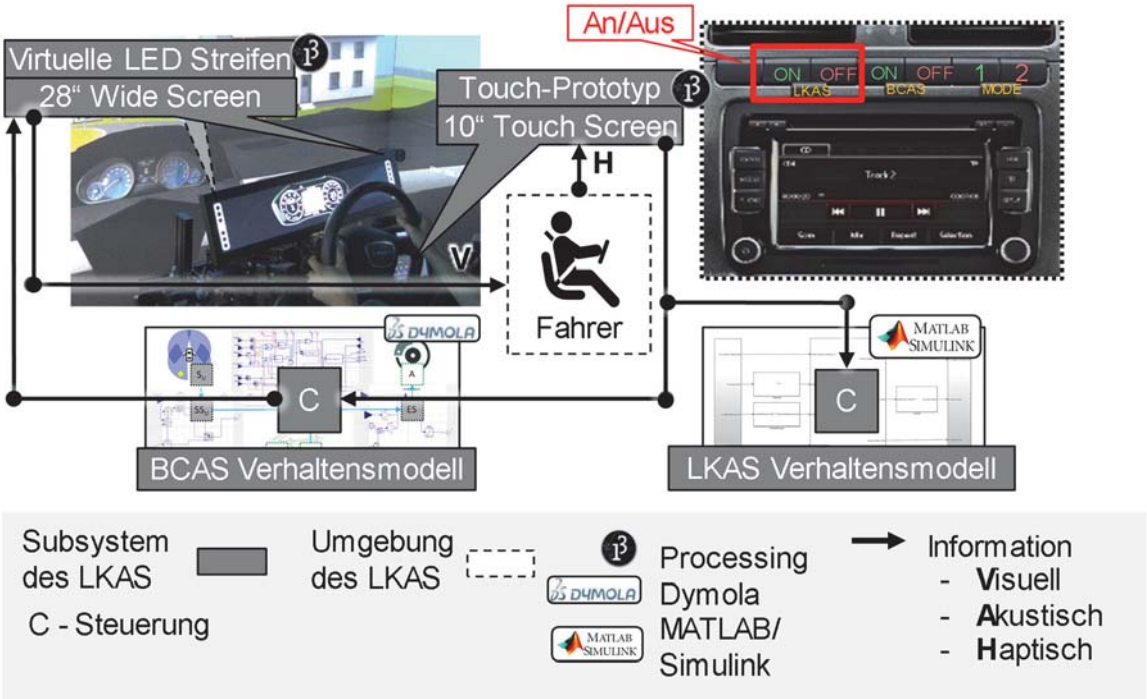


Abbildung 146: Erweiterter hybrider BCAS/LKAS Prototyp

Zur Erstellung des hybride BCAS/LKAS Prototyps wurde der in der zweiten Evaluationsstudie eingesetzte hybride BCAS Prototyp mit Hilfe des HPBench Baukastens wurde um ein weiteres Bedienelement für die Aktivierung/Deaktivierung der LKAS im Touchscreen erweitert. **Abbildung 146** zeigt dieses neue Bedienelement (On/Off) in der Mittelkonsole. Die nicht dargestellten akustischen und haptischen Anzeigen entsprechen dem hybriden BCAS Prototyp aus Abbildung 126. Um eine gegenseitige Beeinflussung mit dem BCAS zu untersuchen, wurde das mechatronische Regelsystem des LKAS vereinfacht modelliert. Insbesondere die bei Spurhalte-FAS übliche Abschaltung bei Aktivierung des Blinkers entfiel (vergleiche Herman et al. 2016).

Die folgende **Abbildung 147** zeigt die Unterschiede der im **ersten Teil der dritten Evaluationsstudie** eingesetzten BCAS Variante A und Variante B exemplarisch für Testszenario 2 (links abbiegen).

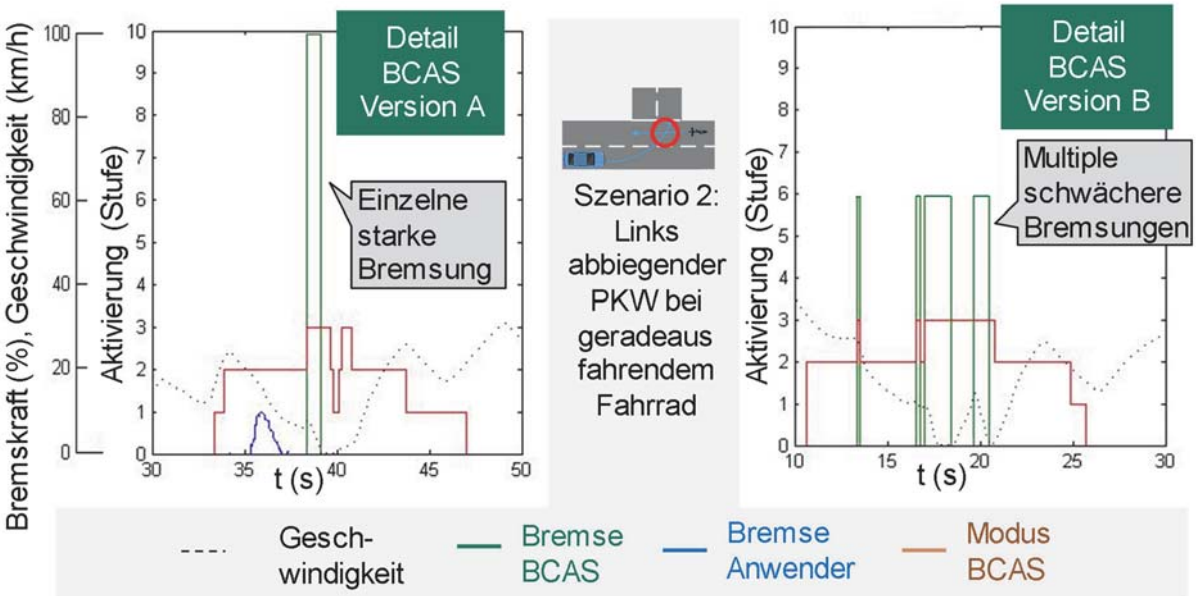


Abbildung 147: Exemplarischer Vergleich der Varianten des BCAS im Testszenario 2 (links abbiegen) – (Links) Version A, (Rechts) Version B

In der Abbildung ist erkennbar, dass der mit BCAS Variante A mit rund 40% höherer Bremskraft als der mit Variante B ausgerüstete PKW bremst. Dafür löst das BCAS die Notbremsung in Variante B früher aus, es wird also schneller und häufiger gebremst. Auch Warnungen sind erkennbar länger angezeigt. Im Test wurde eine frühere und damit häufigere Auslösung der Warnungen und der Bremse des BCAS für Variante B beobachtet. Insbesondere die frühere Notbremsung wirkte auf die Anwender irritierend, da die Situationen oft noch als unkritisch wahrgenommen wurden. Dagegen wurde die harte Bremsung bei Variante A als der Kritikalität angemessener wahrgenommen. In der Beherrschung der kritischen Situation wurde keine der zwei Varianten erkennbar bevorzugt.

Zur Ermittlung einer Einschätzung der zwei BCAS Varianten wurden die Probanden anschließend durch den Testleiter zu vier Einschätzungen befragt. **Abbildung 148** zeigt die Ergebnisse, die aus dieser Befragung resultieren. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei einem Kauf würden sich die Anwender mehrheitlich für Variante A des BCAS entscheiden. Ebenso wird Variante A mehrheitlich als angemessener reagierend und weniger stressig wahrgenommen. In der Ausführung der Aufgabe „Unfallvermeidung“ werden beide Varianten als in etwa gleichwertig bewertet.

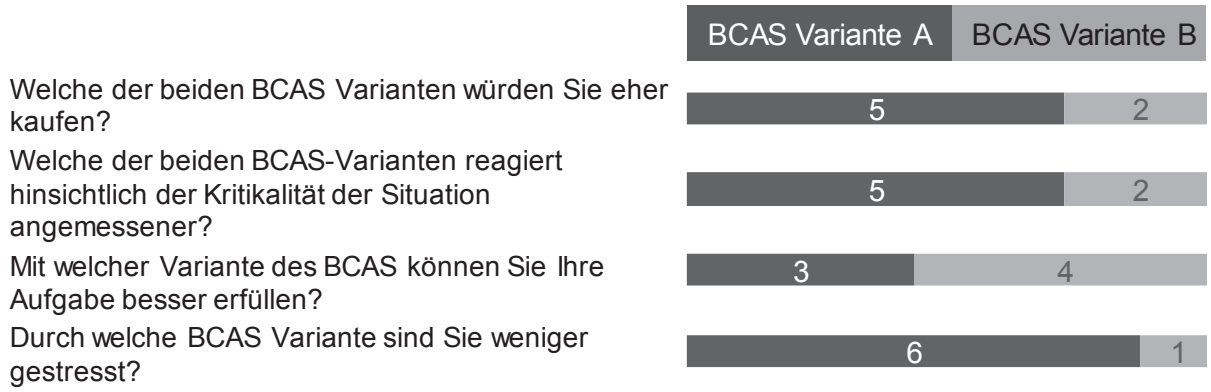


Abbildung 148: Vergleich der BCAS Varianten A und B durch die Anwender

Entsprechend der mehrheitlichen Präferenz der Anwender wurde BCAS Variante A im **zweiten Teil der Evaluationsstudie** weiterverwendet und in Interaktion mit dem LKAS eingesetzt. Exemplarisch zeigt **Abbildung 149** den Vergleich zwischen Messergebnissen in Testszenario 4 (PKW kreuzt Fahrrad längs) jeweils für die Single-FAS und die Multi-FAS Konfiguration

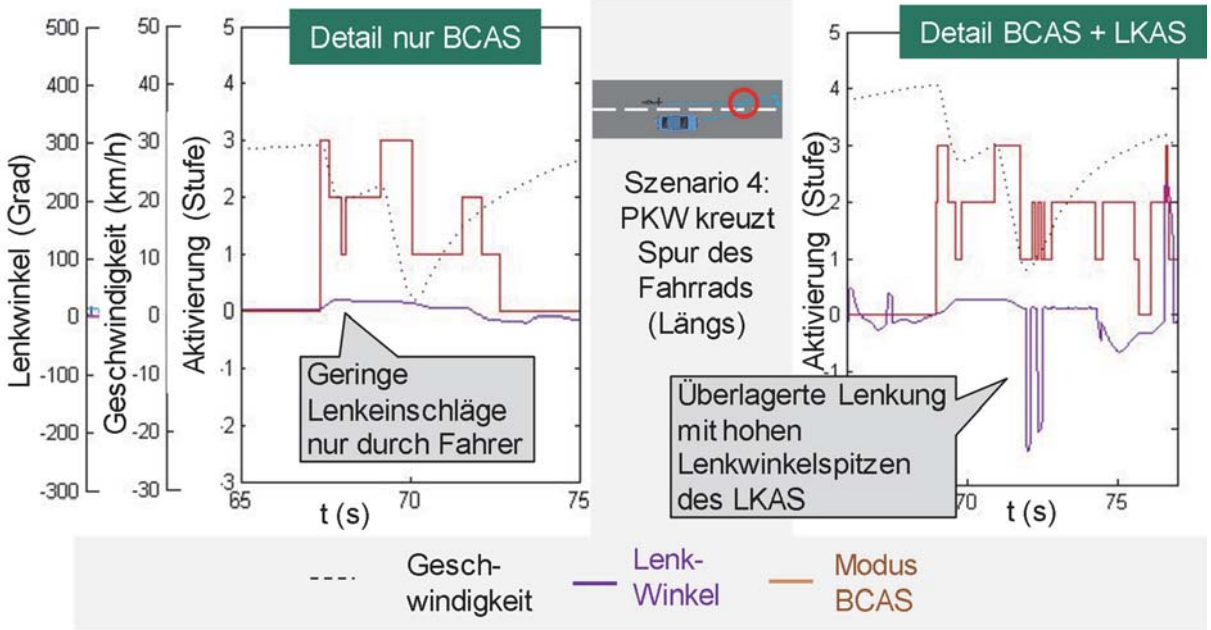


Abbildung 149: Exemplarischer Vergleich der Interaktion im Testszenario 4 (PKW kreuzt längs) – (Links) Single-FAS, (Rechts) Multi-FAS Konfiguration

Im Vergleich der Lenkwinkel beider Varianten zeigen sich hohe „Korrektur-Lenkwinkelspitzen“ des LKAS in der rechten Abbildung, während der Fahrer in der Linken Abbildung nur geringe Lenkwinkel für das Hochgeschwindigkeits-Überholmanöver einsetzt. Im Test wurde dazu ein vermehrtes Auftreten überkritischer Fahrsituationen insbesondere in Szenario 6 (Hochgeschwindigkeits-Überholmanöver) beobachtet. So führte die Überlagerung von Brems- und Lenkeingriff zu einer Destabilisierung der PKW Fahrt, die durch den Fahrer nicht mehr abgefangen werden konnte: Es kam zum Unfall.

Auswertung der dritten Evaluationsstudie

Die Ergebnisse des **ersten Teils der Evaluationsstudie** zeigen, dass Anwender im Test Unterschiede im Verhalten vergleichbar sicherer FAS detektieren und entsprechend individuelle Präferenzen zu diesen angeben können. Kundenindividuelle FAS können damit im Beherrschbarkeits-Test abgebildet und im HPiL Test getestet werden.

Für den **zweiten Teil der Evaluationsstudie** zeigt **Abbildung 150** die Auswertung des Fragebogens „Bewertung der Beherrschbarkeit“.

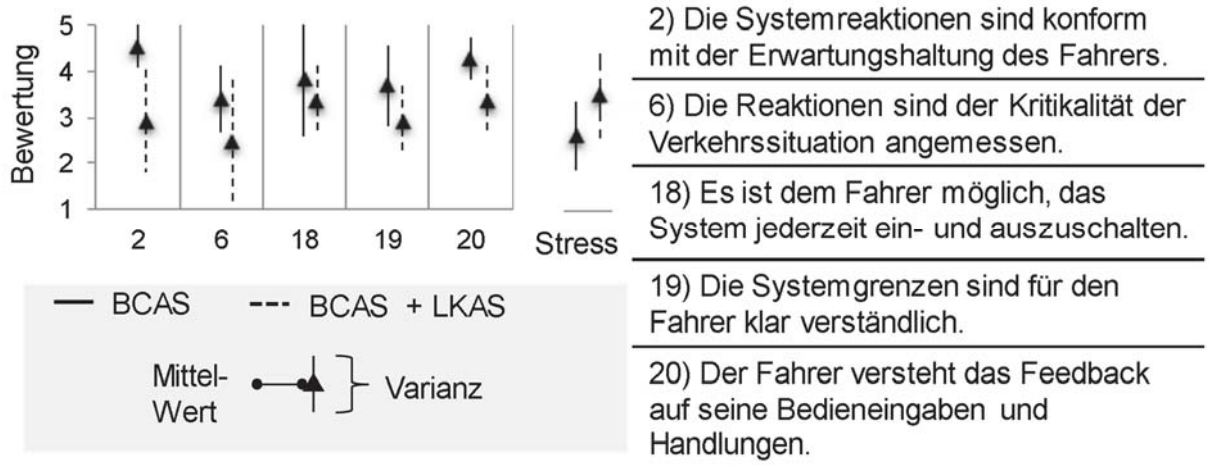


Abbildung 150: Bewertung der Beherrschbarkeit und des durch den Fahrer wahrgenommenen Stress im Vergleich der Single-FAS und Multi-FAS Konfiguration

Es werden durchgehend schlechtere Bewertungen Beherrschbarkeits-Kriterien des Multi-FAS im Vergleich zum BCAS vergeben. Der gepaarte t-test zeigt eine Signifikanz dieser Unterschiede für die Beherrschbarkeits-Kriterien 2 und 20. Der Stresslevel ist in der Multi-FAS Konfiguration signifikant höher als bei alleiniger Nutzung des BCAS. Die Ergebnisse dieses Tests zeigen, dass der HPiL Test sowie die HPiL Methodik geeignet sind, mehrere FAS in Interaktion zu testen, denn es können Wechselwirkungen der FAS entdeckt und deren Wirkung durch Anwender beurteilt werden.

Zusammenfassung und Fazit

In beiden Teilen der dritten Evaluationsstudie konnte durch Einsatz des HPiL Tests in **größerem Umfang Erkenntnisse** über das zu testende Fahrerassistenzsystem BCAS erlangt werden. Obwohl die Ergebnisse der dritten Evaluationsstudie wegen der geringen Probandenzahl keine statistische Signifikanz besitzen, konnte die Möglichkeit eines frühzeitigen **Tests kundenindividueller** sowie **vernetzter FAS** mit dem HPiL Test exemplarisch gezeigt werden. Der HPiL Test zeigte damit seine grundsätzliche Fähigkeit, zukünftige hochkomplexe FAS frühzeitig in beiden Regelkreisen der Fahrer-FAS-Interaktion hinsichtlich Beherrschbarkeit testen zu können.

Wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, erfordert die Beurteilung der Qualität einer Nutzerstudie die Beurteilung einer Analyse der Übertragbarkeit von Testergebnissen auf andere Testumgebungen. In der dritten Evaluationsstudie konnte durch den Einsatz des CASE-Tools MATLAB/Simulink für die Erstellung und Test des LKAS bereits gezeigt werden, dass eine Übertragbarkeit auf ein anderes CASE-Tool als Dymola möglich ist. Das nachfolgende Kapitel dient der Untersuchung, inwieweit eine Übertragbarkeit der HPiL Methodik auf andere Testumgebungen als den Functional Drive Simulators ein ähnliches Vorgehen ermöglicht und zu ähnlichen Ergebnissen führt.

7.6 Übertragbarkeit der HPiL Methodik in alternative Testumgebungen

Der Nachweis der Übertragbarkeit erfordert eine exemplarische Durchführung des HPiL Prozesses in der anderen Testumgebung. Für diese wird der in **Abbildung 151** dargestellte **Minimum Drive Simulator (MDS)** eingesetzt**.** Der MDS besteht aus den grundlegendsten Elementen zum Aufbau eines Fahrsimulators: Eine Lenkrad-Pedalerie-Kombination aus dem Consumer-Bereich ist an einem PC mit zwei PC Bildschirmen angeschlossen. Der Fahrer sitzt auf einem Bürostuhl. Der MDS ist damit dem in Abbildung 40 (Links) dargestellten einfachen Fahrsimulator auf Basis von Consumer-Geräten des Standes der Technik vergleichbar.

Abbildung 151: Minimum Drive Simulator für die Evaluation

Im Nachweis kommt neben der veränderten Fahrsimulator-Hardware auch ein anderes Simulationssystem, IPG Carmaker, zum Einsatz. IPG Carmaker wird beispielsweise in der Entwicklung bei den Fahrzeugherstellern PSA, unter anderem für die Marken Citroen, Peugeot, sowie BMW eingesetzt (IPG Automotive GmbH 2018a). Für eine Vergleichbarkeit mit vorherigen Ergebnissen wird der Anwendungsfall der ersten und zweiten Evaluationsstudie „Bicycle Collisson Avoidance Systems“ (BCAS) wiederverwendet. Durch den Einsatz von IPG Carmaker müssen die Messfühler des Sensors sowie der Aktor neu modelliert werden. Zudem müssen die Schnittstellen der HPBench Templates in Dymola und Processing angepasst werden

Zur Prüfung der Verwendbarkeit des MDS im Anwendungsfall wurde analog den Ausführungen in Kapitel 5 eine Analyse und Bewertung dessen Gestaltungsparameter im Prozessschritt **HPBench Planung** durchgeführt. Diese Bewertung ist in **Abbildung 152** dargestellt.

Es ist erkennbar, das verschiedene Gestaltungsparameter des MDS entsprechen nicht den Anforderungen des HPiL Tests entsprechen. Der MDS beinhaltet kein Bewegungssystem, die Parameter des Bewegungssystems entsprechend daher der Bewegungssystem-Konfiguration 1 des FDS. Wie in Kapitel 7.2.1 ausgeführt, sind dessen **Gestaltungsparameter (MOT)** für den Test mit naiven Probanden klar unzureichend. Da der Wissenstransfer von einer virtuellen in eine reale Umgebung für einen Experten, der mit dem Testobjekt vertraut ist oder an dessen Entwicklung beteiligt war, einfacher als für den naiven Probanden ohne Bezug zum Testobjekt ist, ist der MDS aber möglicherweise für den Experten-Test nutzbar. Der MDS besitzt ebenso wie der FDS keine Shaker an Sitz, Fußraum oder Pedalen (**HAP1, HAP2, HAP3**). Wie für den FDS wird eine eingeschränkte Verwendbarkeit im Anwendungsfall angenommen. Das Lenkrad des MDS ist stark vereinfacht und entspricht hinsichtlich Ergonomie und Force

Feedback nicht der Realität (**HAP 4**). Die Ergonomie des PKW-Cockpits (**CP6**) kann durch die umgesetzte Minimal-Konfiguration aus Bürostuhl, PC-Bildschirmen sowie den Bedienelementen aus dem Consumer-Bereich nur stark limitiert abgebildet werden. Das Visualisierungssystem des MDS, bestehend aus zwei PC Bildschirmen, ist bei einem Abstand von Nutzer und Bildschirm von 0,8m durch ein unzureichendes Sichtfeld von etwa 70° (Horizontal, **VIS 1**) beziehungsweise 30° (Vertikal, **VIS 2**) gekennzeichnet. Mit 1,5 Bogenminuten pro Pixel ist die Auflösung des MDS (**VIS 6**) schlechter als die Vorgabe von 1 Bogenminute pro Pixel. IPG Carmaker wird, analog zu dSpace ASM, zur Visualisierung des PKWs und der Fahrumgebung eingesetzt. Die Gestaltungsparameter (**VIS 7**) bis (**VIS 13**) entsprechen den in Tabelle 21 beschriebenen Gestaltungsparametern der dSpace ASM Visualisierung: Die Visualisierung ist durch eine konstant hohe Framerate, einen geringe Detailgrad in der visuellen Darstellung der Fahrumgebung und des PKWs sowie einer starken Vereinfachung von Wettereffekten gekennzeichnet. Die Gestaltungsparameter der Simulation (**SIM 1**) bis (**SIM 7**) sowie der Dynamik (**DYN 1**) entsprechen denen der dSpace ASM Simulation des FDS. Es werden „reaktive“ Verkehrsteilnehmer eingesetzt, es können keine Kollisionen dargestellt werden, virtuelle Objekte sind für Sensoren durchlässig.

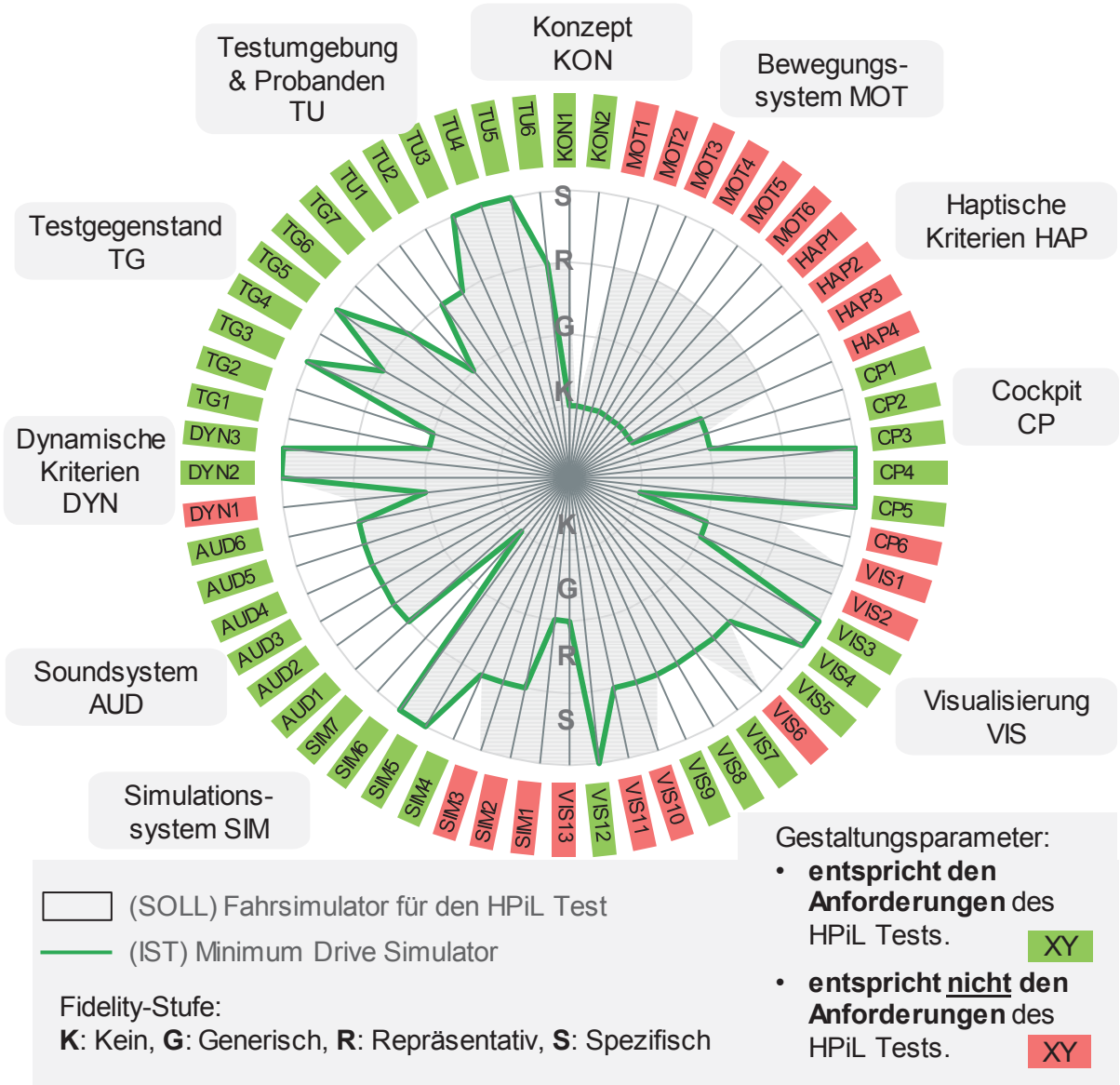


Abbildung 152: Bewertung der Gestaltungsparameter des Minimum Drive Fahrsimulators zur Nutzbarkeit im HPiL Test

Die Erkenntnisse aus der Bewertung der Gestaltungsparameter des FDS können wie folgt zusammengefasst werden:

Der Minimum Drive Simulator (MDS) kann wegen der eingeschränkten Abbildung der Fahrzeugbewegung, der Visualisierung und der Ergonomie im HPiL Test nicht verwendet werden.

Dies korreliert mit den Ausführungen von Reich sowie Bubb zu verschiedenen Simulator-Konfigurationen, die dem MDS weitestgehend entsprechen (Reich 2017, S. 110; Bubb 2015, S. 607). So basieren auch diese auf zwei 2D Bildschirmen, einem PC und einer einfache Lenkrad-Pedalerie-Kombination. Als Fahrsimulationsumgebung wird eine dSpace ASM ähnliche Fahrumgebung eingesetzt. In einer Probandenstudie konnte Reich durch Evaluation eines Dual Tasks Szenarios, in dem Bedieneingaben eines simulierten Navigationssystems während der Fahraufgabe durchgeführt wurden, zeigen, dass das Präsenzerleben der Proband in dem Fahrsimulator signifikant niedriger als in der Realfahrt ist (Reich 2017, S. 110, 2017, S. 134). Das Fahrerverhalten sowie dessen subjektives Fahrerleben in diesem Fahrsimulator sind nicht auf reale Fahrsituationen übertragbar.

Für die weitere Analyse wurde im Prozessschritt HPBench Spezifikation der MDS Fahrsimulator aufgebaut und die in Kapitel 7.2.2 beschriebenen HPBench Templates in Dymola und Processing angepasst. Die auf dem Arduino Mikrokontroller basierenden Baukastenelemente des HPBench Baukastens wurden ebenso adaptiert. Mit Hilfe des HPBench Baukastens wurde der in der nachfolgenden **Abbildung 153** dargestellte hybride BCAS Prototyp erstellt. Dieser basiert auf den BCAS des ersten und dritten Projektteams der ersten Evaluationsstudie und bildet damit exemplarisch verschiedene Anzeige- und Bedienelemente ab. Über das direkt zugreifbare HPBench Operator-Panel können die Probanden zeitgleich zur Rolle Anwender auch die Rolle des Prüfers einnehmen und das BCAS während des Tests parametrieren.

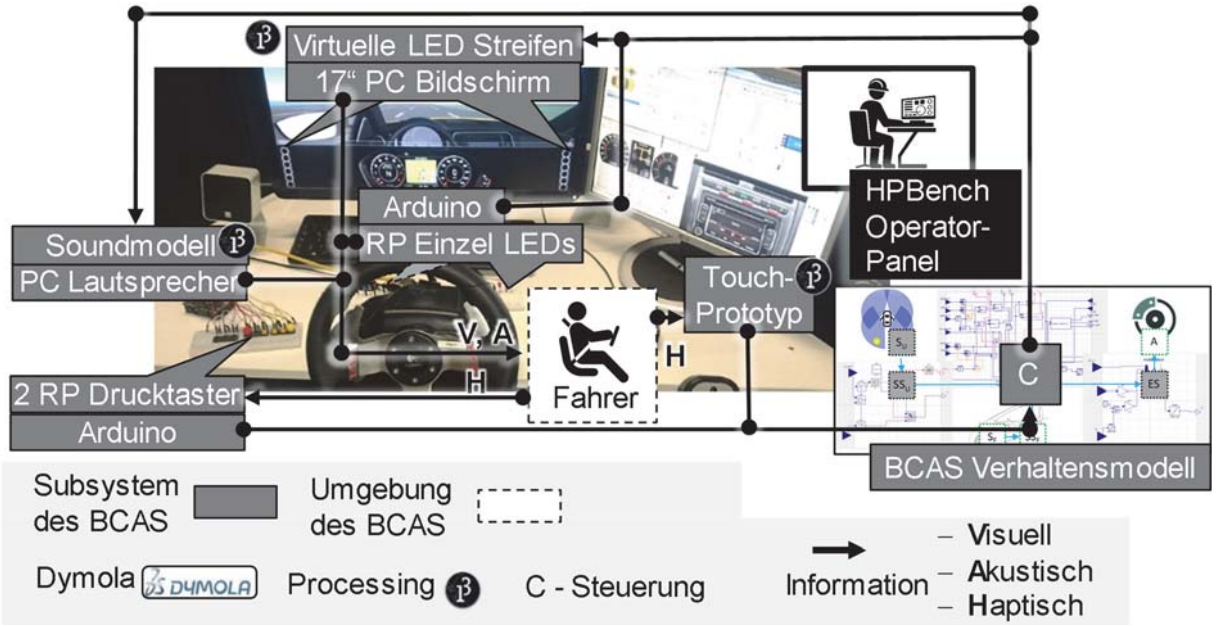


Abbildung 153: MMS Lösungselemente und Systemarchitektur des hybriden BCAS Prototyps, eingebunden im Minimum Drive Simulator

Auf Basis der in Kapitel 7.4 eingeführten vier Testszenarien wurde eine durchgängige Teststrecke in IPG Carmaker erstellt. Mit dem hybriden BCAS Prototyp wurden exemplarisch Versuche mit erfahrenen Nutzern in den Rollen des Anwenders und Prüfers durchgeführt. Es konnte Folgendes beobachtet werden:

- Über die Rapid Prototyping Drucktaster konnte der Anwender den Modus ändern und das BCAS ein- und ausschalten. Wahlweise konnte auch der auf dem rechten Bildschirm dargestellte virtuelle Touch-Prototyp des Projektteams 1 per Maus bedient werden.
- Der Anwender bekam wahlweise über Rapid Prototyping Einzel-LEDS oder virtuelle LEDs eine visuelle und zusätzlich über die Boxen eine akustische Anzeige über das Warnlevel sowie die relative Position des Fahrrads.
- Der Anwender reagierte auf die Warnungen mit Kommentaren sowie der Einleitung des Bremsvorgangs.
- Das BCAS löste bei aktiviertem Modus 2 in Warnstufe 3 die Notbremsung aus. Die Kollision konnte in 3 von 4 Testszenarien verhindert werden. In Modus 1 fand keine Notbremsung statt.
- Der Prüfer konnte über das Operator-Panel während des Versuchs verschiedene Parameter des BCAS Prototyps sowie der Testumgebung verändern.

Die Beobachtungen und Testdaten weisen darauf hin, dass auch im alternativen Setup für den Experten-Probanden verständliche Anzeigen und Bedienelemente enthalten sind und mit dem hybriden BCAS Prototyp ein verständlicher Test ermöglich werden kann. Dazu wurde gezeigt, dass die HPiL Methodik flexibel auch auf weitere Fahrsimulator-Setups und Fahrsimulations-Tools anwendbar ist.

Es kann zusammengefasst werden:

In der Anwendung der HPiL Methodik auf die alternative Testumgebung, basierend auf dem MDS Fahrsimulator und IPG Carmaker Simulationssystem, konnte eine Übertragbarkeit der HPiL Methodik gezeigt werden.

Aus den Auswertungen der drei Evaluationsstudien sowie den Untersuchungen zur Übertragbarkeit der HPiL Methodik in andere Testumgebungen kann die abschließende Bewertung der Anforderungen (A1) bis (A14) zusammengefasst werden. Das nachfolgende Kapitel dient dieser Zusammenfassung.

7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Evaluation

In der Bewertung wird unterschieden zwischen einer durch den HPiL Test und die HPiL Methodik erfüllten Anforderung (Markierung √), der durch gegenteiligen Beleg nachgewiesenen Nicht-Erfüllung der Anforderung (Markierung X) sowie dem nicht möglichen Beleg der Anforderungserfüllung (keine Markierung).

Anforderungen, deren Beleg aus statistischen Gründen in der Evaluation nicht möglich war und daher nur exemplarisch erbracht werden konnte, werden gesondert hervorgehoben (Markierung (√) und (**X**)). Die nachfolgende **Tabelle 41** fasst die Bewertung zusammen.

Tabelle 41: Bewertung des erfolgreichen Belegs der Anforderungen an HPiL Test und HPiL Methodik in der Evaluation

Nr.	Anforderung	Evaluationsstudie		
		1	2	3
Vollständiger Beleg der Anforderungserfüllung: √	Beleg der Nichterfüllung der Anforderung: X	Nicht möglicher Beleg der Anforderungserfüllung -		
Statistisch nicht signifikanter Nachweis der Erfüllung / Nichterfüllung: (√) , (X)				
A1	Der hybride FAS Prototyp muss für den Verwendungszweck geeignet sein, das FAS angemessen für den umfassenden Beherrschbarkeits-Test abbilden.	√	√	(√)
A2	Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss geeignet und aufgabenangemessen für den Zweck und das Untersuchungsinteresse des Beherrschbarkeits-Tests sein.	√	√	
A3	Die Anzeigen und Bedienelemente des hybriden FAS Prototyps müssen verständlich für den Anwender sein.	(√)	√	(√)
A4	Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss für den Anwender verständlich und durchführbar sein	(√)	√	(√)
A5	Der Aufbau des hybriden FAS Prototyps muss für den Systemintegrator durchführbar sein.	√		√
A6	Der HPiL Test des hybriden FAS Prototyps muss für den Prüfer durchführbar sein.	√		√
A7	Die HPiL Methodik muss kompatibel mit industriellen Entwicklungs- und Testprozessen, -methoden und -werkzeugen sein.	√		
A8	Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren vergleichbare Nutzbarkeit des HPiL Testverfahrens für den Systemintegrator und Prüfer ermöglichen.	(√)		
A9	Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren höhere Nützlichkeit des HPiL Testverfahrens für den Systemintegrator und Prüfer aufweisen.	(√)		
A10	Die HPiL Methodik muss eine im Vergleich zu bestehenden Testverfahren vergleichbare Beanspruchung der Rollen Systemintegrator und Prüfer aufweisen.	(√)		
A11	Der Fahrsimulator im HPiL Test soll flexibler einsetzbar sein als Fahrsimulatoren des Stands der Technik.	√		
A12	Der Aufbau der Hardware des hybriden FAS Prototyps soll weniger als 1 h dauern.	(√)		
A13	Der Aufbau der Software des hybriden FAS Prototyps soll weniger als 0,5 h dauern.	(√)		

Nr.	Anforderung	Evaluationsstudie		
		1	2	3
Vollständiger Beleg der Anforderungserfüllung: √	Beleg der Nichterfüllung der Anforderung: X	Nicht möglicher Beleg der Anforderungserfüllung -		
Statistisch nicht signifikanter Nachweis der Erfüllung / Nichterfüllung: (√) , (X)				
A14	Durch Einsatz des HPiL Testverfahrens müssen Erkenntnisse in gegenüber bestehenden Testverfahren höherer Qualität oder größerem Umfang erlangt werden können.	(√)	√	√

Den initialen Ausführungen in Kapitel 7 folgend, kann durch den erfolgreichen Beleg der Anforderungen (A1) bis (A6) die erste Forschungshypothese verifiziert werden. Damit kann zusammengefasst werden:

H I.	Mit dem Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren kann ein auf Domänen-Prototypen basierender, umfassender Test der Beherrschbarkeit des Fahrerassistenzsystems früher als im Stand der Technik durchgeführt werden.	√ Verifizierte Hypothese

Es konnte ein Beleg für die Anforderung (A7) und (A14) erbracht werden: Die HPiL Methodik ist kompatibel mit industriellen Entwicklungs- und Testprozessen, -methoden und -werkzeugen. Und Erkenntnisse können in gegenüber bestehenden Testverfahren höherer Qualität und größerem Umfang erlangt werden. Es konnte zudem gezeigt werden, dass der HPiL Test und der Einsatz der HPiL Methodik Vorteile für den Beherrschbarkeits-Test zukünftiger, hochautonomer FAS bringt. Dazu konnte Anforderung (A11) belegt werden: Durch die verschiedenen Versuchsaufbauten der ersten, zweiten und dritten Evaluationsstudie sowie das alternative Setup zum Test der Übertragbarkeit konnte die gegenüber Fahrsimulatoren des Standes der Technik höhere Flexibilität gezeigt werden. In der ersten, explorativen Evaluationsstudie konnten die Anforderungen (A12) und (A13) getestet werden. Wegen der zu kleinen Probandengruppe, deren limitierter Glaubwürdigkeit sowie der limitierten Aussagekraft der Zeitmessung, besitzen die Ergebnisse jedoch keine statistische Signifikanz. Ebenso ergab die Evaluation der Nützlichkeit, Nutzbarkeit und Beanspruchungshöhe der HPiL Methodik für den Systemintegrator und Prüfer wegen der zu kleinen Probandengruppe der ersten Evaluationsstudie keine statistisch verwertbaren Ergebnisse (Anforderungen A8, A9 und A10). Daher kann zweite Forschungshypothese durch die Ergebnisse der Evaluationstudien nicht verifiziert werden. Es kann zusammengefasst werden:

H II.	Mit der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik können hybride Fahrerassistenzsystem-Prototypen im industriellen Fahrerassistenzsystem-Entwicklungsprozess effizient und schnell aufgebaut und in industrierelevanten Setups frühzeitig umfassend hinsichtlich Beherrschbarkeit getestet werden.	- Hypothese kann nicht verifiziert werden

Kapitel 8

Fazit und Ausblick

Wäre, wäre, Fahrradkette.

(Matthäus, 2017)

8 Fazit und Ausblick

Das angestrebte Ziel der vorliegenden Arbeit, die Entwicklung eines Testverfahrens zum frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen (FAS), konnte realisiert werden. Somit wurde eine Kernherausforderung in der Entwicklung moderner FAS, dem Fehlen ebensolcher Testverfahren, überwunden. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Entwicklung, das neue **Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Testverfahren** sowie die **Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Methodik** für dessen effiziente Planung und Umsetzung im industriellen FAS Entwicklungsprozess abschließend analysiert und hinsichtlich ihrer Potentiale für den Test der Beherrschbarkeit in heutigen wie auch zukünftigen FAS Entwicklungsprozessen bewertet. **Abbildung 154** zeigt die Verortung des Kapitels in den Kontext der Arbeit.

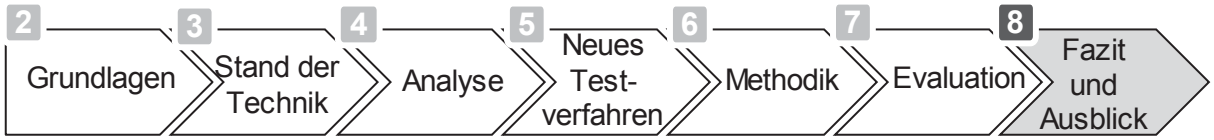


Abbildung 154: Verortung des Kapitels „8. Fazit und Ausblick“ in der Arbeit

8.1 Fazit

Im Rahmen der Evaluation konnte erfolgreich belegt werden, dass das Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren ein **umfassendes Verfahren zur Erprobung der Beherrschbarkeit von FAS darstellt**. Dieses Testverfahren kann zu einem **wesentlich früheren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess** Anwendung finden, als es der gegenwärtige Stand der Technik bei anderen Testverfahren zulässt. Der **hybride FAS Prototyp** genügt den Kriterien der Korrektheit sowie der Angemessenheit und bildet das FAS bei hoher Abbildungsqualität und großem Abbildungsumfang aufgabenangemessen ab. Zum Aufbau des hybriden FAS Prototyps werden die ersten funktionalen, maschinenausführbaren Teilsystem-Prototypen aus der heutigen FAS Entwicklung verwendet. Diese Prototypen werden heute bereits für einen Test einzelner Beherrschbarkeits-Kriterien eingesetzt, aber erst durch Kopplung zum hybriden FAS Prototyp ist ein umfassender Test der Beherrschbarkeit möglich. Das HPiL Testverfahren beschreibt den Aufbau eines umfassenden FAS Prototyps, bestehend aus dem mechatronischen Regelsystem, welches die Steuerung, Sensoren, Aktoren und Car2X Systeme beinhaltet, sowie der Mensch-Maschine Schnittstelle inklusiver aller Anzeigen und Bedienelemente zur Interaktion zwischen Fahrer und FAS.

Das HPiL Testverfahren ist **skalierbar** und damit auch für den Beherrschbarkeits-Tests unvollständiger FAS nutzbar. So können auch das mechatronische Regelsystem oder die MMS des FAS alleinstehend getestet werden. Eine Skalierung ist durch Kopplung verschiedener FAS Prototypen oder Teil-Prototypen möglich. Dies ermöglicht die Abbildung verschiedener Gestaltungstrends, beispielsweise der Sensorfusion, der Erstellung funktionaler Rechencluster oder der fahrzeuginternen Vernetzung, bei denen Bauelemente der Steuerung, der Sensorik oder der Aktorik gemeinsam genutzt werden. Besonders diese Trends stellen eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Fahrfunktionen auf den Ebenen von SAE Level 3, 4 und 5 (nach SAE J3016) für das **bedingt, hoch und vollautonome Fahrzeug** der Zukunft dar. Lediglich auf SAE Level 5 wird die Fahraufgabe vollständig vom FAS übernommen, hochautonome FAS der SAE Level 3 und 4 sehen sich dagegen mit der Herausforderung der wechselseitigen Übergabe zwischen Fahrer und FAS konfrontiert. Der Test der Beherrschbarkeit einer

solchen Übergabe bedarf einer **realistischen Interaktion zwischen FAS und dem Fahrer**, die der HPiL Test bereits auf Basis früher Entwicklungsprototypen ermöglicht.

Die Durchführung des **Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests** stellt **spezifische Anforderungen an einen Fahrsimulator**. So müssen die physischen Elemente des Fahrsimulators auf ein Minimum reduziert und möglichst viel des Fahrzeug-Innenraumes virtuell abgebildet werden. Zudem wird die Funktion des mechatronischen Regelsystems durch Verhaltensmodelle dargestellt, der Fahrsimulator muss weiche Echtzeitanforderungen unterstützen und fehlertolerant gegenüber einer gelegentlichen Überschreitung von Zeitbedingungen sein. Daher wurde ein Vorgehen zur Bereitstellung eines solchen Fahrsimulators für den frühzeitigen Test der Beherrschbarkeit entwickelt. Neben der Erstellung komplett neuer Fahrsimulatoren ermöglicht dieses Vorgehen auch die Analyse und die Anpassung bestehender Fahrsimulatoren zu einer Nutzbarkeit im HPiL Test. In der Evaluation wurde das Vorgehen exemplarisch für die Bereitstellung eines für den HPiL Test passenden Fahrsimulators auf Basis eines bestehenden Fahrsimulators angewandt. Die mit dem hybriden FAS im Fahrsimulator durchgeführten HPiL Tests bestätigen die Nutzbarkeit und Verständlichkeit des Tests für den durchführenden Prüfer sowie für den mit dem FAS interagierenden Anwender. Ebenfalls konnte in der Evaluation des hybriden FAS Prototyps gezeigt werden, dass der frühe Test der Beherrschbarkeit in den zwei Regelkreisen der Fahrer-FAS-Interaktion signifikante Vorteile gegenüber bereits bestehenden Testverfahren, die dieselben Prototypen nutzen, bietet. Die Beherrschbarkeit des FAS kann gegenüber diesen in höherer Qualität und in größerem Umfang getestet und nachgewiesen werden.

Die **HPiL Methodik** ermöglicht den effizienten Beherrschbarkeits-Test im industriellen FAS Entwicklungsprozess. Die unter Anwendung der Techniken der Standardisierung und Wiederverwendung erstellten HPBench-Werkzeuge unterstützen den flexiblen und schnellen Aufbau der hybriden FAS Prototypen. Dies geschieht durch die Bereitstellung eines konfigurierbaren Frameworks mit standardisierten und vorgeplanten Elementen und Schnittstellen. Weiterhin durch die Bereitstellung der HPBench Templates zur frühzeitigen Unterstützung des Prototypen-Aufbaus durch die Entwickler dessen Teil-Prototypen. Sowie durch aggregierte Baukastenelemente für den Aufbau von Anzeigen und Bedienelementen, die sowohl gebrauchsfertige und prototypische Hardware wie auch vorgefertigter Softwarebausteine beinhalten. Um die Effizienz des Tests zu gewährleisten, wird eine Operator-Schnittstelle für die Änderung von Parametern während des HPiL Tests bereitgestellt. Im HPiL Prozess werden diese HPBench-Werkzeuge vor und während des FAS Entwicklungsprozesses methodisch für den Aufbau und den Test des hybriden FAS Prototypen eingesetzt. Durch prozessuale Trennung der Bereitstellung der Testumgebung, der Nutzung von entwicklungsunabhängiger Anzeige- und Bedienelektronik sowie der frühzeitigen Bereitstellung von Templates an die Entwickler, ermöglicht die HPiL Methodik ein signifikantes Frontloading von Entwicklungsaktivitäten. **Abbildung 155** stellt die bereits aus Kapitel 4.3 bekannte Projektion des Testverfahrens in den automobilen Produktentwicklungsprozess dar.

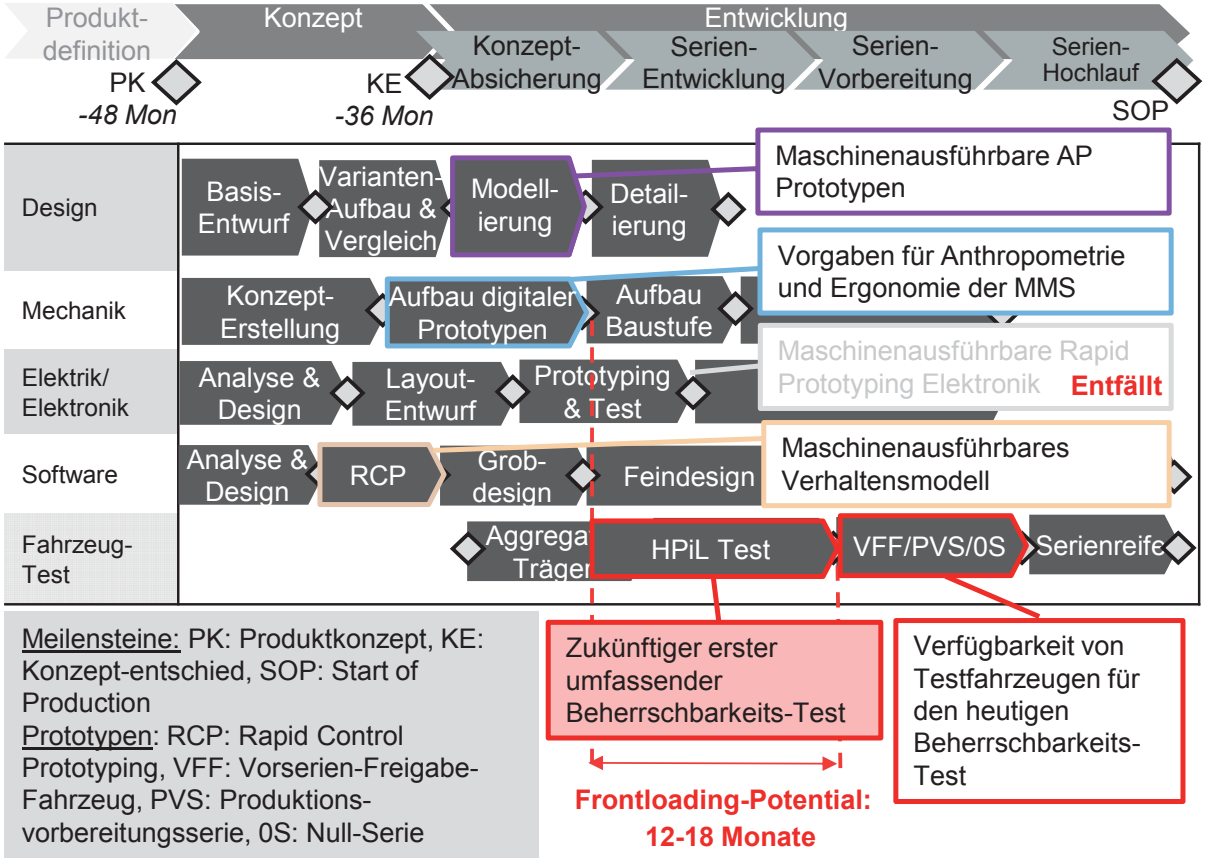


Abbildung 155: Frontloading-Potential des Einsatzes der HPiL Methodik für den frühzeitigen Beherrschbarkeits-Test im automobilen Produktentwicklungsprozess

Auf Basis dieser Projektion kann eine Abschätzung des Frontloading-Potentials erfolgen: Im heutigen, zumeist fahrzeugbasierten Test der Beherrschbarkeit, markiert der Prozessschritt „VFF/PVS/0S“ des Fahrzeugtests den ersten Zeitpunkt, in dem ein Testfahrzeug für den Beherrschbarkeits-Test verfügbar ist. Der hybride FAS Prototyp des HPiL Tests resultiert als Ergebnis der folgenden Prozessschritte: Im AP Tool werden die digitalen Anzeigeinhalte im Prozessschritt „Modellierung“ der Design-Entwicklung erstellt. Das erste 3D Modell, welches die Vorgaben für anthropometrischen und ergonomischen Installation der Anzeigen- und Bedienelemente ins Fahrzeug bereitstellt, wird im Prozessschritt „Aufbau digitaler Prototypen“ der Mechanik-Entwicklung erstellt. Das maschinenausführbare Software-Verhaltensmodell wird im Prozessschritt „Rapid Control Prototyping“ der Software-Entwicklung erzeugt. Bei Einsatz des HPiL Tests kann damit selbst bei konservativer Schätzung der Beherrschbarkeits-Test um mehr als **12 bis 18 Monate früher als im Stand der Technik** durchgeführt werden. Dieses Frontloading-Potential ist umfangreicher, als in der Analyse in Kapitel 4.3 durch Abbildung 64 beschrieben, da der Einsatz der entwicklungsunabhängigen Anzeige- und Bedienelektronik des HPBench-Baukastens den Verzicht auf Elektronik-Prototypen aus dem (Partial-) Entwicklungsprozess „Elektrik/Elektronik“ ermöglicht.

Die Beherrschbarkeit von FAS kann im HPiL Test umfangreich, jedoch nicht vollständig getestet und nachgewiesen werden. Durch die Nutzung früher funktionaler Prototypen sind Aspekte wie der Test der Fehlerrobustheit oder der Nachweis von Schutzmaßnahmen gegen externe Manipulationen des Systems nicht oder nur sehr eingeschränkt testbar. Der Beherrschbarkeits-Nachweis **seriennaher FAS im Fahrzeug** im Prozessschritt „VFF/PVS/0S“ ist daher weiterhin erforderlich und kann durch den HPiL

Test nicht vollständig ersetzt werden. Auch andere elementare Tests der FAS Entwicklung, beispielsweise der in Kapitel 3.3.3 beschriebene AUTOSAR-Akzeptanztest zum Nachweis der spezifikationskonformen Entwicklung der Soft- und E/E-Hardware, können nicht im HPiL Testverfahren durchgeführt werden, denn dieser Test bedarf dem Einsatz eines echtzeitfähigen Softwarecodes. Der HPiL Test sollte daher zukünftig **ergänzend zu den heutigen Testverfahren der Beherrschbarkeit vor diesen eingesetzt** werden. So können frühzeitig viele der 107 Beherrschbarkeitskriterien kosteneffizient im Entwicklungsprozess getestet werden, nur noch für einzelne Kriterien ist der anschließende Fahrzeug-Test erforderlich. Analog zum Vorgehen in der Softwareentwicklung, in der ein inkrementelles Testvorgehen mit den Testverfahren Model-, Software- und Hardware-in-the-Loop erfolgt, kann der zukünftige FAS Entwicklungsprozess die Beherrschbarkeit des FAS entlang eines **inkrementellen Testvorgehens mit den Stufen „HPiL Test“ und „Fahrzeugtest“** nachweisen.

Der HPiL Test kann damit ein wichtiger Baustein für die Entwicklung zukünftiger FAS sowie von Systemen des bedingt, hoch und vollautonome Fahrzeugs der Zukunft sein, da ein Frontloading signifikanter Testumfänge in frühe Phasen der Fahrzeug-Entwicklung ermöglicht wird und somit kosten- und zeitintensive Fahrzeugtests massiv reduziert werden können.

8.2 Ausblick

Im Fazit wurden die Vorzüge des HPiL Tests aufgezeigt. Um zu belegen, dass dieser und die HPiL Methodik **im realen industriellen FAS Entwicklungsprozess** einsetzbar sind und dort die beschriebenen Vorteile bieten, sollten weitere Studien mit statistisch signifikanten Probandengruppen in Testsetups hoher interner Validität durchgeführt werden. Die Zielgruppe des industriellen Fahrsimulations-Experten muss durch die am Test teilnehmenden Probanden glaubwürdig und zuverlässig abgebildet werden. Insbesondere die mit einer kleinen Probandengruppe explorativ in der ersten Evaluationsstufe erprobte HPiL Methodik muss weiter evaluiert werden.

Sowohl das HPiL Testverfahren als auch die HPiL Methodik bieten verschiedene **Erweiterungspotentiale** zur Abbildung eines höheren Testumfangs, einer höheren Testqualität sowie einer höheren Effizienz und besseren Nutzbarkeit im industriellen Entwicklungsprozess. Um eine größere Spanne an Beherrschbarkeitskriterien darzulegen, kann der HPiL Test um die Einbindung weiterer menschgesteuerter Fahrzeuge erweitert werde. Zu diesem Zweck müssten weitere Fahrsimulatoren in die Simulation integriert und gekoppelt werden. Ein solches Setup würde den Test weiterer Kriterien der Beherrschbarkeit, beispielsweise die Wirkung des FAS Eingriffs in die Fahrt auf hinterher fahrende Fahrzeuge ermöglichen (vergleiche Response Consortium 2009, A28; Neukum et al. 2014). Dazu ist die Integration der Werkzeuge und Methoden der HPiL Methodik in ein Produktdatenmanagement (PDM) System zielführend. Die zentralisierte Verfügbarkeit digitaler Daten kann sowohl den Aufbau als auch den Test des hybriden FAS Prototyps durch den vereinfachten Zugang zu Entwicklungsdaten vereinfachen, sowie die Reproduzierbarkeit und damit die Qualität des Tests durch Formalisierung unterstützen. Ebenso kann die Ablage und Auswertung von Testdaten durch die Kopplung mit einem Simulationsdatenmanagement (SDM) System vereinfacht und formalisiert werden.

Eine große Herausforderung bei der Einführung der HPiL Methodik stellt die, gegenüber heutigen Testverfahren, **große Investition in einen für den HPiL Test einsetzbaren Fahrsimulator** dar. Möglicherweise können Fahrsimulatoren, wie der in Kapi-

tel 7.6 beschriebene Minimum Drive Simulator (MDS), die auf preisgünstiger und einfacher Fahrsimulator-Technik basieren, trotz mangelhafter Immersion für umfangreiche Beherrschbarkeits-Test durch Experten eingesetzt werden. So werden derartige Simulatoren bereits heute in verschiedenen Anwendungsfällen, beispielsweise dem frühzeitigen Test von Klickprototypen frühzeitiger MMS, eingesetzt (Bubb 2015, S. 586). Eine Nutzung derartiger Minimal-Fahrsimulatoren kann für eine weite Verbreitung des HPiL Testverfahrens führen und zukünftige Experten entwicklungsbegleitend in die Lage versetzen, verschiedene Beherrschbarkeitsparameter frühzeitig testen und weiterentwickeln zu können. Eine vertiefte Evaluation derartiger Minimal-Testsetups wird daher empfohlen.

Wie in Kapitel 5 ausgeführt, erfordert das HPiL Testverfahren das Vorhandensein von Prototypen aus dem FAS Entwicklungsprozess. Daher ist **der HPiL Test nicht geeignet** für den Beherrschbarkeits-Test von FAS **vor der Domänenentwicklung.** Insbesondere für Entscheidungsfindungen in dieser Phase der Produktdefinition, in der die wesentlichen Eigenschaftspotentiale des FAS festgelegt werden, wäre ein solcher Beherrschbarkeits-Test jedoch wichtig. Zudem werden in dieser Phase die maßgeblichen Anforderungsdokumente und Spezifikationen für die Übergabe an den Zulieferer und Komponentenentwickler erstellt. Der frühzeitige Beherrschbarkeits-Test vor der Domänenentwicklung würde eine frühe, integrierte Qualitätsprüfung durch den Automobilhersteller noch vor Übergabe der Anforderungen und Spezifikationen an Zulieferer und Komponentenentwickler ermöglichen.

Zur Umsetzung eines solchen Schrittes auf Basis des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests müssen die bisherigen, in Abbildung 65 definierten, Prozessschritte des FAS Entwicklungsprozesses erweitert werden. Zunächst muss eine **Erweiterung des Prozessschrittes „Erstellung des funktionalen Systemmodells und der logischen und dynamischen Verhaltenssimulation“** erfolgen. Zur Umsetzung muss in diesem Prozessschritt der Aufbau des hybriden FAS Prototyps erfolgen. Die Erweiterung muss demnach den **Vorentwurf einer maschinenausführbaren, funktionalen Mensch-Maschine Schnittstelle** beinhalten. Dieser Vorentwurf muss die digitalen Anzeigeinhalte zur Darstellung komplexer visueller, akustischer und haptischer Anzeigen enthalten. Zudem müssen Spezifikationen zur Auswahl der geeigneten HPBench-Baukasten-Elemente – also Anzeigen und Bedienelemente – definiert werden. Ebenso bedarf es an dieser Stelle der Festlegung der anthropometrischen und ergonomischen Gestaltungsvorgaben für die Einbindung der Anzeigen und Bedienelemente in den Fahrsimulator. Für den Test des hybriden FAS Prototyps muss der durch Auricht eingeführte Prozessschritt **der „erlebbaren Absicherung des Systemmodells“** zu einer **„erlebbaren Absicherung des Gesamtsystementwurfes“** erweitert werden (vergleiche Kapitel 4.3). In diesen zwei neuen Prozessschritten kann der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Prozess mit den Prozessteilen zum Aufbau des hybriden FAS Prototyps (Prozessschritte 3 und 4) sowie zum HPiL Test des hybriden FAS Prototyps (Prozessschritte 5, 6 und 7) verortet werden. Es kann somit zusammengefasst werden:

Die Durchführung des Hybrid-Prototype-in-the-Loop Tests vor der Domänenentwicklung erfordert die Erweiterung des FAS Entwicklungsprozesses um die Prozessschritte „Vorentwurf einer funktionalen Mensch-Maschine Schnittstelle“ sowie „Erlebbaren Absicherung des Gesamtsystementwurfes“. Sowie der Bereitstellung neuartiger Vorentwürfe einer maschinenausführbaren, funktionalen Mensch-Maschine Schnittstelle im FAS Entwicklungsprozess.

Abbildung 156 zeigt den entsprechend dieser Vorgaben erweiterten FAS Entwicklungsprozess.

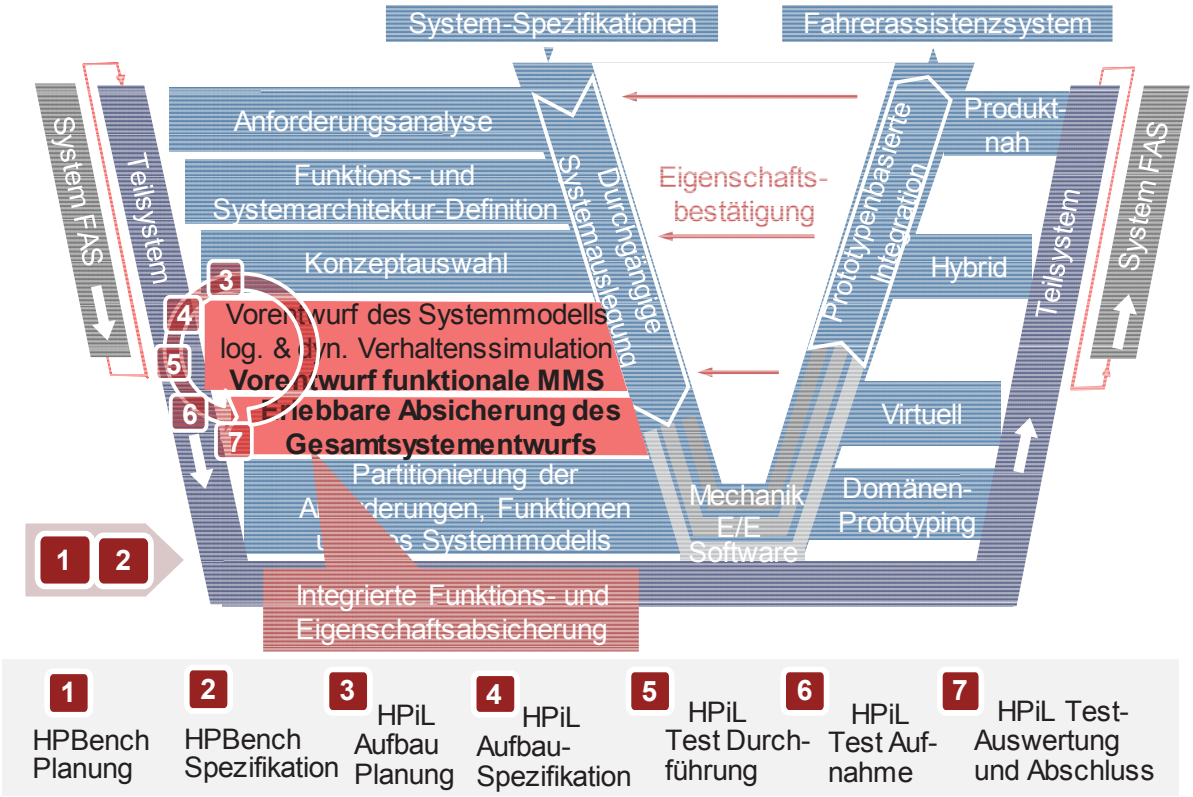


Abbildung 156: Hybrid-Prototype-in-the-Loop Test der Beherrschbarkeit vor der Domänen-Entwicklung im erweiterten FAS Entwicklungsprozess

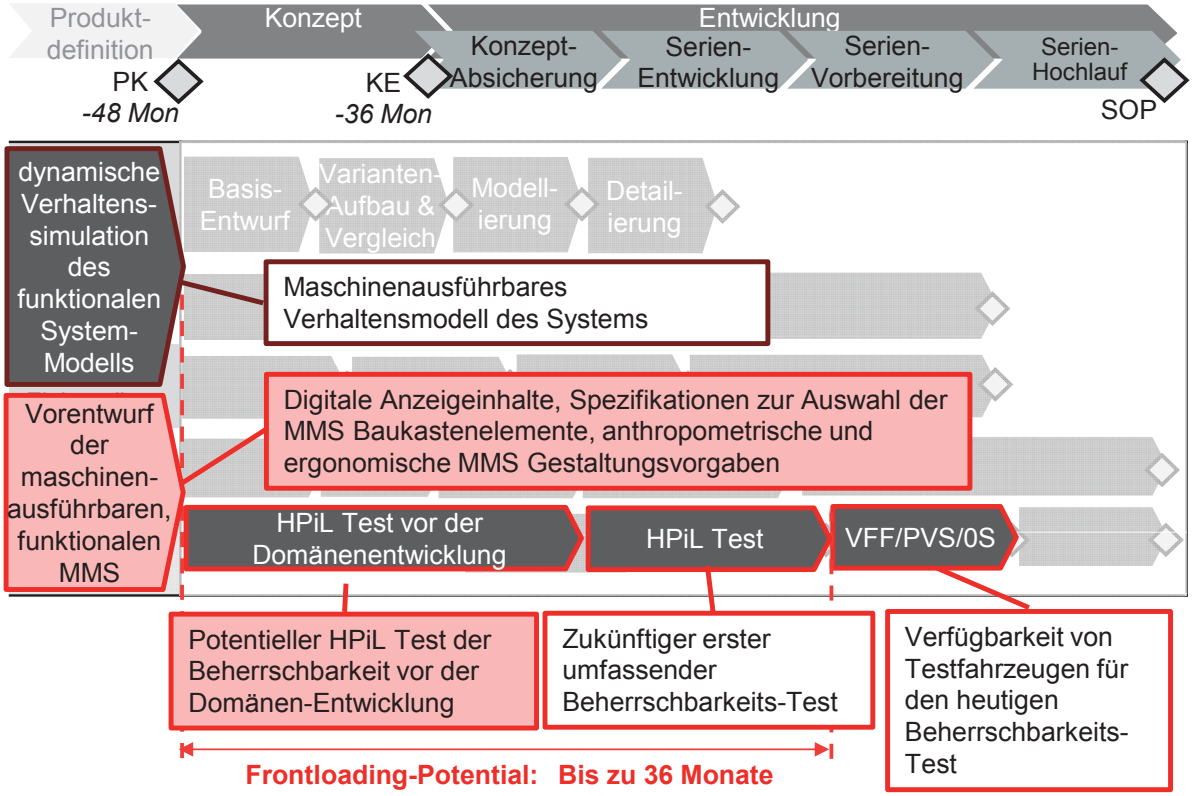
Wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben, birgt ein solches Testverfahren das Potential, die Beherrschbarkeit des FAS bis **36 Monate vor dem Stand der Technik** zu testen. Dieser Test kann damit auch zwischen **18 und 24 Monaten vor HPiL Test auf Basis von Domänen-Prototypen** durchgeführt werden. Da bei der Rolle des Systementwicklers, die die heutigen funktionalen Systemmodelle verantwortet, keine Kenntnisse über spezifische Entwicklungsumgebungen, Entwicklungsstandards oder gängige Technologien vorausgesetzt werden können, ist die Modellierungstiefe der funktionalen System-Verhaltensmodelle wesentlich geringer, als die der im CASE-Tool erstellten Software-Verhaltensmodelle. Wie bereits in Kapitel 4.3 ausgeführt, schränkt dies die Ergebnisqualität des HPiL Tests vor der Domänen-Entwicklung gegenüber dem HPiL Test nach der Domänenentwicklung stark ein.

Die Kombination beider Testverfahren zu einem **durchgängigen, inkrementellen Testvorgehen der Beherrschbarkeit**, ist jedoch ein zielführender zukünftiger Ansatz.

Abbildung 157 illustriert diesen Ansatz im automobilen Produktentwicklungsprozess. Mit einem solchen Vorgehen könnten zukünftig die eingeschränkten Tests vor der Domänen-Entwicklung für eine frühe Bewertung durch Entscheidungsträger sowie eine verbesserte Kommunikation mit Zulieferern vor und während der Domänen-Entwicklung genutzt werden. Dazu könnten wichtige Kriterien, beispielsweise die Vorhersagbarkeit oder die Verständlichkeit von Systemgrenzen, iterativ entwickelt und getestet werden. Ab dem Zeitpunkt, an dem die maschinenausführbaren Domänen-Prototypen zur Verfügung stehen, kann dann der umfangreichere und tiefer gehende HPiL Test auf Basis von Domänen-Prototypen stattfinden. Sobald Testfahrzeuge verfügbar sind,

können Tests zum vollständigen Nachweis der Beherrschbarkeit mit seriennahen FAS Prototypen durchgeführt werden.

Die Entwicklung eines solchen **durchgängigen, inkrementellen Testvorgehens der Beherrschbarkeit,** vom HPiL Test vor der Domänenentwicklung über den HPiL Test auf Basis von Domänen-Prototypen bis hin zum Fahrzeugtest, hat das Potential für eine nochmalige, signifikante Verringerung von Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten über den gesamten FAS Entwicklungsprozess.



Meilensteine: PK: Produktkonzept, KE: Konzept-entschied, SOP: Start of Production
Prototypen: RCP: Rapid Control Prototyping, VFF: Vorserien-Freigabe-Fahrzeug, PVS: Produktionsvorbereitungsserie, 0S: Null-Serie

Abbildung 157: Frontloading-Potential des Einsatzes der HPiL Methodik für den Beherrschbarkeits-Test vor der Domänen-Entwicklung im automobilen Produktentwicklungsprozess

Eine Untersuchung der **Übertragbarkeit des HPiL Testverfahrens sowie der HPiL Methodik auf andere Anwendungsfälle** stellt einen weiteren wichtigen Aspekt in der Bewertung der Potentiale des HPiL Testverfahrens dar. So ist die Kollaboration zwischen Mensch und Roboter ein wichtiges Anwendungsfeld zukünftiger Produktionssysteme (acatech 2017, S. 60). Ziel ist es, den Menschen von gefährlichen, schmutzigen und monotonen Tätigkeiten zu entlasten sowie umfassende und anspruchsvolle Montagetätigkeiten reproduzierbar und prozesssicher umsetzen zu können. Exemplarisch wurde daher die Übertragbarkeit des HPiL Testverfahrens auf einen Anwendungsfall der Mensch-Roboter Kollaboration im Rahmen eines explorativen Tests erprobt (Buchholz et al. 2018a). Der Anwendungsfall „kooperierende Montage eines Instrumententafel-Verkleidungsteils“ sieht eine Anbringung eines Instrumententafel-Ver-

kleidungsteils an ein Fahrzeugcockpit durch einen menschlichen Monteur vor. Der Roboter fixiert das Verkleidungsteil anschließend mit Schrauben. **Abbildung 158** zeigt das eingesetzte Setup des hybriden Montage-Prototyps.

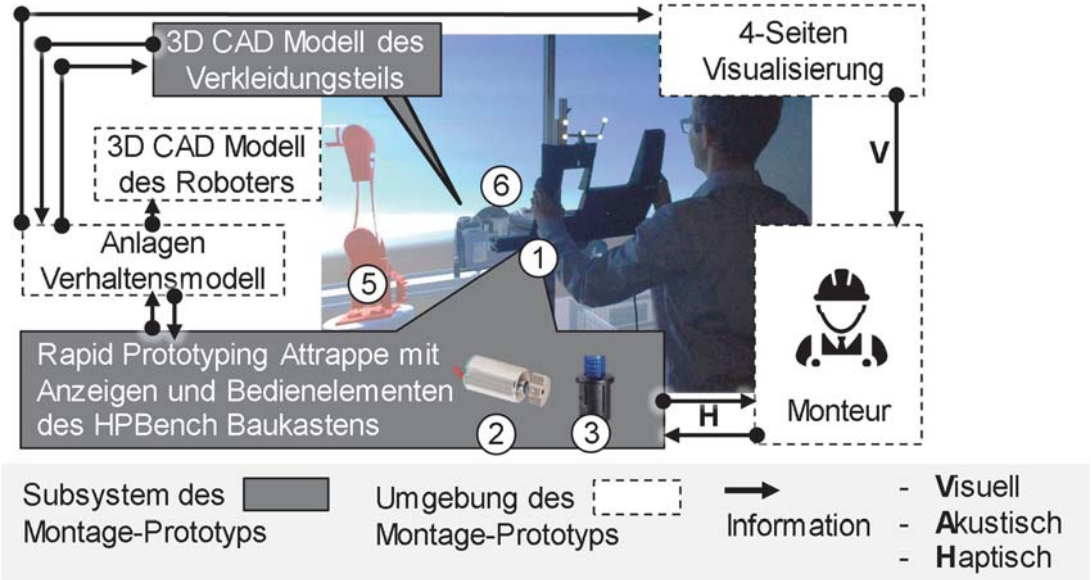


Abbildung 158: Hybrider Montage-Prototyp zur Montage eines Instrumententafel-Verkleidungsteils in Mensch-Roboter Kollaboration (nach Buchholz et al. 2018a, S. 245)

Im explorativen Test wurde zum Aufbau des hybriden Montage-Prototyps eine Attrappe des Verkleidungsteils (1) unter Anwendung von Rapid Prototyping Verfahren hergestellt und mit Elementen aus dem HPBench-Baukasten angereichert. Ein Vibrationsmotor (2) wurde für die haptische Anzeige der Kollision sowie ein Bedienknopf (3) zur Bestätigung der Montage angefügt. Anzeige und Bedienelement sind mit dem Functional Digital Mock Up der Anlage gekoppelt. Dieses besteht aus den 3D Modellen der Anlage selbst, dem kollaborierenden Roboter (4) und dem Verkleidungsteil (5). Die 3D Modelle des Roboters und der Anlage sind mit dem Verhaltensmodell der Anlage verbunden, das 3D Modell des Verkleidungsteils mit der Attrappe. Um den menschlichen Monteur nicht zu gefährden, stoppt der Roboter seine Bewegungen sobald die Attrappe im Raum bewegt wird. Über den Vibrationsmotor werden Kollisionen angezeigt, beispielsweise bei der Zusammenführung der 3D Modelle des Verkleidungsteils und des Fahrzeugcockpits. Bestätigt der Nutzer die Anbringung des Verkleidungsteils mit dem Bedienknopf, startet der durch das Verhaltensmodell gesteuerte Roboter die Verschraubung. In einer explorativen Nutzerstudie konnte mit diesem Setup die **Übertragbarkeit des HPiL Testverfahrens** auf Testszenarien der Mensch-Roboter Kollaboration aufgezeigt werden. Somit konnte erfolgreich demonstriert werden, dass ein frühzeitiger Test der Beherrschbarkeit einer Monteur-Roboter Interaktion mit einem hybriden Montage-Prototyp möglich ist und dadurch Erkenntnisse erlangt werden können, die im Stand der Technik erst mit physischen Prototypen möglich sind.

Es konnte somit gezeigt werden, dass das für die FAS Entwicklung aufgezeigte Potential einer signifikanten Einsparung von Entwicklungskosten und -zeit auch für andere Anwendungsfelder der Mensch-Technik Kooperation und Interaktion besteht.

Es kann zusammengefasst werden:

Der grundlegende Ansatz dieser Arbeit ist der Test eines auf **Entwicklungsartfakten basierenden, maschinenausführbaren hybriden System-Prototyps gleichzeitig** im **Regelkreis der Mechatronik** und im **Regelkreis der Mensch-Technik Interaktion**. Dieser Ansatz hat das Potential, massive Einsparungen von Entwicklungskosten und -zeit in der Entwicklung für den Kunden beherrschbarer, verständlicher und anwendbarer zukünftiger mechatronischer Produkte zu ermöglichen. Der entwicklungsbegleitende Einsatz des Ansatzes von der Konzeption des Produktes bis hin zu dessen Fertigstellung kann so zu signifikanten Kosteneinsparungen führen.

Heutige Testverfahren geben dem Entwickler ein frühzeitiges, tiefes Verständnis der technischen Fähigkeiten des mechatronischen Produktes. Ein ganzheitliches Produktverständnis erfordert jedoch zusätzlich den Nachweis, dass das System für den späteren Nutzer beherrschbar ist. Das in der Arbeit entwickelte Hybrid-Prototype-in-the-Loop Testverfahren ermöglicht einen solchen Nachweis durch eine frühzeitige, umfassende Interaktion zwischen Nutzer und System. Erst diese Interaktion ermöglicht die Berücksichtigung der Wahrnehmungen, Fähigkeiten und Wünsche des Nutzers.

Literaturverzeichnis

Abdelgawad, K. (2014): A Scalable Framework for Advanced Driver Assistance Systems Simulation. Unter Mitarbeit von Abdelkarim, M, Hassan, B., Grafe, M., Gräßler, I. In: A. Arisha und G. Bobashev (Hg.): SIMUL 2014. The Sixth International Conference on Advances in System Simulation: October 12-16, 2014, Nice, France. Wilmington, DE, USA: IARIA, S. 12–16.

Abdelgawad, K. (2018): A system-level design framework for networked driving simulation. Paderborn: Universitätsbibliothek.

Abel, D.; Bollig, A. (2006): Rapid Control Prototyping. Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

acatech (2017): Fachforum autonome Systeme im Hightech-Forum. Autonome Systeme - Chancen und Risiken für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft (Abschlussbericht). acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. München. Online verfügbar unter www.acatech.de/Publikation/fachforum-autonome-systeme-chancen-und-risiken-fuer-wirtschaft-wissenschaft-und-gesellschaft-abschlussbericht/, zuletzt geprüft am 14.08.2018.

ACOSAR Project Consortium (2019): ACOSAR. Advanced Co-Simulation Open System Architecture. Leibniz Universität Hannover. Hannover. Online verfügbar unter acosar.eu, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 05.05.2019.

Adams, D. (1982): Life, the universe, and everything. The Hitch hiker's guide to the galaxy 3 / Douglas Adams. London: Pan.

ADFC Berlin (2017): Die wichtigsten Fakten aus der polizeilichen Unfallstatistik. Hauptunfallursachen gegenüber Radfahrern. Online verfügbar unter http://adfc-berlin.de/radverkehr/sicherheit/information-und-analyse/121-fahrradunfaelle-in-berlin-unfallstatistik/154-die-wichtigsten-fakten-aus-der-polizeilichen-unfallstatistik.html, zuletzt aktualisiert am 04.04.2017, zuletzt geprüft am 01.10.2017.

Adler, M. (Hg.) (2010): Ergonomiekompendium. Anwendung ergonomischer Regeln und Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von Produkten. Bundesanstalt für Arbeitsschutz. 1. Aufl. Dortmund: BAuA.

Akrap, D. (2016): Entwurf, Umsetzung und Validierung von Konzepten für Anwendungen im Industrie-4.0-Kontext. Masterarbeit. Freie Universität Berlin, Berlin.

Albers, A.; Düser, T; Sander, O.; Roth, C; Henning, J. (2010): X-in-the-Loop-Framework für Fahrzeuge, Steuergeräte und Kommunikationssysteme. In: *ATZ Elektronik* 2010, S. 60–65.

Alda, A. (1980): 62nd Commencement Address, Speech at Digital Commons at Connecticut College, An electronic archive of research and publication for Connecticut College in New London, Connecticut. (Accessed digitalcommons.conncoll.edu on December 27, 2018)

Alm, T.; Alfredson, J.; Ohlsson, K. (2009): Simulator-based human-machine interaction design. In: *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing* 4 (1-2), S. 1–16.

Altinger, H.; Wotawa, F.; Schurius, M. (2014): Testing methods used in the automotive industry. Results from a survey. In: C. Budnik, G. Carrozza, D. Faragó, B. Güldali, B. Kumar, V. Manetti et al. (Hg.): Proceedings of the 2014 Workshop on Joining

AcadeMiA and Industry Contributions to Test Automation and Model-Based Testing. Workshop on Joining AcadeMiA and Industry Contributions to Test Automation and Model-Based Testing. San Jose, 21.-24.07.2014. New York: ACM, S. 1–6.

Anderl, R., Nattermann, R.; Rollmann, T. (2012): Das W-Modell - Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme. Hg. v. U. Sendler. PLMportal. Darmstadt. Online verfügbar unter www.plmportal.org/de/forschung-detail/das-w-modell-systems-engineering-in-der-entwicklung-aktiver-systeme.html, zuletzt aktualisiert am 03.02.2012, zuletzt geprüft am 09.07.2018.

Angermeier, G. (2012): Ressource. Projektmanagement Glossar. Hg. v. Berleb Media GmbH. Projekt Magazin. ProjektMagazin. Online verfügbar unter projektmagazin.de/glossarterm/ressource, zuletzt aktualisiert am 08.11.2012, zuletzt geprüft am 25.08.2019.

Ängeslevä, J.; Nicenboim, I.; Wunderling, J.; Lindlbauer, D. (2016): Beyond Prototyping. In: C. Gengnagel, E. Nagy und R. Stark (Hg.): Rethink! Prototyping. Transdisciplinary Concepts of Prototyping. 1st ed. 2016.

Arduino Project (2018): What is Arduino? Online verfügbar unter www.arduino.cc, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 19.07.2018.

Asimov, I. (1977): Turning Points: Essays on the Art of Science Fiction, Edited by Damon Knight, Social Science Fiction by Isaac Asimov, Modern Science Fiction, Its Meaning and Its Future, ed. Reginald Bretnor, Coward-McCann, 1953

Asimov, I. (1978): Foreword. In: R. Holdstock (Hg.): Encyclopaedia of Science Fiction. S.l.: Octopus.

Asimov, I. (1983): The robots of dawn. 1. ed. Garden City, N.Y: Doubleday.

Asimov, I. (1984): Asimov’s New Guide to Science by Isaac Asimov, Chapter 11: The Molecule, Page 517 and 518, Basic Books, Inc., New York.

Asimov, I. (1985): Aurora oder der Aufbruch zu den Sternen. Roman. Dt. Erstveröff (Heyne-Bücher).

Atmel Cooperation (2014): Gebogene Mittelkonsole mit Touch. In: *Hanser Automotive* 2014 (01-02), S. 59. Online verfügbar unter www.hanser-automotive.de/zeitschrift/archiv/artikel/gebogene-mittelkonsole-mit-touch-733755.html, zuletzt geprüft am 15.05.2018.

Audeme LLC (2016): MOVI™ Arduino Shield. A cloudless Speech Recognizer / Voice Synthesizer for the Arduino platform. Audeme LLC. Online verfügbar unter www.audeme.com/movi.html, zuletzt aktualisiert am 2016, zuletzt geprüft am 29.08.2018.

Audi Online Konfigurator. Alle Modelle (2017). Online verfügbar unter www.audi.de/de/brand/de/neuwagen.html, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Auricht, M. (2014): Integrating User Experience Validation into a New Engineering Development Process for Advanced Driver Assistance Systems. Unter Mitarbeit von Stark, R., Blume, C. In: Miller, E., Wu, Y. (Hg.): AutomotiveUI '14. 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. Seattle, 17-19 September 2014. New York: ACM, S. 1–6.

Auricht, M. (2018): Entwicklung eines Validierungsframeworks zur erlebbaren Absicherung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation. Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik; Fraunhofer IRB-Verlag.

Auricht, M.; Beckmann-Dobrev, B.; Kappes, S. (2012a): An interdisciplinary approach to validate mechatronic systems in early product development stages. In: NordDesign (Hg.): Proceedings of NorthDESIGN, the 9th NorthDESIGN Conference. The 9th NorthDESIGN Conference. Aalborg University, Denmark; Design Society, United Kingdom, 22.-24.08.: NordDESIGN, S. 1–8.

Auricht, M.; Beckmann-Dobrev, B.; Stark, R. (2012b): Early Multimodal Validation of Virtual Prototypes. In: *ZWF* 107 (5), S. 327–331.

Auricht, M.; Lindow, K.; Stark, R. (2013): Erlebbare Entwicklung und Absicherung technischer Systeme. In: D. Spath, B. Bertsche und H. Binz (Hg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013. Stuttgart, 20. Juni 2013. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Automotive Technology (2017): Newsletter: Bosch zeigt auf der CES 2017 ein neues Concept Car. Online verfügbar unter automotive-technology.de/bosch-zeigt-auf-der-ces-2017-ein-neues-concept-car/, zuletzt aktualisiert am 02.01.2017, zuletzt geprüft am 15.05.2018.

AUTOSAR GbR (Hg.) (2014): Acceptance Test, Explanatory Documents (EXP), General. AUTOSAR Release 1.0.0. AUTOSAR GbR. Online verfügbar unter autosar.org/fileadmin/user_upload/standards/tests/1-0/AUTOSAR_EXP_AcceptanceTestsOverview.pdf, zuletzt geprüft am 04.05.2019.

AUTOSAR GbR (Hg.) (2017): AUTOSAR. The standardized software framework for intelligent mobility. AUTOSAR GbR. Online verfügbar unter www.autosar.org/about/, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 12.12.2018.

Balážová, M. (2005): Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2004. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst (HNI-Verlagsschriftenreihe, 174).

Balci, O. (1998): Chapter 10: Verification, Validation and Testing. In: Jerry Banks (Hg.): Handbook of simulation. Principles, methodology, advances, applications, and practice. New York, S.l.: Wiley; Co-published by Engineering & Management Press, S. 335–409.

Barbieri, L.; Angilica, A.; Bruno, F.; Muzzupappa, M. (2013): Mixed prototyping with configurable physical archetype for usability evaluation of product interfaces. In: *Computers in Industry* 64 (3), S. 310–323.

Bartlett, J. E.; Kotrlik, J. W.; Higgings, C. C. (2001): Organizational research: Determining appropriate sample size in survey research appropriate sample size in survey research. In: *Information technology, learning, and performance journal* 19 (1), S. 43–50.

Bauer, R.; Burkert, T.; Martinus, M.; Folie, M.; Bodenstein, J. (2015): Neue Wege für den Einsatz von Virtual Reality am Beispiel des BMW i8 – Die Vernetzung von Simulationstools im Kontext der virtuellen Produktentwicklung. In: G. Tecklenburg (Hg.): Karosseriebautage Hamburg. Proceedings. 13. ATZ-Fachtagung, 14., 15. 05. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 103–118.

Beitz, W.; Grote, K.-H. (Hg.) (2001): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 20., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.

Bender, K. (2005): Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Bergrath, J. (2015): Fatal menschlich. Notbremsassistenten nicht abschalten. Hg. v. EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH. Online verfügbar unter eurotransport.de/artikel/notbremsassistenten-nicht-abschalten-fatal-menschlich-6647202.html, zuletzt aktualisiert am 13.08.2015, zuletzt geprüft am 29.11.2018.

Beutner, E.; Neukirchner, H.; Maas, G. (2013): Virtuelle Produktentwicklung. 1. Aufl (Online-ausg.). Würzburg: Vogel Buchverlag (EBL-Schweitzer).

Bieser, C. (2007): Konzept einer bibliotheksbasiert konfigurierbaren Hardware-Testeinrichtung für eingebettete elektronische Systeme. Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

Blessing, L. T.M.; Chakrabarti, A. (2009): DRM, a Design Research Methodology. London: Springer London.

BMI (2018): Das V-Modell XT. Hg. v. Beauftragter der Bundesregierung für Informationstechnik. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI). Online verfügbar unter www.cio.bund.de/Web/DE/Architekturen-und-Standards/V-Modell-XT/vmodell_xt_node.html, zuletzt aktualisiert am 18.04.2018, zuletzt geprüft am 09.07.2018.

BMW (2015): Steuerung per Touch und Freiraumgesten. In: *Hanser Automotive* 2015 (09), S. 38. Online verfügbar unter www.hanser-automotive.de/zeitschrift/archiv/artikel/steuerung-per-touch-und-freiraumgesten-1006084.html, zuletzt geprüft am 14.05.2018.

BMW Online Konfigurator. FINDEN SIE IHREN BMW (2017). Online verfügbar unter www.bmw.de, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Bock, T.; Mauer, M.; Farber, G. (Hg.) (2007): Vehicle in the Loop: A new Simulator Set-Up for Testing Advanced Driving Assistance Systems. Driving Simulation Conference, North America 2007. Iowa City, USA, 12.09-14.09. Audi AG, TU München - Lehrstuhl für Realzeit Computersysteme.

Boehm, B. W. (1979): Guidelines for Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications. In: P. A. Samet (Hg.): Euro IFIP 79: North Holland, S. 711–719.

Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I. (2006): Das UML-Benutzerhandbuch. Version 2.0. München: Addison-Wesley (Programmer's choice).

Bordegoni, M.; Cugini, U.; Caruso, G.; Polistina, S. (2009): Mixed prototyping for product assessment: a reference framework. In: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 3 (3), S. 177–187.

Borgeest, K. (2010): Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien (ATZ / MTZ-Fachbuch).

Bosch AG (2015): Press Release: Second Bosch evaluation of driver assistance systems. Emergency braking and lane assist systems on the rise. Automotive World Limited. Online verfügbar unter www.automotiveworld.com/news-releases/second-bosch-evaluation-driver-assistance-systems-emergency-braking-lane-assist-systems-rise/, zuletzt aktualisiert am 18.12.2015, zuletzt geprüft am 30.08.2017.

Brady, T.F. (1954): Test Pilot Faces Robot Challenge: U. S., British, French Fliers Reply in NATO Air Group to Machine Proposal, New York Times, 06.05.1954

Braess, H.-H.; Seiffert, U. (2012): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage 2011. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (ATZ/MTZ-Fachbuch).

Brandenburg, S.; Roche, F.; Thüring, M. (2017): Kognitionspsychologische Erkenntnisse zum hochautomatisierten Fahren - eine Übersicht. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Proceedings 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. Berlin, 28., 29.11. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2312), S. 277–292.

Bremer, C.; Hillebrand, M.; HAssan, B.; Dumitrescu, R. (2015): Konzept für das ganzheitliche testen komplexer mechatronischer Systeme. In: M. Schenk (Hg.): Tagungsband: Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. 18. IFF-Wissenschaftstage. 18. IFF-Wissenschaftstage 2015. Magdeburg, 24-25 Juni. Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, S. 155–160.

Bringmann, E.; Krämer, A. (2008): Model-Based Testing of Automotive Systems. In: 2008 1st International Conference on Software Testing, Verification, and Validation, S. 485–493.

Brocke, J.v. (2002): Referenzmodellierung. Dissertation.

Broy, M. (2010): Cyber-Physical Systems. Innovation Durch Software-Intensive Eingebettete Systeme (acatech DISKUTIERT).

Broy, N. (2015): Evaluating Stereoscopic 3D for Automotive User Interfaces in a Real-World Driving Study. Unter Mitarbeit von Schneegass, S., Guo, M., Alt, F., Schmidt, A. In: Begole B. (Hg.): 33rd Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Unter Mitarbeit von Kim J., Inkpen, K., Woo, W. 33rd Annual CHI Conference on Human Factors in Computing. Seoul, 18.-24.04. New York: Association for Computing Machinery, S. 1717–1722.

Bruno, F.; Angilica, A.; Cosco, F.; Luchi, M. L.; Muzzupappa, M. (2011): Mixed prototyping environment with different video tracking techniques. In: IMProVe 2011 International Conference on Innovative Methods in Product Design, S. 105–113.

Bubb, H. (2015): Automobilergonomie. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ / MTZ-Fachbuch).

Buchholz, C.; Kind, S.; Blume, C.; Enin, A.; Stark, R. (2018a): Hybrid Prototype-in-the-Loop. In: *ZWF* 113 (4), S. 240–245.

Buchholz, C.; Kind, S.; Stark, R. (2017a): Design of a Test Environment for Planning and Interaction with Virtual Production Processes. In: *Procedia CIRP* 62, S. 547–552.

Buchholz, C.; Stark, R. (2017): Vergleich hybrider und virtueller Model-in-the Loop Methoden für die frühe menschzentrierten Verifikation und Validierung fortschrittlicher Fahrerassistenzsysteme. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Proceedings 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. Berlin, 28., 29.11. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2312), S. 69–80.

Buchholz, C.; Tiemann, M.; Stark, R. (2018b): Durchgängiges Prototyping mechatronischer Systeme im MBSE Entwicklungsprozess. In: D. Krause, K. Paetzold und S. Wartzack (Hg.): Design for X. Beiträge zum 29. DfX Symposium. September 2018. 29th DfX-Symposium. Tutzing, Deutschland, 25 und 26.09: Design Society, S. 119–130.

Buchholz, C.; Vorsatz, T.; Kind, S.; Stark, R. (2017b): SHPbench – A Smart Hybrid Prototyping Based Environment for Early Testing, Verification and (user based) Validation of Advanced Driver Assistant Systems of Cars. In Procedia CIRP 60, pp. 139–144.

Bundesagentur für Arbeit (2018): Berichte: Blickpunkt Arbeitsmarkt - MINT-Berufe. Statistiken der Bundesagentur für Arbeit. Bundesagentur für Arbeit. Nürnberg. Online verfügbar unter https://statistik.arbeitsagentur.de, zuletzt geprüft am 04.09.2019.

Bundesagentur für Arbeit (2019): Berichte: Blickpunkt Arbeitsmarkt - Ingenieurinnen und Ingenieure. Statistiken der Bundesagentur für Arbeit. Bundesagentur für Arbeit. Nürnberg. Online verfügbar unter https://statistik.arbeitsagentur.de, zuletzt geprüft am 04.09.2019.

Bundesamt für Justiz (12.07.2018): Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) § 823 Schadensersatzpflicht, §823 Abs. 1 BGB, §1. In: Bürgerliches Gesetzbuch (BGB). Online verfügbar unter www.gesetze-im-internet.de/bgb/__823.html, zuletzt geprüft am 12.12.2018.

Bungartz, H.-J.; Buchholz, M.; Pflüger, D.; Zimmer, S. (2009): Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (eXamen.press).

Burmeister, O.; Reischl, M.; Bretthauer, G.; Mikut, R. (2008): Data-Mining-Analysen mit der Matlab-Toolbox Gait-CAD. at - Automatisierungstechnik 56 (7/2008), S. 381–389.

Burst, A. (2000): Rapid Prototyping eingebetteter elektronischer Systeme auf Basis des CDIF-Datenaustauschformats. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Buxton, B. (2011): Sketching user experiences. Getting the design right and the right design. [Nachdr.]. Amsterdam: Morgan Kaufmann.

CESAsia2016. Continental Holistic Connectivity (2016). Online verfügbar unter www.continental-mediacenter.com, zuletzt aktualisiert am 11.05.2016, zuletzt geprüft am 14.05.2108.

Charness, G.; Gneezy, U.; Kuhn, M. A. (2012): Experimental methods. Between-subject and within-subject design. In: *Journal of Economic Behavior & Organization* 81 (1), S. 1–8.

CHECK24 Studien (2018): Autofahrer aus Mecklenburg-Vorpommern legen die meisten Kilometer zurück. CHECK24 Vergleichsportal GmbH. Online verfügbar unter www.check24.de/studien/versicherungen/, zuletzt aktualisiert am 19.02.2018.

Chen, B. H.; Peng, H. (2001): Differential-Braking-Based Rollover Prevention for Sport Utility Vehicles with Human-in-the-loop Evaluations. In: *Vehicle System Dynamics* 4-5, S. 359–389.

Conrad Electronic SE (2018): Conrad Electronic SE Webshop. Online verfügbar unter conrad.de/, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 17.10.2018.

Croker, Z.; Drazovic, F.; Muschalle, C.; Persson, J.; Wallén, M. (2017): Virtual Engineering Project Team 2. ACE - Final Report. Projektbericht. Technische Universität Berlin, Berlin. Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb.

Dass Jr, D. E.; Uyttendaele, A.; Terken, J. (2013): Haptic in-seat feedback for lane departure warning. In: Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. ACM, S. 258–261.

Davis, F. D. (1989): Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. In: *MIS quarterly*, S. 319–340.

Deicke, M. (2018): Virtuelle Absicherung von Steuergeräte-Software mit hardwareabhängigen Komponenten. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz (Wissenschaftliche Schriftenreihe "Eingebettete, selbstorganisierende Systeme", Band 16).

Deloitte (2017): Automotive Software Quality. Was OEMs heute für morgen beachten müssen. Hg. v. Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfgesellschaft. Online verfügbar unter www2.deloitte.com/de/de/pages/risk/articles/automotive-software-quality.html, zuletzt aktualisiert am 08.2017, zuletzt geprüft am 12.12.2018.

Delphi (2015): Augen, Sprache & Gestik - Delphi’s HMI. CES 2015. Online verfügbar unter www.autonomes-fahren.de/augen-sprache-gestik-delphis-hmi/, zuletzt aktualisiert am 09.01.2015, zuletzt geprüft am 14.05.2018.

DELTA COMPONENTS GmbH (Hg.) (2018): DELTA COMPONENTS Produkte. Digital Signage Monitore. Online verfügbar unter delta-components.de/, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 17.10.2018.

Diedrichs, N. (2017): VW-Elektroauto-Studie I.D. im Fahrbericht. So fährt Volkswagens Elektroauto-Zukunft. Hg. v. Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG. Auto-Motor und Sport. Stuttgart. Online verfügbar unter www.auto-motor-und-sport.de/fahrbericht/vw-id-fahrbericht-elektroauto-studie-2017/, zuletzt aktualisiert am 02.03.2017, zuletzt geprüft am 23.07.2018.

Domsch, C.; Negele, H. (2008): Einsatz von Referenzfahrsituation bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. In: b. Heißing und K. Deklerk (Hg.): 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Proceedings. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München, 07.-08.04. TU München, TÜV Süd. Online verfügbar unter ;

Dongkyu L.; Byoungdoo, L.; Shin, J. W. (2015): Fault detection and diagnosis with modelica language using deep belief network. In: Proceedings of the 11th International Modelica Conference. 11th International Modelica Conference. Versailles, France, 21-23.09.2015: Linköping University Electronic Press (118), S. 615–623.

Doukas, C. (2012): Building internet of things with the Arduino. V1.1 [Arduino V.10 ready! ; covers: communication with wired and wireless networks, android communication, cloud communication and more! S.l.: CreateSpace.

Dragutinovic, N. (2005): Behavioural effects of Advanced Cruise Control Use – a meta-analytic approach. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 5 (4), S. 267–280.

dSPACE (2018a): Automotive Simulation Models (ASM). Echtzeitmodelle für die Fahrzeugentwicklung. dSPACE digital signal processing and control engineering

GmbH. Paderborn. Online verfügbar unter www.dspace.com/de/gmb/home/products/sw/automotive_simulation_models.cfm, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 09.10.2018.

dSPACE (2018b): Sensor Simulation in Motion Desk. Testing Camera-Based Systems & Developing Radar and Lidar Sensors. dSPACE digital signal processing and control engineering GmbH. Paderborn. Online verfügbar unter www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/experimentandvisualization/modesk/sensor-simulation.cfm, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 28.08.2018.

dSPACE (2019): Validation of Radar ECU Functions. Radar test bench with dSPACE SCALEXIO HIL System. dSPACE digital signal processing and control engineering GmbH. Paderborn. Online verfügbar unter dspace.com/de/gmb/home/medien/videos/productvideos/video_radartestbench.cfm, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 30.05.2019.

Duan, L.; Chen, F. (2011): The future of advanced driving assistance system development in China. In: Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, S. 238–243.

duden.de (Hg.) (2017a): duden.de - Geste. Bibliographisches Institut GmbH. Online verfügbar unter www.duden.de/rechtschreibung/Geste, zuletzt aktualisiert am 14.06.2017, zuletzt geprüft am 14.06.2017.

duden.de (Hg.) (2017b): duden.de - Mimik. Bibliographisches Institut GmbH. Online verfügbar unter www.duden.de/rechtschreibung/Mimik, zuletzt aktualisiert am 14.06.2017, zuletzt geprüft am 14.06.2017.

duden.de (Hg.) (2017c): duden.de - physisch. Bibliographisches Institut GmbH. Online verfügbar unter www.duden.de/rechtschreibung/physisch, zuletzt aktualisiert am 18.06.2017, zuletzt geprüft am 18.06.2017.

duden.de (Hg.) (2017d): duden.de - assistieren. Bibliographisches Institut GmbH. Online verfügbar unter www.duden.de/rechtschreibung/assistieren, zuletzt aktualisiert am 18.06.2017, zuletzt geprüft am 18.06.2017.

Dupuis, M.; Strobl, M.; Grezlikowski, H. (2010): OpenDRIVE 2010 and Beyond – Status and Future of the de facto Standard for the Description of Road Networks. In: A. Kemeny, F. Merienne und S. Espié (Hg.): Trends in driving simulation design and experiments. Proceedings of the Driving simulation conference Europe 2010. Paris, France, 9.-10.09.2010. Arcueil: INRETS (Actes INRETS, no 126), S. 231–242.

Düser, T. (2010): X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Produktentwicklung, zuletzt geprüft am 13.08.2018.

Ebay (2019): Ebay Kleinanzeigen: Bauteile VW Einparkassistenzsystem. Online verfügbar unter ebay-kleinanzeigen.de (diverse), zuletzt aktualisiert am 23.04.2019, zuletzt geprüft am 23.04.2019.

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser.

Eichberger, A.; Markovic, G.; Magosi, Z.; Rogic, B.; Lex, Cornelia; S, Sajjad (2017): A Car2X sensor model for virtual development of automated driving. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 14 (5), 1-11.

Eichhorn, A. von; Zahn, P. (2015): Evaluierung eines Verfahrens zur Bewertung der Abbiegeabsicht des Fahrers an Kreuzungen. In: Heike Proff (Hg.): Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 211–221.

Eigner, M. (2012): Interdisziplinäre Produktentwicklung - Modellbasiertes Systems Engineering. Unter Mitarbeit von T. Gilz und R. Zafirov. Hg. v. U. Sendler. PLMportal. Kaiserslautern. Online verfügbar unter www.plmportal.org/de/forschung-detail/das-w-modell-systems-engineering-in-der-entwicklung-aktiver-systeme.html, zuletzt aktualisiert am 23.04.2012, zuletzt geprüft am 09.07.2018.

Eigner, M.; Gerhardt, F.; Gilz, T.; Mogo Nem, F. M. (Hg.) (2012): Informationstechnologie für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).

Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (2014): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg.

Eisner, H. (2002): Essentials of project and systems engineering management. 2. ed. New York, NY: Wiley (A Wiley-interscience publication).

Engel, C.; Sannmann, C.; Yu, H.; Khandelwal, R.; Rost, P. (2017): Virtual Engineering Project Team 3. Final Report Virtual Engineering in Industry 2016/2017. Projektbericht. Technische Universität Berlin, Berlin. Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb.

Enge-Rosenblatt, O. (2010): Functional Digital Mock-up-Coupling of Advanced Visualization and Functional Simulation for Mechatronic System Design. ASIM Workshop. Ulm.

Enin, A. P. (2017): Parametrierung und Abstimmung eines Fahrsimulators zur frühzeitigen Evaluation des Fahrzeugcockpits im urbanen Umfeld. Masterarbeit. Technische Universität Berlin, Berlin.

VDI 2206, 2004: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.

Estl, H. (2016): Mehr als die Summe der Teile. Sensorfusion in autonomen Fahrsystemen. In: *Automobil Elektronik* (05-06), S. 38–41.

Etrality GmbH: Speedcheck Wiki - Die IT-Enzyklopädie. Benutzer-Datagramm-Protokoll (UDP). Neubeuern. Online verfügbar unter www.speedcheck.org/de/wiki/udp/, zuletzt geprüft am 2019.

Fees, E.; Lackes, R.; Siepermann, S.; Steven, M.; Thommen, J. P.; Kamps, U. (2019): Effizienz. Hg. v. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/effizienz-35160/version-258648, zuletzt aktualisiert am 19.02.2018, zuletzt geprüft am 03.04.2019.

Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hg.) (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Filippi, S.; Barattin, D. (2012): Classification and Selection of Prototyping Activities for Interaction Design.

Fischer, H. (2015): Virtuelle Absicherung von Assistenzsystemen. In: *Hanser Automotive* 2015 (05-06), S. 36–39. Online verfügbar unter www.hanser-automotive.de/zeitschrift/archiv/artikel/virtuelle-absicherung-von-assistenzsystemen-1033755.html, zuletzt geprüft am 24.07.2017.

Fischer, M.; Labusch, A.; Bellmann, T.; Seehof, C. (2015): A Task-oriented Catalogue of Criteria for Driving Simulator Evaluation. In: Proceedings of the Driving Simulation Conference 2015. Driving Simulation Conference 2015. Tübingen, 16.-18.09. Tübingen, S. 139–150.

Fischermanns, G.; Liebelt, W. (2000): Grundlagen der Prozessorganisation. 5. Aufl. Gießen: Schmidt (Schriftenreihe Organisation, 9).

Ford Motor Company (2016): New Ford lab integrates wearables and vehicles; Ford looks at linking health data to driver-assist technology. Ford Press Release. Hg. v. Automotive World Limited. Penarth, Wales. Online verfügbar unter https://www.automotiveworld.com/news-releases/new-ford-lab-integrates-wearables-vehicles-ford-looks-linking-health-data-driver-assist-technology/, zuletzt aktualisiert am 11.01.2016, zuletzt geprüft am 15.05.2018.

Fricke, E.; Gebhard, B.; Negele, H.; Igenbergs, E. (2000): Coping with changes. Causes, findings, and strategies. In: *Syst. Engin.* 3 (4), S. 169–179.

Fröhlich, J. (2014): Generierung und Evaluation multisensorischer Stimuli in virtuellen Welten. Dissertation. Universität Bielefeld, Bielefeld.

Fukuda, S.; Lulic, Z.; Stjepandić, J. (2013): FDMU-functional spatial experience beyond DMU? In: C. Bil, J. Mo und J. Stjepandić (Hg.): 20th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. Proceedings. Amsterdam: IOS Press, S. 431–440.

Georges, K. E. (1910): Georges: Kleines deutsch-lateinisches Handwörterbuch. System. Hg. v. Contumax GmbH & Co. KG. Zeno.org. Hannover und Leipzig. Online verfügbar unter www.zeno.org/nid/20002109298, zuletzt geprüft am 04.09.2019.

Gerke, T.; Roggero, M. (2016): Auf dem Weg zum autonomen Fahren. Modellbasierte Entwicklung des automatisierten Fahrerlebnisses. In: *Automobil Elektronik* (05-06), S. 26–29.

Giesler, B.; Reichel, M. (2016): Roboterarchitekturen im Fahrzeug. Die DNS für das automatisierte Fahren. In: *Automobil Elektronik* (05-06), S. 22–25.

Glauner, P.; Blumenstock, A.; Haueis, M. (2014): Exposition zur Raffung der Felderprobung für Fahrerassistenzsysteme. In: B. Färber (Hg.): 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme, FAS2014. Walting im Altmühltal, 26. - 28. März 2014. Darmstadt: Uni-DAS, S. 159–168.

Goeken, M. (2006): Entwicklung von Data-Warehouse-Systemen. 1. Aufl. s.l.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag.

Gomes, C.; Thule, C.; Broman, D.; Larsen, P. G.; Vangheluwe, H. (2017): Co-simulation: State of the art. In: *CoRR* abs/1702.00686.

Goncalves, J. S.V.; Rossetti, R. J. F.; Jacob, J.; Goncalves, J.; Olaverri-Monreal, C.; Coelho, A.; Rodrigues, R. (2014): Testing Advanced Driver Assistance Systems with a serious-game-based human factors analysis suite. In: 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). MI, USA, 08.06.2014 - 11.06.2014: IEEE, S. 13–18.

Grohmann, J.; Scheundel, S.; Shamshidin, A.; Sontheimer, M.; Tuna, M. (2017): Virtual Engineering Project 1. Project WS 16/17 - Accident Avoidance System. Projektbericht. Technische Universität Berlin, Berlin. Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb.

DIN 1319-1:1995-01, 1995: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe.

Hafeneder, S. (2019): Portal zur Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). FORUM VERLAG HERKERT GMBH. Merching. Online verfügbar unter www.stvo.de/strassenverkehrsordnung, zuletzt aktualisiert am 01.04.2013, zuletzt geprüft am 28.07.2019.

Hagendorf, H. (2011): Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. Allgemeine Psychologie für Bachelor. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Allgemeine Psychologie für Bachelor).

Hampel, M. (2016): Das HMI von automatisierten Fahrzeugen. In: *Hanser Automotive* 2016 (05-06), S. 50–53. Online verfügbar unter www.hanser-automotive.de/zeitschrift/archiv/artikel/das-hmi-von-automatisierten-fahrzeugen-1373684.html, zuletzt geprüft am 06.07.2017.

Harlander, T. (2015): Entwicklung eines Change Management Screening Instruments für die Einführung von IT-Systemen. Eine Implementierungsunterstützung für die IT-Consultingpraxis. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (BestMasters).

Hart, S. G.; Staveland, L. E. (1988): Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research.

Hartfiel, B.; Buchholz, C.; Fresemann, C.; Tomaszek-Staude, W.; Stark, R. (2018): Use Case orientierte Gestaltungsempfehlungen für Fahrsimulatoren zur menschzentrierten Absicherung von Sicherheits- und Komfortfunktionen. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Proceedings: 19. VDI-Kongress "SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung". 19. VDI-Kongress "SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung". Baden-Baden, 20.-21.11.: VDI Verlag GmbH (VDI Berichte 2333), 655-669.

Harvey, C.; Stanton, N. A.; Pickering, C. A.; McDonald, M.; Zheng, P. (2011): A usability evaluation toolkit for In-Vehicle Information Systems (IVISs). In: *Applied Ergonomics* 42 (4), S. 563–574.

Hassenzahl, M.; Burmester, M.; Koller, F. (2003): AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In: G. Szwillus und J. Ziegler (Hg.): Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Berichte des German Chapter of the ACM, 57), S. 187–196.

Haubelt, C.; Teich, J. (2010): Digitale Hardware/Software-Systeme. Spezifikation und Verifikation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (eXamen.press, 0).

Hehn, P. (2007): Dufte Forschung. Was Duftwirkungsforschung leisten kann. In: *Research & Results* 2007 (3), S. 45. Online verfügbar unter www.research-results.de/fachartikel/2007/ausgabe3/dufte-forschung.html, zuletzt geprüft am 12.06.2017.

Henzel, M.; Winner, H.; Lattke, B. (2017): Herausforderungen in der Absicherung von Fahrerassistenzsystemen bei der Benutzung maschinell gelernter und lernender Algorithmen. In: B. Färber (Hg.): 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme, FAS2017. Walting im Altmühltal, 29. - 31. März 2017. Darmstadt: Uni-DAS, S. 136–148.

Herman, D. A.; DeCia, N.; Orris Jr., S. J. (2016): Situationsbezogene deaktivierung eines spurhalteassistenzsystems. Patent Nr. DE102017101460A1. Hg. v. Google Patents. Ford Global Technologies LLC. Online verfügbar unter patents.google.com/patent/DE102017101460A1/de, zuletzt aktualisiert am 02.05.2016, zuletzt geprüft am 05.12.2018.

Hiesgen, G. (2012): Effiziente Entwicklung eines menschzentrierten Querführungsassistenzsystems mit einem Fahrsimulator. Disseration. Universität Duisburg-Essen, Duisburg. Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrentechnik.

Hines, J. W.; Tsoukalas, L. H. (1997): MATLAB supplement to Fuzzy and neural approaches in engineering. New York: Wiley (A Wiley-interscience publication).

Hoffmann, H. (2010): Prototyping Automotive Software und Services. Vorgehen und Werkzeug zur nutzerorientierten Entwicklung. Dissertation. TU München, München.

Holmes, F. (2016): HMI 2.0 takes driver assistance to the next level. Connectivity, autonomous driving and new mobility trends are set to change the way drivers interact with their vehicle. Automotive World Limited. Penarth, Wales. Online verfügbar unter https://www.automotiveworld.com/analysis/hmi-2-0-takes-driver-assistance-next-level/, zuletzt aktualisiert am 14.04.2016, zuletzt geprüft am 15.05.2018.

Hommel, M. (2006): Parallelisierte Simulationsprozesse für virtuelles Prototyping in der Automobilindustrie. Disseration. TU Carolo, Carolo. Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik.

Hou, M. (2009): Comparative evaluation of display technologies for collaborative design review. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 18 (2), S. 125–138.

IEC, D. I.N. (2014): 60050-351: 2014. In: *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch-Teil* 351.

INCOSE (2015): INCOSE Systems Engineering Handbook. A guide for system life cycle processes and activities. Unter Mitarbeit von David D. Walden, J. Roedler, K. Forsberg, D. Hamelin und T. M. Shortell. Fourth edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.

IPG Automotive GmbH (2018a): CarMaker: Pkw und leichte Nutzfahrzeuge virtuell testen. Hg. v. IPG Automotive GmbH. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://ipg-automotive.com/de/produkte-services/simulation-software/carmaker/, zuletzt geprüft am 28.08.2018.

IPG Automotive GmbH (2018b): Fahrerassistenz & Automatisiertes Fahren. Hg. v. IPG Automotive GmbH. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://ipg-automotive.com/de/anwendungsgebiete/fahrerassistenz-automatisiertes-fahren/, zuletzt geprüft am 09.10.2018.

ISTQB AISBL, German Testing Board e.V. (2018): ISTQB® GTB Standardglossar der Testbegriffe. Version 3.2 vom 27.09.2018. Online verfügbar unter glossar.german-testing-board.info/v3.2/#a, zuletzt aktualisiert am 27.09.2018, zuletzt geprüft am 11.12.2018.

Jemaa, I. Ben; Gruyer, D.; Glaser, S. (2016): Distributed simulation platform for cooperative ADAS testing and validation. In: 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), S. 77–82.

Johansson, E.; Engström, J.; Cherri, C.; Nodari, E.; Toffetti, A.; Schindhelm, R.; Gelau, C. (2004): Review of existing techniques and metrics for IVIS and ADAS assessment. In: *Adaptive Integrated Driver Vehicle Interface (AIDE) Product number: IST-1-507674-IP*.

Johansson, O.; Olausson, M. (2018): Alternatives to Processing for all platforms with any license. AlternativeTo.net. Online verfügbar unter https://alternativeto.net/software/processing/, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 19.09.2018.

Kaltenbacher, M. (2015): Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators. Finite elements for computational multiphysics. Third edition. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.

Kasoju, A.; Petersen, K.; Mäntylä, M. V. (2013): Analyzing an automotive testing process with evidence-based software engineering. In: *Information and Software Technology* 55 (7), S. 1237–1259.

Kiss, M.; Schmidt, G.; Babbel, E. (2008): Das Wizard of Oz Fahrzeug. Rapid Prototyping und Usability Testing von zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In: b. Heißing und K. Deklerk (Hg.): 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Proceedings. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München, 07.-08.04. TU München, TÜV Süd.

Klein, T. (2016): Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation.

Kleinhans, C.; Neidl, T.; Radics, A. (2015): Band 48: Automotive Entwicklungsdienstleistung - Zukunftsstandort Deutschland. Materialien zur Automobilindustrie, 01. April 2015. Eine Studie des Verbands der Automobilindustrie e. V. (VDA) in Zusammenarbeit mit Berylls Strategy Advisors GmbH. Hg. v. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA). Berlin (48). Online verfügbar unter www.vda.de/de/services/Publikationen, zuletzt aktualisiert am 01.05.2015, zuletzt geprüft am 11.02.2018.

Kolansinski, E. M. (1995): Simulator Sickness in Virtual Environments. United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences. Alexandria.

Königs, S. F. (2013): Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb.

Koustanai, A.; Mas, A., Cavallo, V.; Delhomme, P. (2010): Familization with a Forward Driver Collsion Warning on driving simulator: Cost and benefit on driver-system interaction and trust. In: A. Kemeny, F. Merienne und S. Espié (Hg.): Trends in driving simulation design and experiments. Proceedings of the Driving simulation conference Europe 2010. Paris, France, 9.-10.09.2010. Arcueil: INRETS (Actes INRETS, no 126), S. 169–179.

Kraft, C. (2011): Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2010. Print on demand. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, 5).

Kraftfahrt-Bundesamt (2018): Bestand an allgemeinen Fahrerlaubnissen im ZFER am 1. Januar 2018 nach Geschlecht, Lebensalter und Fahrerlaubnisklassen. Kraftfahrt-Bundesamt. Online verfügbar unter www.kba.de/DE/Statistik/Kraftfahrer/Fahrerlaubnisse/FahrerlaubnisProbe/2018/2018_fe_fap_geschl_alter_feklassen.html, zuletzt geprüft am 06.09.2019.

Krasnogolowy, A. (2009): AUTOSAR Seminar WS2008/2009. Assignment: Simulation of Automotive Systems in the Context of AUTOSAR. Hg. v. Hasso-Plattner-Institut for IT-Systems Engineering, University of Potsdam.

Kuhrmann, M. (2012): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik, Online Lexikon. Prototyping. Hg. v. N. Gronau und E. Weber. Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik (insb. Prozesse und Systeme), Universität Potsdam. Online verfügbar unter enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Systementwicklung/Vorgehensmodell/Prototyping/index.html, zuletzt aktualisiert am 26.09.2012, zuletzt geprüft am 30.06.2019.

Lackes, R.; Siepermann, S. (2019): Softwarewerkzeug. Hg. v. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/softwarewerkzeug-43682/version-267009, zuletzt aktualisiert am 19.02.2018, zuletzt geprüft am 03.04.2019.

Langenwalter, J. (2016): Künstliche Intelligenz im autonomen Fahren. Entwicklungsplattform für selbstfahrende Autos. In: *Automobil Elektronik* (05-06), S. 30–33.

Langley, P. (1986): Editorial: On Machine Learning. In: *Machine learning* 1 (1), S. 5–10.

Leschke, A.; Weinert, F. (2016): Car2X-Kommunikation als Grundlage für Effizienz- und Assistenzfunktionen für den Verkehr der Zukunft. In: S. Kubica, H. Ringshausen, J. Reiff-Stephan, M. Schlingelhof, A. Leschke und F. Weinert (Hg.): 1. Automobil Symposium Wildau: Tagungsband. 1. Automobil Symposium Wildau. Wildau, 31.03.2016. H Wildau, S. 7–15.

Li, Y.; Wang, H.; Wang, W.; Xing, L.; Liu, S.; Wei, X. (2017): Evaluation of the impacts of cooperative adaptive cruise control on reducing rear-end collision risks on freeways. In: *Accident Analysis & Prevention* 98, S. 87–95.

Lindemann, U. (2009): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

Lindemann, Udo (2016): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag.

Lindgren, A. (2008): Requirements for the design of advanced driver assistance systems-The differences between Swedish and Chinese drivers. In: *International Journal of Design* 2 (2).

Lütze, L. (2014): Modellbasierter Testprozess der akustischen Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Infotainmentsystems im Kraftfahrzeug. Dissertation. Fraunhofer IRB-Verlag.

Manawadu, U.; Ishikawa, M.; Kamezaki, M.; Sugano, S. (2015): Analysis of individual driving experience in autonomous and human-driven vehicles using a driving simulator. In: 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics

(AIM). 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Busan, South Korea, 07.07.2015 - 11.07.2015: IEEE, S. 299–304.

Matawa, R.; Vaculín, O. (2016): Bewertung und Absicherung von Fahrerassistenzsystemen. In: *ATZextra* 21 (8), S. 20–23.

MathWorks (Hg.): Anwenderberichte. MATLAB/Simulink in der Automobilindustrie. Online verfügbar unter de.mathworks.com/company/user_stories, zuletzt geprüft am 28.08.2018.

MATLAB Answers (2014): Quadcopter PID Controller Implementation - Derivative Filter. Unter Mitarbeit von Y. Y. Hau. Hg. v. MathWorks. MATLAB Answers. Online verfügbar unter de.mathworks.com/matlabcentral/answers/166354-quadcopter-pid-controller-implementation-derivative-filter, zuletzt aktualisiert am 11.12.2014, zuletzt geprüft am 28.08.2018.

Matthäus, L. (2017): Sky Bundesliga Conference, Sky Deutschland Fernsehen GmbH & Co. KG, 19.08.2017

Maurer, M.; Stiller, C. (Hg.) (2005): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Maurer, W. (Hg.) (2015): Modelica. SystemPhysik. Online verfügbar unter systemdesign.ch/wiki/Modelica, zuletzt aktualisiert am 07.04.2015, zuletzt geprüft am 16.10.2018.

Meier-Arendt, G. (2019): Nutzererlebnis & Automatisierung: Herausforderungen - Kriterien - Methoden. In: Landau, K., Winner, H. (Hg.): 9. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug. Hands off, Human Factors off? Welche Rolle spielen Human Factors in der Fahrzeugautomation?, 02., 03.04: Stuttgart: Ergonomia, S. 33–46.

Mercedes Benz Online Konfigurator. Jetzt konfigurieren (2017). Online verfügbar unter www.mercedes-benz.de/passengercars/configurator.html, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Meroth, A.; Tolg, B. (2008): Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug. 1. Aufl.: Vieweg (Vieweg Praxiswissen).

Metz, B. (2014): Was ist ein Mikrocontroller? Proseminar Mikrocontroller und eingebettete Systeme WS2014/2015. Seminarskript. Technische Universität München, München. Online verfügbar unter i6.in.tum.de, zuletzt geprüft am 19.09.2018.

Milgram, P.; Kishino, F. (1994): A taxonomy of mixed reality visual displays. In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77 (12), S. 1321–1329.

Miller, G. A.; Galanter, E.; Pribram, K. H. (1960): Plans and the structure of behavior. New York: Henry Holt and Company.

Minge, M.; Riedel, L.; Thüring, M. (2013): Modulare Evaluation interaktiver Technik. Entwicklung und Validierung des meCUE Fragebogens zur Messung der User Experience. In: S. Brandenburg, L. Doria, A. Gross, T. Günzler und H. Smieszek (Hg.): Tagungsband 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, 10.-12. Oktober 2013. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Berlin: Univ.-Verl. der TU, S. 28–36.

Mingkamp, L.; Kunert, M.; Henze, R. (2017): Herausforderungen, Anwendungsfälle und Zukunftstechnologien füreinen besseren Radfahrerschutz mit hochauflösenden Autombilradaren. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Proceedings 11. VDI-Tagung

Fahrzeugsicherheit. 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. Berlin, 28., 29.11. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2312), S. 105–121.

Modelica Association Project (2014): FMI Version 2.0. FMI for Model Exchange and Co-Simulation. Modelica Association. Online verfügbar unter fmi-standard.org/downloads/, zuletzt aktualisiert am 25.07.2014, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Murer, M.; Wilfinger, D.; Tscheligi, M. (2013): Taking Reality for a Drive in the Lab: The Makeup of a Mockup for Automotive HMI Research. In: Jaques T., A. Riener, R. Schroeter und S. Osswald (Hg.): Automotive UI '13. Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. Eindhoven, Netherlands, 28-30.10.2013, S. 103–104.

NASA Systems Engineering Handbook (2007). Rev. 1. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration (NASA/SP, 2007-6105).

Nauck, D. (1996): Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. Grundlagen des Konnektionismus, Neuronaler Fuzzy-Systeme und der Kopplung mit wissensbasierten Methoden. Unter Mitarbeit von F. Klawonn und R. Kruse. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag (Computational Intelligence).

Negele, H. J. (2007): Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung. Dissertation. Technische Universität München, München.

Neuhausen, J. (2001): Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Bibliothek der RWTH Aachen.

Neukum, A.; Naujoks, F.; Kappes, S. (2014): Kontrollierbarkeit unerwarteter Eingriffe eines Bremsassistenzsystems aus Perspektive des Folgeverkehrs. In: B. Färber (Hg.): 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme, FAS2014. Walting im Altmühltal, 26. - 28. März 2014. Darmstadt: Uni-DAS, S. 115–125.

Neumann-Cosel, K.v. (2014): Virtual Test Drive. Dissertation. Technische Universität München, München.

Niederée, U.; Vollrath, M. (2005): Fahrerassistenzsystem der Zukunft - Fährt da der Mensch noch mit? In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Der Mensch als Fahrer und seine Interaktion mit dem Fahrzeug. Braunschweig, 22. bis 23. 11. 2005. Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik; Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert; VDI-Tagung "Der Fahrer im 21. Jahrhundert". Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte), S. 193–203.

Opel Online Konfigurator (2017). Online verfügbar unter https://www.opel.de/tools/konfigurator.html, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Ott, R.; Thalmann, D.; Vexo, F. (2007): Haptic feedback in mixed-reality environment. In: *The Visual Computer* 23 (9), S. 843–849.

Paulweber, M.; Lebert, K. (2014): Mess- und Prüfstandstechnik. Antriebsstrangentwicklung, Hybridisierung, Elektrifizierung. Wiesbaden: Springer Vieweg (Der Fahrzeugantrieb).

Pearce, J. M. (2012): Materials science. Building research equipment with free, open-source hardware. In: *Science (New York, N.Y.)* 337 (6100), S. 1303–1304.

Penndorf, T. (2013): Softwarearchitektur für die interaktive Simulation mobiler Arbeitsmaschinen in virtuellen Umgebungen. Dissertation. Technischen Universit at Dresden, Dresden. Baumaschinentechnik.

Pfleging, B.; Kern, D.; Döring, T.; Schmidt, A. (2012): Reducing Non-Primary Task Distraction in Cars Through Multi-Modal Interaction. In: *it - Information Technology Methoden und innovative Anwendungen der Informatik und Informationstechnik* 54 (4), S. 179–187.

Picot, A.; Baumann, O. (2007): Modularität in der verteilten Entwicklung komplexer Systeme: Chancen, Grenzen, Implikationen. In: *Journal für Betriebswirtschaft* 57 (3), S. 221–246.

Pilorget, L. (2012): Testen von Informationssystemen. Integriertes und prozessorientiertes Testen ; mit 45 Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Praxis).

Politis, Ioannis; Brewster, Stephen; Pollick, Frank (2013): Evaluating multimodal driver displays of varying urgency. In: Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. ACM, S. 92–99.

Porst, R. (2009): Fragebogen. Ein Arbeitsbuch. 2. Auflage.

Preim, B.; Dachselt, R. (2015): Interaktive Systeme. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (eXamen.press).

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hg.) (2016): Rechtssicherheit für automatisiertes Fahren. Strassenverkehr 4.0. www.bundesregierung.de. Online verfügbar unter bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/rechtssicherheit-fuer-automatisiertes-fahren-349048, zuletzt aktualisiert am 04.11.2016, zuletzt geprüft am 12.12.2018.

Processing Foundation (Hg.) (2019): Overview. A short introduction to the Processing software and projects from the community. Online verfügbar unter processing.org/overview, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 13.07.2019.

Projekt B-U-I (2010): Expertenanalyse. usability-toolkit.de: Usability für Webprojekte. Hg. v. Universität Hildesheim. Projekt Barrierefreiheit - Usability - Internationalisierung. Online verfügbar unter http://usability-toolkit.de/usability-methoden/expertenanalyse/, zuletzt geprüft am 04.09.2019.

DIN 69901-5, 01.2009: Projektmanagement - Projektmanagementsystem - Teil 5: Begriffe.

DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.

Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer.

Ragan, E. D. (2010): The effects of higher levels of immersion on procedure memorization performance and implications for educational virtual environments. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 19 (6), S. 527–543.

Rasch, B. (2014): Quantitative Methoden. Einführung in die Statistik. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer (Springer-Lehrbuch).

Regenbrecht, H. (2004): Faktoren für Präsenz in virtueller Architektur. Dissertaton. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar. Professur Informatik in der Architektur.

Reich, D. (2017): Gestaltungsaspekte immersiver Fahrsimulationsumgebungen. Dissertation. Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik; Fraunhofer IRB-Verlag.

Reich, D.; Buchholz, C.; Stark, R. (2017): Methods to Validate Automotive User Interfaces Within Immersive Driving Environments. In: G. Meixner und C. Müller (Hg.): Automotive User Interfaces: Creating Interactive Experiences in the Car. Cham: Springer International Publishing, S. 429–454.

Reif, K. (2011): Bosch Autoelektrik und Autoelektronik. Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme ; mit 43 Tab. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden (Bosch Fachinformation Automobil).

Reif, K. (2014): Automobilelektronik. Eine Einführung für Ingenieure. 5., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ-MTZ-Fachbuch).

Renault Online Konfigurator. Konfigurieren Sie Ihr Fahrzeug (2017). Online verfügbar unter https://www.renault.de/konfigurator.html, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Response Consortium (2009): Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. Preventive and Active Safety Applications Integra ted Project, EU IST contract number FP6-507075. Version 5.

Riener, A. (2017): A flexible mixed reality test environment to improve simulation-based testing for highly automated driving. Unter Mitarbeit von P. Wintersberger, T. Hempen, T. Brandmeier, C. Lauerer, S. Hasirlioglu und F. Reway. In: K. Kompaß (Hg.): Methodenentwicklung für aktive Sicherheit und automatisiertes Fahren. 2. Expertendialog zu Wirksamkeit - Beherrschbarkeit - Absicherung. Renningen: expert Verlag (Haus der Technik Fachbuch, Band 144), S. 197–204.

ISO 26262-1, 11.2011: Road Vehicles - Functional Safety: Part 1: Vocabulary.

ISO 26262-3, 11.2011: Road Vehicles - Functional Safety: Part 3: Concept Phase.

ISO 26262-4, 11.2011: Road Vehicles - Functional Safety: Part 4: Product Development at the system level.

ISO 26262-5, 11.2011: Road Vehicles - Functional Safety: Part 5: Product Devlopment at the hardware level.

ISO 26262-6, 11.2011: Road Vehicles - Functional Safety: Part 6: Product Devlopment at the Software Level.

Roy, M.; Schlemminger, G. (2014): Immersion und Interaktion in virtuellen Realitäten: Der Faktor Präsenz zur Optimierung des geleiteten Sprachenlernens. In: *Zeitschrift für Interkulturellen Fremdsprachenunterricht* 19 (2), S. 187–201.

Rude, S.; Nalbant, S. (2017): Smart Systems Engineering. Digitalization of Products & Production. ProSTEP iViP Symposium. Essen, 18.05.2017. Online verfügbar unter prostep.org/fileadmin/Veranstaltungen/symposium17/Presentations/Presentation_Rude-BMW_Nalbant-PROSTEP.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2018.

Rudert, S.; Trumpfheller, J. (2015): Vollumfänglich durchdacht. Der Produktentstehungsprozess (01), S. 10–13. Online verfügbar unter porscheengineering.com/peg/de/about/magazine/, zuletzt geprüft am 08.12.2018.

Rüger, F.; Purucker, C.; Schneider, N.; Neukum, A.; Färber, B. (2014): Validierung von Engstellenszenarien und Querdynamik im dynamischen Fahrsimulator und Vehicle in the Loop. In: B. Färber (Hg.): 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme, FAS2014. Walting im Altmühltal, 26. - 28. März 2014. Darmstadt: Uni-DAS, S. 137–146.

Rumpe, B. (2006): Softwaretechnische Absicherung intelligenter Systeme im Fahrzeug. Software engineering methods for quality management of intelligent automotive systems. In: *VDI-Berichte* (1960), S. 473–486.

Schalk, T.; Gibbons, L. (2013): Toward Natural User Interfaces in the Car: Combining Speech, Sound, Vision, and Touch. In: Jaques T., A. Riener, R. Schroeter und S. Osswald (Hg.): Automotive UI '13. Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. Eindhoven, Netherlands, 28-30.10.2013, S. 65–69.

Schäuffele, J.; Zurawka, T. (2013): Automotive Software Engineering. Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen. 5., überarb. u. ak. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer.

Schleuter, W.; Sterler, G.; Schöffel, M. (2007): Qualitätsmanagement in der Prozesskette Elektrik/Elektronik. In: *ATZelektronik* 2 (1), S. 6–12.

Schmidt, E. A.; Hoffmann, H.; Krautscheid, R.; Bierbach, M.; Frey, A.; Gail, J. C.; Lotz-Keens, C. (2016): Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Fahrzeugtechnik F, 112).

Schmitt, K-U.; Weber, T.; Keller, A.; Gerster, B.; Baumgartner, L.; Uhr, A.; Cavegn, M. (2014): Fahrerassistenzsysteme - Wirkungsanalyse und Informationskonzept. Projektbericht, Studie im Auftrag des FVS.

Schmitt, R. (Hg.) (2015): Anlaufmanagement - Begriffe und Definitionen. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag.

Schnabel, P.: UDP - User Datagram Protocol. elektronik-kompendium.de. Online verfügbar unter elektronik-kompendium.de/sites/net/0812281.htm, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

Schneider, W. (Hg.) (2008): Ergonomische Gestaltung von Benutzungsschnittstellen. Kommentar zur Grundsatznorm DIN EN ISO 9241-110. 2., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Beuth.

Schuldt, F.; Lichte, B.; Maurer, M.; Scholz, S. (2014): Systematische Auswertung von Testfällen für Fahrfunktionen im modularen virtuellen Testbaukasten. In: B. Färber (Hg.): 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme, FAS2014. Walting im Altmühltal, 26. - 28. März 2014. Darmstadt: Uni-DAS, S. 169–179.

Seiffert, U.; Rainer, G. (2008): Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.

Seiniger, P.; Hellmann, A.; Wisch, M.; Gail, J. (2017): Schutz vor schwächeren Verkehrsteilnehmern: Kommende Anforderungen aus Gesetzgebung und Euro NCAP. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Proceedings 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. Berlin, 28., 29.11. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2312), S. 313–330.

Sendler, U. (Hg.) (2016): Industrie 4.0 grenzenlos. 1. Aufl. 2016. Berlin, Erscheinungsort nicht ermittelbar: Springer Berlin (Xpert.press).

Simpson, T. W.; Jiao, J. R.; Siddique, Z. (Hg.) (2006): Product Platform and Product Family Design. Methods and Applications. Boston, MA: Springer Science+Business Media LLC.

VDI 3633, 1996: Simulation von Logistik-, Materialfluß-und Produktionssystemen–Begriffsdefinitionen.

Singaravel, S.; Suykens, J.; Geyer, P. (2018): Deep-learning neural-network architectures and methods: Using component-based models in building-design energy prediction. In: *Advanced Engineering Informatics* 38, S. 81–90.

Skluzacek, S. (2012): Angular Resolution of Human Sound Localization. Thesis. Carthage College, Kenosha, USA.

Slater, M.; Wilbur, S. (1997): A framework for immersive virtual environments (FIVE). Speculations on the role of presence in virtual environments. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 6 (6), S. 603–616.

Slob, J. J. (2008): State-of-the-Art Driving Simulators, a Literature Survey. Eindhoven University of Technology. Eindhoven (DCT 2008, 107). Online verfügbar unter http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/9611.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2018.

ISO/IEC/IEEE 29119, 09.2013: Software and systems engineering - Software testing. Online verfügbar unter iso.org/standard/45142.html, zuletzt geprüft am 25.04.2019.

SparkFun Electronics (2018): SparkFun RGB and Gesture Sensor - APDS-9960. SparkFun Electronics. Online verfügbar unter www.sparkfun.com/products/12787, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 29.08.2018.

Spiegel Online (Hg.) (2018): Unternehmen setzen freiwillig auf Abbiegeassistenten. SPIEGEL ONLINE GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter http://www.spiegel.de/auto/aktuell/verkehrsminister-andreas-scheuer-lkw-abbiegeassistenten-sollen-gefoerdert-werden-a-1217709.html, zuletzt aktualisiert am 09.07.2018, zuletzt geprüft am 11.09.2018.

Spinnarke, S. (2017): Fahrerassistenzsysteme im Live-Test. Robotergestütztes Fahren. Hg. v. F. Müller, S. Waldeisen, C. Wilk, G. Kruschke und M. Pioro. produktion.de. Landsberg. Online verfügbar unter www.produktion.de/bildergalerien/fahrerassistenzsysteme-im-live-test-330.html, zuletzt aktualisiert am 08.06.2017, zuletzt geprüft am 06.08.2019.

Stadler, M.: Optimierung von Entwicklungsprozessen am Fallbeispiel des Anlauf- und Änderungsmanagement eines Automobilherstellers.

Stark, R.; Beckmann-Dobrev, B.; Schulze, E.-E.; Adenauer, J.; Israel, J. H. (2009): Smart-Hybrid-Prototyping zur multimodalen Erlebbarkeit virtueller Prototypen innerhalb der Produktentstehung. In: A. Lichtenstein (Hg.): Tagungsband 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme.

8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Berlin, 7. bis 9. Oktober 2009. Technische Universität Berlin. Berlin: VDI-Verlag (Mensch-Maschine-Systeme, 29).

Stark, R.; Hayka, H.; Israel, J. H.; Kim, M.; Müller, P.; Völlinger, U. (2011): Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie. In: *Informatik Spektrum* 34 (1), S. 20–28.

Statista (2018): Autofahrer in Deutschland nach selbst gefahrenen Kilometern pro Jahr von 2013 bis 2017. Statista. Online verfügbar unter statista.com/statistik/daten/studie/183003/umfrage/pkw---gefahrene-kilometer-pro-jahr/, zuletzt geprüft am 03.09.2019.

Statistisches Bundesamt (2018): Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2017. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 12. Juli 2018 in Berlin. Wiesbaden. Online verfügbar unter www.destatis.de/publikationen, zuletzt aktualisiert am 12.08.2018, zuletzt geprüft am 11.09.2018.

Stiller, C. (2005): Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: M. Maurer und C. Stiller (Hg.): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Stork, A.; Wagner, M.; Schneider, P.; Hinnerichs, A.; Bruder, T.; Eufinger, J. (2010): FunctionalDMU. Co-Simulation mechatronischer Systeme in einem DMU-Umfeld. In: *Fraunhofer Produktdaten-Journal* 1, S. 44–48.

Störmer, C.; Malz, C.; Mitrohin, C. (2014): Powertrain Cosimulation in a MiL and SiL Setup using the AUTOSAR and FMI Standards. In: J. Scheible, I. Bausch-Gall und C. Deatcu (Hg.): ASIM-Workshop STS/GMMS 2014. Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen: Simulation technischer Systeme Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation. ASIM-Workshop STS/GMMS 2014. Reutlingen-Rommelsbach, 20.02-21.02.2014, S. 167–169.

Strickland, E. (2017): 3 Ways Ford Cars Could Monitor Your Health. Ford is experimenting with car features that could help drivers with diabetes, heart problems, and more. IEEE Spectrum. New York, USA. Online verfügbar unter https://spectrum.ieee.org/the-human-os/biomedical/diagnostics/3-ways-ford-cars-could-monitor-your-health, zuletzt aktualisiert am 19.05.2017, zuletzt geprüft am 15.05.2018.

Sünnetcioglu, A.; Brandenburg, E.; Auricht, M.; Stark, R. (2014): Durchgängiger Traceability-Prozess im Systems Engineering. In: M. Maurer und S.-O. Schulze (Hg.): Tag des Systems Engineering 2014. Tag des Systems Engineering 2014. Gesellschaft für Systems Engineering e.V., S. 133–142.

Sünnetcioglu, A.; Brandenburg, E.; Caspar, J.; Fauquembergue, M.; Dörr, S. (2015): Information Retrieval Techniken zum Automatisierten Erstellen von Tracelinks im Model Based Systems Engineering. In: M. Schenk (Hg.): Tagungsband: Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. 18. IFF-Wissenschaftstage. 18. IFF-Wissenschaftstage 2015. Magdeburg, 24-25 Juni. Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, 45-54.

SurveyMonkey Inc. (2019): Sample size calculator. San Mateo, Kalifornien, USA. Online verfügbar unter www.surveymonkey.com/mp/sample-size-calculator/, zuletzt aktualisiert am 10.05.2019, zuletzt geprüft am 10.05.2019.

Tagesspiegel.de (Hg.) (2018): Abbiegesystem für Lkw soll bundesweit verpflichtend werden. Unter Mitarbeit von Sabine Beikler. Verlag Der Tagesspiegel GmbH. Online

verfügbar unter https://www.tagesspiegel.de/berlin/initiative-des-berliner-senats-abbiegesystem-fuer-lkw-soll-bundesweit-verpflichtend-werden/21120564.html, zuletzt aktualisiert am 28.03.2018, zuletzt geprüft am 11.09.2018.

SAE J3016, 2016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.

Teikari, P.; Najjar, R. P.; Malkki, H.; Knoblauch, K.; Dumortier, D.; Gronfier, C.; Cooper, H. M. (2012): An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research. In: *Journal of neuroscience methods* 211 (2), S. 227–236.

Thommen, J. P.; Amelung, V. E.; Mühlbacher, A.; Krauth, C. (2019): Effektivität. Hg. v. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/effektivitaet-33138/version-256665, zuletzt aktualisiert am 19.02.2018, zuletzt geprüft am 03.04.2019.

Thüring, M.; Miller, G. A. (2014): Nutzererleben messen - geht das überhaupt? In: *Mittelstand Digital* (01), S. 47–55.

Tivig, T.; Henseke, G.; Neuhaus, J. (2013): Berufe im demografischen Wandel. Alterungstrends und Fachkräfteangebot. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. In: *Alterungstrends und Fachkräfteangebot. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Berlin*.

Toyota Online Konfigurator. Finde dein passendes Toyota Modell (2017). Online verfügbar unter https://www.toyota.de/automobile/model-filter.json, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

VanWashenova, J. (2016): Wegbereiter für autonomes Fahren. Bildverarbeitung und neuronale Netze. In: *Automobil Elektronik* 2016 (05-06), S. 18–20.

Vetters, A. (2012): Die neuen „Richtlinien für die Anlage von Landstraßen“ RAL – Stand 2012. VSVI Planungstag – Mecklenburg-Vorpommern. Vereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure. VSVI. Güstrow, 19.01.2012. Online verfügbar unter www.vsvi-mv.de/fileadmin/Medienpool/…/Vortrag_1_-_neue_RAL_Frau_Vetters.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2018.

VIRES (2018): VTD - Vires Virtual Test Drive. Hg. v. VIRES Simulationstechnologie GmbH. Bad Aibling. Online verfügbar unter vires.com/vtd-vires-virtual-test-drive/, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 28.08.2018.

VIRES Simulationstechnologie GmbH (Hg.) (2018a): Open Drive. Online verfügbar unter opendrive.org/, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 07.09.2018.

VIRES Simulationstechnologie GmbH (Hg.) (2018b): Open Scenario. Online verfügbar unter openscenario.org, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 07.09.2018.

Volkswagen Online Konfigurator. Konfigurieren Sie Ihren Volkswagen. (2017). Online verfügbar unter www.volkswagen.de/app/konfigurator, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Volkswagen Service (Hg.) (2002): Selbststudienprogramm 273: Der Phaeton, Komfort- und Sicherheitselektronik. Konstruktion und Funktion.

Vollmer, A. (2016): Interview: Die Automobilindustrie im radikalen Umbruch. Interview mit Mi tgliedern des Audi-EE-Teams und EE-Leiter Ri cky Hudi. In: *Automobil Elektronik* (05-06), S. 14–17.

Volvo Car Support USA (2018): Volvo Customer Help. Adjust the power operated tailgate. Online verfügbar unter volvo.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/9496/~/adjust-the-power-operated-tailgate, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 22.02.2018.

Wallentowitz, H.; Reif, K. (2006): Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. 1. Aufl. s.l.: Vieweg.

Weber, J. (2009): Automotive Development Processes. Processes for Successful Customer Oriented Vehicle Development. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Wehner, P.; Schwiegelshohn, F.; Gohringer, D.; Hubner, M. (2014): Development of driver assistance systems using virtual hardware-in-the-loop. In: 2014 14th International Symposium on Integrated Circuits (ISIC). 10 - 12 Dec. 2014, Singapore. 2014 International Symposium on Integrated Circuits (ISIC). Singapore, 10/12/2014 - 12/12/2014. Nanyang Technological University; Institute of Electrical and Electronics Engineers; International Symposium on Integrated Circuits; ISIC. Piscataway, NJ: IEEE, S. 380–383.

Weit e.V. (2017): V-Modell XT. Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte. Version 2.1, 20.04.2017.

Weitzel, A. (2013): Objektive Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht situationsgerechter Reaktionen umfeldsensorbasierter Fahrerassistenzsysteme. Dissertation. TU Darmstadt, Darmstadt.

Weitzel, A.; Winner, H. (2012): Ansatz zur Kontrollierbarkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund der ISO 26262. In: B. Färber (Hg.): 7. Workshop Fahrerassistenzsysteme, FAS2012. Walting im Altmühltal, 29. - 31. März 2017. Darmstadt: Uni-DAS.

Wiesinger, J. (2017): Kfztech.de. Steuern und Regeln 1 - EVA Prinzip. Kfztech.de. Online verfügbar unter https://www.kfztech.de/kfztechnik/elo/str/steuernundregeln1.htm, zuletzt aktualisiert am 25.10.2017, zuletzt geprüft am 28.12.2017.

Wiktionary-Bearbeiter (2017): Mensch-Maschine Schnittstelle. Hg. v. Das freie Wörterbuch Wiktionary. Online verfügbar unter de.wiktionary.org/w/index.php?title=Mensch-Maschine-Schnittstelle&oldid=5566581, zuletzt aktualisiert am 17.05.2017, zuletzt geprüft am 07.10.2019.

Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (2012): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 2., korrigierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch).

Wisselmann, D.; Gresser, K.; Spannheimer, H.; Bengler, K. & Huesmann, A. (2014): ConnectedDrive - ein methodischer Ansatz für dir Entwicklung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. BMW Group Forschung und Technik.

Wörn, H.; Brinkschulte, U. (2005): Echtzeitsysteme. Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen. Berlin: Springer (eXamen.press).

Yadav, P.; Guddeti, J. (2016): FPGA based validation technique for Advanced Driver Assistance System. In: 2016 Sixth International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED), S. 159–165.

Yamaura, M.; Arechiga, N.; Shiraishi, S.; Eisele, S.; Hite, J.; Neema, S. et al. (2016): ADAS Virtual Prototyping using Modelica and Unity Co-simulation via OpenMETA.

In:. Deployment of high-fidelity vehicle models for accurate real-time simulation, 2011-02-05: Linköping University Electronic Press (Linköping Electronic Conference Proceedings), S. 43–49.

Zander-Nowicka, J. (2008): Model-based testing of real-time embedded systems in the automotive domain. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.

Zhou, J.; Schmied, R.; Sandalek, A.; Kokal, H.; del Re, L. (2016): A Framework for Virtual Testing of ADAS. In: *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.* 9 (1).

Erklärung des Autors:

Die in verschiedenen Abbildungen verwendeten, nicht gesondert referenzierten Symbole, wurden der Symbol-Datenbank **Noun Project** entnommen. Für diese Datenbank wurde eine „royality-free license“ erworben. Diese Lizenz beinhaltet ein „… perpetual, non-exclusive, worldwide right to use each icon you download as many times as you wish and in any medium, without having to credit the icon’s creator[2]” (Noun Project Inc. (2020): Noun Pro - Pricing, thenounproject.com/accounts/pricing/, zuletzt aktualisiert 06.2020, zuletzt geprüft am 30.06.2020).

[2] „…unbefristetes, nicht exklusives, weltweites Recht, jedes heruntergeladene Symbol so oft zu verwenden, wie Sie möchten, und in jedem Medium, ohne den Ersteller des Symbols gutschreiben zu müssen“ (eigene Übersetzung)

Anhang

Anhang A. Detaillierte Beschreibung der Testverfahren des Fahrerassistenzsystem Entwicklungsprozesses

Das vorliegende Kapitel dient der detaillierten Beschreibung der Testverfahren der FAS Entwicklung. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, kann zwischen informellen, statischen und dynamischen Tests unterschieden werden. Informelle Tests beruhen auf subjektiven Einschätzungen zumeist von Entwurfs- und Konzeptmodellen durch Menschen. Statische Tests prüfen Modelle auf Basis von Beurteilungen verschiedener Charakteristika. In dynamischen Tests werden maschinenausführbare Modelle hinsichtlich verschiedener Charakteristika geprüft. Die jeweils getesteten Test-Gegenstände, die am Test beteiligten Rollen, die Testziele, die Testmethode sowie die eingesetzten Testwerkzeuge werden detailliert in **Tabelle Anhang 1** beschrieben.

Tabelle Anhang 1: Detaillierte Beschreibung der Testverfahren im FAS Entwicklungsprozess

Legende: **Name des Testverfahrens** **TG:** Test-Gegenstand, **Z:** Ziel, **TN:** Teilnehmer, **R:** Rollen des Testverfahrens, **M:** Methode, **W:** Werkzeuge des Testverfahrens		
formelle Testverfahren	**Inspektion (auch: Heuristische Evaluation)** (nach Balci 1998, S. 364; Projekt B-U-I 2010; Preim und Dachselt 2015, S. 153; Adler 2010, S. 55)	
	TG: Entwurfs- & Konzeptmodelle von MMS und mechatronischem Regelsystem	**M:** Prüfer untersuchen den (nicht funktionalen) Test-Gegenstand entlang einer formalisierten Checkliste (der sogenannten Heuristik). Ein Moderator führt durch die Inspektion und sorgt für die Dokumentation der gefundenen Fehler. Entwickler unterstützen in der Beschreibung des Test-Gegenstandes
	Z: Auffindung von Konzeptfehlern, Entwurfsfehlern, Usability Fehlern	
	TN: 4-6 Experten aus dem Entwicklungsprozess	
	R: Prüfer, Moderator, MMS/Mechatronik Entwickler	**W:** Formalisierte Checkliste
	Begutachtung (Review) (Balci 1998, S. 364; Rabe et al. 2008, S. 97)	
	TG: Entwurfs- & Konzeptmodelle von MMS und mechatronischen Regelsystem	**M:** Prüfer begutachten den Testgegenstand vor Review, Beurteilung anhand dedizierter Erfolgskriterien. Ein Moderator führt durch den Prozess.
	Z: Qualitätsprüfung der Modellierung und Simulation, Auffindung von Abweichungen zur Spezifikation	
	TN: Experten aus dem Entwicklungsprozess, Management	
	R: Moderator, Prüfer, MMS/Mechatronik Entwickler	**W:** kein, ggf. werden formalisierte Checklisten eingesetzt

Legende: **Name des Testverfahrens** **TG:** Test-Gegenstand, **Z:** Ziel, **TN:** Teilnehmer, **R:** Rollen des Testverfahrens, **M:** Methode, **W:** Werkzeuge des Testverfahrens		
formelle Testverfahren	**Validierung im Dialog** (Balci 1998, S. 363; Rabe et al. 2008, S. 109)	
	TG: Konzeptmodell, ausführbare Modelle des mechatronischen Regelsystems	**M:** Diskussion des Modells durch den Entwickler mit Fachexperten, die Kenntnis über das System besitzen
	Z: Beurteilung der Gültigkeit des Modells eines Systems	
	TN: Naive Probanden, Experten aus dem Entwicklungsprozess	
	R: Prüfer, MMS/Mechatronik Entwickler	**W:** kein, ggf. werden Leitfäden eingesetzt
	Schreibtischtest (Balci 1998, S. 363; Rabe et al. 2008, S. 102; Harvey et al. 2011, S. 568)	
	TG: Alle Modelle, speziell frühe Konzeptmodelle	**M:** Sorgfältige Überprüfung der eigenen Arbeit in Bezug auf Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Eindeutigkeit
	Z: Auffindung von Konzeptfehlern, Entwurfsfehlern, Usability Fehlern	
	TN: Ein Experte aus dem Entwicklungsprozess	**W:** Werkzeuge zur Syntax- und Konventionsprüfung, Abgleich mit Spezifikation, Breakdown-Struktur
	R: MMS/Mechatronik Entwickler	
	Walkthrough (auch: Cognitive Walkthrough) (Balci 1998, S. 366; Projekt B-U-I 2010)	
	TG: Entwurfs- & Konzeptmodelle von MMS und mechatronischem Regelsystem	**M:** Moderator führt anhand des Materials und der Dokumente durch das Walkthrough und fördert Fragen und Diskussionen
	Z: Auffindung und Dokumentation von Fehlern	
	TN: 5-8 Experten aus dem Entwicklungsprozess	
	R: Moderator, Prüfer, MMS/Mechatronik Entwickler, Anwender	**W:** Durch Moderator vorbereites Material und Dokumente

Legende: **Name des Testverfahrens** **TG:** Test-Gegenstand, **Z:** Ziel, **TN:** Teilnehmer, **R:** Rollen des Testverfahrens, **M:** Methode, **W:** Werkzeuge des Testverfahrens		
statische Testverfahren	**Virtuelle Geometrieanalyse** (Bubb 2015, S. 590)	
	TG: Geometriemodelle (CAD, DMU)	**M:** Prüfung des CAD/DMU Modells mit virtuellen Mensch-Modellen (z. B. RAMSIS) auf Erreichbarkeit, Sichtbarkeit, Prüfung von Kollisionen und Verbaubarkeit mit anderen Bauteilen
	Z: Auffindung von Kollisionen, Analyse von Sichtbarkeit und Erreichbarkeit	
	TN: Entwickler aus Konstruktion & MMS Design	
	R: Prüfer, MMS Entwickler	**W:** CAD Modelle und -Tools
	Geometrieanalyse (Bubb 2015, S. 589ff)	
	TG: Physische MMS Attrappen, zum Teil ergänzt durch Geometriemodelle (CAD, DMU)	**M:** Prüfung der MMS durch den Prüfer auf Erreichbarkeit, Sichtbarkeit, Prüfung von Kollisionen und Verbaubarkeit mit anderen Bauteilen
	Z: Auffindung von Kollisionen, Analyse von Sichtbarkeit und Erreichbarkeit	
	TN: Naive Probanden, Experten aus dem Entwicklungsprozess	**W:** Rapid Prototyping Bauelemente, Sitzkiste mit positions- und formgetreuer MMS, Messmittel oder Virtual Reality Anlagen
	R: Prüfer, MMS Entwickler	
	Test der Robustheit und Arbeit unter externem Stress (Schleuter et al. 2007, S. 8; Balci 1998, S. 383; ISO 26262-5, S. 29)	
	TG: Elektronik-Hardware-Prototypen	**M:** Durchführung von Ruhestromprüfungen, Prüfungen der Komponente auf Temperatur, Vibrationen, elektrische Störimpulse, Unter-Überspannung, Feuchtigkeit
	Z: Elektronik-Fehlerfindung bei mechanischer, elektrischer und chemischer Belastung	
	TN: Experten aus dem E/E Entwicklungs-prozess	
	R: Prüfer, Mechatronik Entwickler	**W:** Test-Spezifische E/E-Messwerkzeuge

Legende: **Name des Testverfahrens** **TG:** Test-Gegenstand, **Z:** Ziel, **TN:** Teilnehmer, **R:** Rollen des Testverfahrens, **M:** Methode, **W:** Werkzeuge des Testverfahrens		
statische Testverfahren	**Elektrik-Test** (ISO 26262-5, S. 28)	
	TG: Elektronik-Hardware-Prototypen	**M:** Test auf Anforderungsgerechtes Verhalten in Reaktion auf statische und dynamische elektrische Spannung
	Z: Prüfung des Korrekten Verhaltens bei Spannungsänderung	
	TN: Experten aus dem E/E Entwicklungsprozess	
	R: Mechatronik Entwickler	**W:** Test-Spezifische E/E-Messwerkzeuge
	Kontroll-Analyse (Balci 1998, S. 367–368)	
	TG: Entwurfsmodelle Software & Elektronik, Verhaltensmodelle	**M:** Untersuchung der Zusammenhänge der Kommunikation, des „wer spricht mit wem“, Überlappung parallel laufender Modelle, Untersuchung der logischen Zusammenhänge mit Hilfe eines Kontrollgraphen, Feststellung endlich vieler Modellzustände mit State Transition Diagrammen
	Z: Prüfung der korrekten Kommunikation, der Genauigkeit, Konsistenz	
	TN: Experten aus dem Software & E/E Entwicklungsprozess	
	R: Mechatronik Entwickler	**W:** Kontrollgraphen, State Transition Diagramme
	Fehler-Analyse (Balci 1998, S. 368–369)	
	TG: Entwurfsmodelle Software & Elektronik	**M:** Untersuchungen der Transformation von Ein- zu Ausgabe zur Feststellung, wie das Modell eventuell logisch versagen könnte
	Z: Prüfung auf inkorrekte Model-Komponenten und auf deren inkorrektes Verhalten	
	TN: Experten aus dem Software & E/E Entwicklungsprozess	
	R: Mechatronik Entwickler	**W:** -
Dynamische Testverfahren	**Visualisierung & Animation** (Balci 1998, S. 391–392; Rabe et al. 2008, S. 95–96)	
	TG: Verhaltensmodelle, Softwarecode	**M:** Beobachtung durch Prüfer, gegebenenfalls Fokussierung dessen Aufmerksamkeit durch Beschränkung der Animation auf Teilbereiche
	Z: Transparente Darstellung des System-Verhaltens, Auffindung von Fehlern, in denen das Modell ein Nicht-gültiges Verhalten zeigt.	
	TN: Experten aus dem Entwicklungsprozess	
	R: Prüfer, Mechatronik Entwickler	**W:** Animationswerkzeug

Legende: **Name des Testverfahrens** **TG:** Test-Gegenstand, **Z:** Ziel, **TN:** Teilnehmer, **R:** Rollen des Testverfahrens, **M:** Methode, **W:** Werkzeuge des Testverfahrens		
Dynamische Testverfahren	**Funktionstest** (ISO 26262-5, S. 28)	
	TG: Elektronik-Hardware-Prototypen, Software-Prototypen, Verhaltensmodelle	**M:** Test auf Anforderungsgerechtes Verhalten in Reaktion auf Eingaben des normalen Betriebs durch Signaleingabe und Prüfung der Anforderungskonformen Ausgabe
	Z: Prüfung des Korrekten Verhaltens bei normalen Betrieb, Plausibilitätsprüfung	
	TN: Experten	
	R: Prüfer, Mechatronik Entwickler	**W:** Elektronik-Labor
	Falsch-Eingabe Test (ISO 26262-5, S. 28; Balci 1998, S. 377)	
	TG: Elektronik-Hardware-Prototypen, ggf. virtuelle Elektronik Modelle, Software-Prototypen, Verhaltensmodelle	**M:** Test auf Anforderungsgerechtes Verhalten in Reaktion auf Fehleingaben durch Signaleingabe und Prüfung der Anforderungskonformen Ausgabe
	Z: Prüfung des Korrekten Verhaltens bei normalen Betrieb	
	TN: Experten aus dem E/E Entwicklungsprozess	**W:** Elektronik-Labor, ggf. PC zur modellbasierten Überprüfung
	R: Prüfer, Mechatronik Entwickler	
	Model-in-the-Loop Test (ISO 26262-6, S. 13; Zander-Nowicka 2008, S. 25)	
	TG: Funktionsmodell der Software, Verhaltensmodell	**M:** Festlegung der Test-Anforderungen, Test-Design inkl. Kopplung des Modells mit dem Umgebungsmodell, Test Umsetzung in Closed-Loop Simulation, Test Evaluation sowie Test-Dokumentation
	Z: Plausibilitätsprüfung, Prüfung Reichweiten von In- und Output, Funktionstest	
	TN: Experten aus dem Software-Entwicklungsprozess	
	R: Prüfer, Mechatronik Entwickler	**W:** Entwicklungsrechner mit Umgebungssimulation

Legende: **Name des Testverfahrens** **TG:** Test-Gegenstand, **Z:** Ziel, **TN:** Teilnehmer, **R:** Rollen des Testverfahrens, **M:** Methode, **W:** Werkzeuge des Testverfahrens		
Dynamische Testverfahren	**Software-in-the-Loop Test** (ISO 26262-6, S. 13; Zander-Nowicka 2008, S. 25–26)	
	TG: Softwarecode in Programmiersprache	**M:** Festlegung der Test-Anforderungen, Test-Design, dabei ggf. Konvertierung des Verhaltensmodells mit Codegenerator, Kopplung mit dem Umgebungsmodell, Test Umsetzung in Closed-Loop Simulation, Test Evaluation sowie Test-Dokumentation
	Z: Plausibilitätsprüfung, Prüfung Reichweiten von In- und Output, Echtzeitverhalten, Funktionstest	
	TN: Experten aus dem Software-Entwicklungsprozess	**W:** Entwicklungsrechner mit Umgebungssimulation, ggf. Codegenerator
	R: Prüfer	
	Hardware-in-the-Loop Test (ISO 26262-6, S. 29; Bringmann und Krämer 2008, S. 487; Wisselmann et al. 2014, S. 7; Deicke 2018, S. 36)	
	TG: Softwarecode implementiert auf E/E-Hardware	**M:** Festlegung der Test-Anforderungen, Test-Design inkl. Implementierung des Softwarecodes auf E/E Hardware, Kopplung mit weiteren Elementen des HiL-Prüfstandes, Test Umsetzung als Closed-Loop Tool, Test Evaluation sowie Test-Dokumentation
	Z: Test auf Anforderungskonformes Verhalten, Schnittstellen-Probleme, Echtzeitverhalten des integrierten Systems, Auffindung von Fehlern auf Steuergerät	
	TN: Experten aus dem Software- und aus dem E/E Entwicklungsprozess	**W:** HiL-Prüfstand, inkl. Entwicklungsrechner mit Umgebungssimulation, Sensoren oder Aktoren Ggf. auch Kopplung des HiL-Prüfstandes mit Fahrsimulator
	R: Prüfer	
	Mensch-Maschine Konzeptsimulation (KS Test) (Balci 1998, S. 380; Response Consortium 2009, A59)	
	TG: Rapid Prototyping basierte MMS Prototypen, Seriennahe MMS & mechatronisches Regelsystem	**M:** Probanden führen eine Aufgabe durch und interagieren mit dem Test-Gegenstand, Moderator führt durch den Test und erklärt gegebenenfalls, Prüfer simuliert MMS Funktionen durch „Wizard-of-Oz“ Bedieneingaben, Probanden füllen anschließend Fragebögen aus
	Z: Auffindung von Fehlern oder fehlerhaften Annahmen im MMS Design, Nutz- und Bedienbarkeit der MMS	
	TN: Naive Probanden, Experten aus dem Entwicklungsprozess	**W:** PC oder portable Devices mit digitalen Anzeigeinhalten in AP Tool ohne weitere Testumgebung, oder funktionale, positions- und formgetreue MMS integriert in Testumgebung Sitzkiste, Fahrsimulator oder Modulares Testfahrzeug, Fragebögen zur nachträglichen Auswertung, evtl. Leitfaden zur Durchführung
	R: Prüfer, Anwender	

Legende: **Name des Testverfahrens** **TG:** Test-Gegenstand, **Z:** Ziel, **TN:** Teilnehmer, **R:** Rollen des Testverfahrens, **M:** Methode, **W:** Werkzeuge des Testverfahrens		
Dynamische Testverfahren	**Feldtest** (Balci 1998, S. 378; Response Consortium 2009, A62-A65)	
	TG: Seriennahes mechatronisches Regelsystem, prototypische und seriennahe MMS	**M:** Prüfer untersuchen den Test-Gegenstand im Rahmen einer Aufgabe, bekommt ggf. in Abhängigkeit von der Fragestellung an den Probanden auch Handlungsaufforderungen durch Versuchsleiter/Moderator
	Z: Auffindung von Fehlern oder fehlerhaften Annahmen im MMS Design, Erprobung der Nutz- und Bedienbarkeit	
	TN: Naive Probanden, Experten aus dem Entwicklungsprozess, Professionelle Testfahrer	**W:** Fahrzeug mit seriennahem mechatronischem Regelsystem und prototypischer oder seriennaher MMS, angemessene Teststrecke, Datenaufzeichnungs-Equipment
	R: Prüfer, Anwender	
	Langzeittest (ISO 26262-4, S. 23; Bubb 2015, S. 613)	
	TG: Seriennahe MMS & mechatronisches Regelsystem	**M:** Eine größere Gruppe von Prüfern fährt das Fahrzeug im normalen Straßenverkehr, Versuchsleiter/Moderator gibt ggf. Handlungsaufforderungen
	Z: Demonstration der korrekten Implementierung der funktionalen Sicherheits-Anforderungen, Messung von Effekten, die sich nach längerer Zeit oder Gewöhnung einstellen	
	TN: Naive Probanden, Experten aus dem Entwicklungsprozess	**W:** Fahrzeug mit seriennaher MMS und mechatronischem Regelsystem (ggf. deaktivierte sicherheitsrelevante Funktionen), repräsentative Strecke im normalen Straßenverkehr, Datenaufzeichnungs-Equipment, Messequipment zur Analyse des Fahrers
	R: Prüfer, Moderator, Anwender	
	Nutzertest im Straßenverkehr (ISO 26262-4, S. 24; Bubb 2015, S. 613ff)	
	TG: Seriennahe MMS & mechatronisches Regelsystem	**M:** Eine größere Gruppe von Prüfern fährt das Fahrzeug im normalen Straßenverkehr, Versuchsleiter/Moderator gibt ggf. Handlungsaufforderungen
	Z: Auffindung von Fehlern oder fehlerhaften Annahmen im MMS Design, Erprobung der Nutz- und Bedienbarkeit	
	TN: Naive Probanden, Experten aus dem Entwicklungsprozess	**W:** Fahrzeug mit seriennaher MMS und mechatronischem Regelsystem (ggf. deaktivierte sicherheitsrelevante Funktionen), repräsentative Strecke im normalen Straßenverkehr, Datenaufzeichnungs-Equipment, Messequipment zur Analyse des Fahrers (z. B. Blickdaten, Sitzdruckmessung)
	R: Prüfer, Moderator, Anwender	

Anhang B. Befragung „Fahrsimulatoren zur Absicherung im automobilen Produktentwicklungsprozess“

Fragebogen: Fahrsimulatoren in der Absicherung im automobilen Produktentwicklungsprozess

Vielen Dank das Sie Sich für diesen Fragebogen Zeit nehmen!
Die Beantwortung der Fragen dauert ca. 10 Minuten. Der Fragetypus variiert, zumeist Multiple-Choice oder kurze offene Fragen. Bitte geben Sie bei den offenen Fragen stichpunktartige Antworten.

Inhaltlicher Fokus der Fragen ist der Umgang mit Fahrsimulatoren, die als Absicherungswerkzeug im Entwicklungsprozess von Systemen im Fahrzeug-Cockpit eingesetzt werden.

1. Allgemeine Angaben/Demographischer Teil

In diesem Kapitel geht es um die Erfassung Ihres fachlichen Hintergrundes.

1.1. Wie alt sind Sie?

18-24 Jahre	25-34 Jahre	35-44 Jahre	45-64 Jahre	> 65 Jahre
☐	☐	☐	☐	☐

1.2. Was ist ihr höchster Abschluss?

Fachhochschulreife	Hochschulreife	Abgeschlossenes Studium	Abgeschlossene Promotion	Sonstiges (mit Angabe)
☐	☐	☐	☐	☐ _____

1.3. In welcher Fachrichtung / Studienrichtung haben Sie Ihren höchsten Abschluss?

Fach-/Studienrichtung:	

1.4. In welcher Branche ist Ihr Unternehmen angesiedelt?

Automobil OEM	Automobil Zulieferer	Software-Entwicklung	Forschung/ Universität	Sonstiges
☐	☐	☐	☐	

1.5. Wie lange sind Sie bereits in dieser Branche tätig?

0-1 Jahr	1-2 Jahre	2-5 Jahre	5-10 Jahre	> 10 Jahre
☐	☐	☐	☐	☐

2. Der Fahrsimulator als Absicherungsinstrument

In diesem Kapitel geht es um die Erfassung Ihrer Arbeit mit Fahrsimulatoren.

2.1. Setzen Sie in Ihrem Unternehmen einen Fahrsimulator ein oder sind an der Entwicklung eines Fahrsimulators für Absicherung beteiligt?

- ☐ Einsatz eines Fahrsimulators
- ☐ Entwicklung eines Fahrsimulators
- ☐ Keins von beidem

2.2. Welches System testen Sie/wollen Sie mit dem Fahrsimulator absichern?

Diese Frage dient der Bestimmung des Gegenstands der Tests und Versuche, die in Ihrem Unternehmen mit dem Simulator durchgeführt werden.

- ☐ Fahrerassistenzsysteme
- ☐ Lenksysteme
- ☐ Komfortsysteme (Radio/Entertainment)
- ☐ Navigationssysteme
- ☐ Allgemeine Cockpit-Ergonomie
- ☐ Sonstiges: _____

2.3. Welchen Typ von Entwicklungsmethode(n) nutzen Sie in der System-Entwicklung?

Bei dieser Frage geht es um den methodischen Kontext, in dem Sie ihren Simulator einsetzen. Beispielsweise sehen Entwicklungsmethoden, die im Bereich des Systems Engineering sind, eine entwicklungsbegleitende Eigenschaftsabsicherung durch Simulationen/Tests vor.

- ☐ Systems Engineering
- ☐ Klassische Konstruktionsmethodik (z. B. Pahl-Beitz)
- ☐ Model Based Engineering
- ☐ User Centered Design
- ☐ Keine/nicht bekannt
- ☐ Sonstiges: _____

3. Zeitpunkt der Nutzung des Fahrsimulators als Absicherungsinstrument

3.1. Welches Simulationsverfahren nutzen Sie zur Absicherung?

- ☐ Model-in-the-Loop,
- ☐ Software-in-the-Loop
- ☐ Hardware-in-the-Loop
- ☐ Vehicle-in-the-Loop
- ☐ Fahrsimulator
- ☐ Sonstiges: _____

3.2. Welches Setup zwischen Virtuellen und physischen Elementen hat Ihr Fahrsimulator?

	Keine Anteile				Ausschließlich Anteile
	1	2	3	4	5
Physische Anteile	☐	☐	☐	☐	☐
Virtuelle Anteile	☐	☐	☐	☐	☐

3.3. Zu welchem <u>Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses</u> setzen Sie Fahrsimulatoren heute ein? Bitte markieren sie dafür den Zeitpunkt im unten stehenden automobilen Produktentwicklungsprozess.

☐	☐	☐	☐	☐

4. Potential der Nutzung des Fahrsimulators als Absicherungsinstrument

4.1. Wenn Sie sich die Simulator-Nutzung vergegenwärtigen: Was wäre die für Sie als Entwickler akzeptable Änderungszeit für den Wechsel von einer <u>Hardware-Konfiguration</u> in die andere?
<u>Hardware-Konfigurationen</u> können z. B. verschiedenen Lenkräder oder Bedienknöpfe/Displays sein

< 1/2h	1/2h-1h	1h-2h	2h-4h	>4h
☐	☐	☐	☐	☐

4.2. Wenn Sie sich die Simulator-Nutzung vergegenwärtigen: Was wäre die für Sie als Entwickler akzeptable Änderungszeit für den Wechsel von einer <u>Software-Konfiguration</u> in die andere?
<u>Software-Konfigurationen</u> können z. B. verschiedenen Fahrerassistenzsystem-Modelle oder Infotainment-Logiken sein

< 1/2h	1/2h-1h	1h-2h	2h-4h	>4h
☐	☐	☐	☐	☐

4.3. Warum werden Fahrsimulatoren Ihrer Meinung nach nicht früher im Entwicklungsprozess eingesetzt?

- ☐ Kosten zu hoch
- ☐ Simulator ist nicht flexibel genug
- ☐ Zu testende Modelle noch nicht verfügbar
- ☐ Fehlende Kapazität
- ☐ Fehlende Aussagekraft
- ☐ Sonstiges: _____

4.4. Zu welchem <u>Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses</u> sehen Sie einen sinnvollen zukünftigen Einsatz für den Fahrsimulator? Bitte markieren sie dafür den Zeitpunkt im untenstehenden Entwicklungsprozess.

☐	☐	☐	☐	☐

Anhang C. Gestaltungsparameter für Fahrsimulatoren

Wie in Kapitel 5.5 dargestellt, wurde im Projekt „Fahrsimulatorlandkarte“ exemplarisch eine für den Anwendungsfall des Tests von FAS nutzbare Fahrsimulator-Konfiguration bestimmt. Die Fidelity-Stufe der 60 Gestaltungsparameter sind in der nachfolgenden **Tabelle Anhang 2** jeweils grau hinterlegt dargestellt.

Die in Kapitel 5.4 beschriebenen Gestaltungsparameter des HPiL Fahrsimulators weichen von dieser Konfiguration ab. In der Tabelle sind diese daher schwarz hinterlegt dargestellt.

Die Fidelity-Stufen „Spezifisch (S)“, „Repräsentativ (R)“, „Generisch (G)“ und „Kein (K)“ beschreiben die Ausprägung des Gestaltungsparameters. Stufe S stellt die höchste und Stufe K die niedrigste Ausprägung dar.

Tabelle Anhang 2: Gestaltungsparameter-Konfiguration eines Fahrsimulators für den Test von FAS (nach Fischer, Buchholz, Hartfiel et al.) sowie abgeleitete Fahrsimulator-Konfiguration für den HPiL Test

Parameter	**Parameter-Bezeichnung**	**K Kein**	**G Generisch**	**R Repräsentativ**	**S Spezifisch**
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.)				
	Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
KON1	**Fester oder transportierbarer Simulator**	nicht zutreffend	fester Simulator in einem normalen Raum/Gebäude	fester Simulator in einem spez. Raum/Gebäude	Location wird entsprechend der Versuche geändert
KON2	**MockUp Größe**	Fahrersitz	Vordersitze	Alle Sitzreihen des Fahrzeugs	Komplettfahrzeug
MOT1	**Bewegungshülle Beschleunigung/ Kapazität (rot)**	keine Bewegung	skaliert und gefiltert oder irrelevant für die Bewegung	skaliert aber nicht gefiltert	unskaliert und nicht gefiltert
MOT2	**Bewegungshülle Beschleunigung/ Kapazität (transl)**	keine Bewegung	skaliert und gefiltert oder Tilt-Coordination ist aktiv oder irr. für die Bew.	skaliert aber nicht gefiltert	unskaliert und nicht gefiltert
MOT3	**Frequenzbereich (Phase)**	keine Bewegung	manöverspezifische Frequenzen mit wahrnehmbaren Phasen-Verschiebungen oder irr. für die Bewegung	manöverspezifische Frequenzen mit kleiner oder ohne Phasen-verschiebung	alle Frequenzen mit kleiner oder ohne Phasenverschiebung

Parameter	Parameter-Bezeichnung	K Kein	G Generisch	R Repräsentativ	S Spezifisch
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.)				
	Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
MOT4	**Frequenzbereich (Amplitude)**	keine Bewegung	manöverspezifische Amplituden teilweise darstellbar oder irrelevant für die Bewegung	manöverspezifische Amplituden im wesentlichen darstellbar	identisch zum Original
MOT5	**Eff. Richtung der Beschleunigung**	keine Bewegung	darstellbar mit großen Abweichungen	darstellbar mit kleinen Abweichungen	identisch zum Original
MOT6	**Motion Cueing**	keine Bewegung	State-of-the-Art Motion oder irrelevant	experimentspezifische Parameter	experimentspezifische Algorithmen
HAP1	**Frequenzbereich Sitz Shaker**	kein Sitz Shaker	stochastisches Signal	Frequenzbereich Limitierungen	vollständig valider Frequenzbereich
HAP2	**Shaker Fußraum**	kein Fußraum Shaker	stochastisches Signal	Frequenzbereich Limitierungen	vollständig valider Frequenzbereich
HAP3	**Shaker an den Pedalen**	kein Pedalshaker	stochastisches Signal	Frequenzbereich Limitierungen	vollständig valider Frequenzbereich
HAP4	**Force Feedback am Lenkrad**	kein Force Feedback	unzureichende Kräfte, simple Kraftberechnung	realistische Kräfte vom Dynamikmodell	speziell angepasste Hardware und Software
CP1	**Realismus Anzeigen**	nicht gleichwertig zu realem Cockpit, Instrumente fehlen	funkt. Vergleichbarkeit mit realen Instrumenten, teilweise exakte Replikation, grafische Replikation	alle Instrumente sind funktional verfügbar, teilweise exakte Replikation, grafische Replikation	exakte Replikation, alle Instrumente mit der vollen Funktionalität
CP2	**Realismus Bedienelemente**				
CP 3	**Flexibilität HW (Bedienelemente und Anzeigen)**	Cockpit Design ist nicht flexibel	einige Komponenten sind variierbar	die meisten Komponenten sind variierbar	vollständig variierbar

Parameter	Parameter-Bezeichnung	K Kein	G Generisch	R Repräsentativ	S Spezifisch
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.) Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
CP 4	**Flexibilität HW (Sitzkiste)**	nicht relevant	Sitzpos., Lenkrad und Pedalerie nicht projektspezifisch verstellbar	Sitzpos., Lenkrad, Pedalerie und weitere Komponenten variierbar	vollständig variierbar
CP 5	**Flexibilität SW**	keine Änderungen erf.	Parameter sind versuchs-spezifisch variierbar	Module sind variierbar	Module sind austauschbar
CP 6	**Ergonomie**	unzutreffend	beeinflusst Ergebnisse der Versuche, geringe Anforderungen	für Elemente korrekt, die den Versuch betreffen, mittlere Anforderungen	identisch zum Original, hohe Anforderungen
VIS1	**Field of View (horizontal)**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant, eingeschränkt	im Wesentlichen korrekt	identisch zum Original
VIS2	**Field of View (vertikal)**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant, eingeschränkt	im Wesentlichen korrekt	identisch zum Original
VIS3	**Sichtweite**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant, eingeschränkt	Realitätsnahe Fernsicht durch gekrümmtes Display	identisch zum Original
VIS4	**Helligkeit**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant, eingeschränkt	im Wesentlichen korrekt	identisch zum Original
VIS5	**Edge Blending/ Farbkorrektheit**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant (2D Darstellung oder HMD) oder erkennbare Fehler	Edge Blending okay, Farbkorrektheit kann nicht kalibriert werden, ist aber realistisch	Edge Blending okay, Farbkorrektheit kann kalibriert werden
VIS6	**Auflösung**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant, eingeschränkt	für den Versuch ausreichend	Vergl. mit dem Auflösungsvermögen des Auges

Parameter	Parameter-Bezeichnung	K Kein	G Generisch	R Repräsentativ	S Spezifisch
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.)				
	Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
VIS7	**Framerate**	keine Visualisierung	für den Versuch irr., sichtbares Ruckeln	var. Framerate, kein wahrnehmbares Ruckeln	konstante Frame Rate
VIS8	**Qualität von atmos. Effekten**	keine Visualisierung	irrelevant oder vereinfacht	im Wesentlichen korrekt	identisch zum Original
VIS9	**Bewegungs-parallaxe**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant	darstellbar durch Sensoren und Software	Blickdistanz ist ausreichend für optimale Bewegungsparallaxe
VIS10	**Stereosehen, 3D-Effekte**	keine Visualisierung	kein Stereosehen, 2D-Visualisierung	einfaches Stereosehen durch Headtracking	realistischer 3D Effekt
VIS11	**Visualisierungs-qualität**	keine Visualisierung	für den Versuch irrelevant	ausreichend (Schmiereffekte, wenige Farbartefakte)	hohe Qualität (keine Schmiereffekte, keine Farbartefakte)
VIS12	**Echtzeitbedarf & Latenz der Visualisierung**	statische Bilder oder Video, irrelevant	"geringe Echtzeitfähigkeit“ (unter 10Hz), hohe Latenz	"mittlere Echtzeitfähigkeit“ (10Hz-50Hz), wahrnehmbare geringe Latenz	"hohe Echtzeitfähigkeit“ (mehr als 50Hz), Latenz unterhalb der Wahr-nehmungsschwelle
VIS13	**Realismus / Szenario De-taillierungsgrad**	keine Visualisierung	geringe Bedeutung der Visualisierung, vereinfachte Modelle	komplex, detaillierte Modelle	realistisches Szenario mit hoch-aufgelösten Modellen
SIM1	**Verkehr**	keine Verkehrs-simulation	Verkehr hat Einfluss auf den Versuch, Verkehrsteilnehmer beeinflussen aber nicht aktiv den Versuch	Kollisionsmodell und Verkehrsteilnehmer, die Verkehrsregeln befolgen	spezielle Szenarios, Verkehrsteilnehmer reagieren auf das User-Verhalten

Parameter	Parameter-Bezeichnung	N Kein	G Generisch	R Repräsentativ	S Spezifisch
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.) Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
SIM2	**Menschen / Passanten**	keine Simulation von Passanten	für den Versuch irrelevant, Passanten bewegen sich nicht	Passanten sind Teil der Simulation, zufällige Bewegungen	spezielle Szenarien, Passanten reagieren auf das User-Verhalten
SIM3	**Szenario- und Umgebungs-design**	keine Umgebung erforderlich	nahezu keine Umgebung, offene Fläche	vorgegebener Straßenverlauf, generische Landschaft	real. Straßenverlauf, Verkehr hochwertige Umgebung, Kollisionserkennung
SIM4	**Detaillierungs-grad der Strecken-führung**	Streckenführung nicht erforderlich	geringer Detaillierungsgrad der Streckenführung	hoher Detaillierungsgrad der Streckenführung, geringer Detaillierungsgrad der Oberflächen-besch. (Rauigkeit, etc.)	hoher Detaillierungsgrad der Streckenführung und der Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit, etc.)
SIM5	**Variabilität des Szenarios**	keine Anpassungen erf.	Anpassungen sind gelegentlich erforderlich	Werkzeuge für schnelle Anpassungen sind vorh.	Anpassung während des Versuchs ist möglich
SIM6	**Komplexität Streckenverlauf**	keine Streckenführung erforderlich	Längs- oder Querdynamik (Kreisfahrt, Autobahn)	Längs- und Querdynamik, geringe Komplexität (z. B. Landstraße)	Längs- und Querdynamik, hohe Komplexität (z. B. Stadt)
SIM7	**Verhaltensmodell des Fahrers**	kein Fahrermodell erforderlich	Fahrer fährt vorgegebene Strecke ab, keine Interaktion mit der Umgebung	Fahrer fährt vorgegebene Strecke ab und reagiert dabei auf Umgebungsreize	Fahrer ist durch kognitives Modell abgebildet und navigiert das Fahrzeug selbstständig

Parameter	Parameter-Bezeichnung	N Kein	G Generisch	R Repräsentativ	S Spezifisch
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.)				
	Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
AUD1	**störende Geräusche (z. B. durch den Fahrsimulator)**	für den Versuch irrelevant, Geräusche wahrnehmbar	Geräusche vorhanden aber verglichen mit den Umgebungssound irrelevant	keine wahrnehmbaren Störgeräusche	nicht zutreffend
AUD2	**Fahrzeugsounds**	keine Simulation von Fahrzeugsounds	Simulation von Fahrzeugsounds ist irrelevant oder generisch	einzelne Fahrzeugsounds werden exakt widergegeben	alle Fahrzeugsounds werden real. widergegeben
AUD3	**Umgebungssounds**	keine Umgebungssounds	Simulation von Umgebungssounds ist irrelevant oder generisch	einzelne Umgebungs-sounds werden exakt widergegeben	alle Umgebungssounds werden realistisch widergegeben
AUD4	**dynamische Soundeffekte**	keine dynamischen Soundeffekte	Simulation von dynamischen Sound-effekten ist irrelevant oder generisch	einzelne dynamische Soundeffekte werden exakt widergegeben	alle dynamischen Sounds werden realistisch widergegeben
AUD5	**Int. und ext. Soundquellen**	keine Soundquellen	nur Kopfhörer	Soundquellen innerhalb der Simulatorzelle	interne und externe Soundquellen
AUD6	**Surround Sound**	kein Surround Sound	Surround Sound irrelevant, Stereo	Surround Sound	Speziallösungen
DYN1	**Validierung**	Validierung irr., keine Validierung erfolgt	einige Komponenten der Modelle sind validiert mit Simulationen	einige Komponenten der Modelle sind validiert mit Realversuchen	vollständig mit Realversuchen validierte Modelle
DYN2	**Detaillierungs-grad Fahrdynamikmodell**	keine Fahrdynamik-modelle erforderlich	Detaillierungsgrad ist irrelevant, generisches Fahrdynamikmodell (Ein-Spur-Modell)	erweitertes Fahrdynamikmodell (z. B. zwei-Spur-Modell)	detailliertes Fahrdynamikmodell

Parameter	Parameter-Bezeichnung	N Kein	G Generisch	R Repräsentativ	S Spezifisch
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.)				
	Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
DYN3	**Modellvalidität**	keine Fahrdynamik-modelle erforderlich	Arbeitsbereich irrelevant für den Versuch	Fahrdynamik-modell ist validiert für den Arbeitsbereich, der für Versuch erf. ist	Fahrdynamik-modell ist für den kompletten Arbeitsbereich validiert
TG1	**Reifegrad Software-Prototyp**	kein Software-Prototyp	Verhaltens-modell	prototypische Software-Implementation in Code	Seriensoftware
TG2	**Reifegrad phys.-Prototyp**	kein physischer Prototyp	alte Geräte, Elektronik-Baukasten oder Standardelemente	seriennahe Hardware	Serienhardware
TG3	**Typ virtueller Prototyp**	kein virtueller Prototyp	statisches CAD Modell oder Digital Mock Up (DMU)	erweitertes CAD Modell (FEM-, MKS-Modell oder Sonstiges)	funktionales Digital Mock Up - Kopplung mit Verhaltensmodell
TG4	**Aufwand Ein-bindung Prototyp**	"kein Aufwand/ nicht zutreffend"	geringer Aufwand	mittlerer Aufwand	hoher Aufwand
TG5	**Interaktion des Prototypen mit Fzg-Systemen**	keine Interaktion mit anderen Fzg-Systemen	geringe Interaktion mit 1 oder 2 Systemen	mittlere Interaktion mit 3 bis 20 anderen Fahrzeug-Systemen	hohe Interaktion mit mehr als 20 anderen Fahrzeugsystemen
TG6	**Kompatibilität zur IT-Umgebung**	unabhängig und nicht verbunden	Daten müssen manuell exportiert, gewandelt und importiert werden	über eine dedizierte Schnittstelle sind Daten austauschbar	mit allen relevanten Systemen durchgängig integriert

Parameter	Parameter-Bezeichnung	N Kein	G Generisch	R Repräsentativ	S Spezifisch
Legende Fidelity Stufe	für Fahrerassistenzsysteme (nach Hartfiel et al.)				
	Für den HPiL Test (wenn unterschiedlich zu Hartfiel et al.)				
TG7	**Echtzeitanforderung durch den Prototypen-Test**	keine	"weiche" Echtzeit - System arbeitet typischerweise alle ankommenden Eingaben schnell genug ab	"harte" Echtzeit - Eine Überschreitung der Antwortzeit wird als ein Versagen gewertet	Prototypentest kann schneller als Echtzeit ausgeführt werden
TU1	**Aufnahme der individuellen Probanden Messwerte**	keine	Fragebogen für den einzelnen Versuch	Fragebogen ist für andere Versuche wiederverwendbar	standardisierter Fragenkatalog
TU2	**Auswertung mit Wahrnehmungsmodell**	kein Wahrnehmungsmodell	einfaches Wahrnehmungsmodell	Standard-Wahrnehmungsmodell	spezielles Wahrnehmungsmodell erforderlich
TU3	**Messwertaufnahme Proband qualitativ**	keine Aufnahme erforderlich	Beobachtung ohne Aufnahme möglich	Beobachtung und Aufnahme einzelner Parameter möglich	Beobachtung und Aufnahme vollständig möglich (inkl. Simulationsdaten)
TU4	**Messwertaufnahme Test quantitativ**	keine	Fahrzeug-Fahrdaten	Fahrzeug-Fahrdaten + Umgebungsdaten	alle virtuellen Daten
TU5	**Vordefinierte Fahrbahnen**	keine Vorgaben	spezifische Fahrbahnen für den Versuch	intern standardisierte Fahrbahnen	Fahrbahnen nach ISO
TU6	**Anforderungen an Probanden**	keine Probanden erforderlich	keine Anforderungen	ausgewählte Testpersonen	ausgewählte Test-personen mit speziellem Wissen (Experten)

Anhang D. Prozesse, Methoden und Werkzeuge der HPiL Methodik

Tabelle Anhang 3: Prozessschritte inklusive beteiligter Rollen, Artefakte und methodische Schritte des HPiL Prozesses

Prozess-schritt (Beteiligte Rollen)	**Artefakte**	**Methodische Schritte**
(1) HPBench Planung (Systemintegrator)	-	• Analyse des Anwendungskontextes • Analyse der eingesetzten Entwicklungstools • Analyse und Bewertung bestehender Fahrsimulator-Elemente • Definition der Gestaltungsparameter-Konfiguration des Fahrsimulators und Definition der erforderlichen Anpassungen • Definition der Konfiguration des HPBench Frameworks auf Basis der Vorgaben des HPBench Frameworks und des Kontextes • Definition der Konfiguration des HPBench Baukastens auf Basis der Vorgaben des HPBench Frameworks und des Kontextes • Definition der Konfiguration des HPBench Templates auf Basis der Vorgaben des HPBench Frameworks und des Kontextes
(2) HPBench Spezifikation (Systemintegrator)	*HPBench Baukasten (inklusive Spezifikations-Dokument)*	• Auswahl der prototypischen Anzeige- und Bedienhardware aus gebrauchsfertige Hardware der Unterhaltungselektronik, Originalteilen aus dem KFZ-Bereich und dem Elektronik Prototyping auf Basis der Konfiguration • Aufbau der prototypischen Anzeige- und Bedienhardware • Umsetzung der Hardware-Schnittstellen zur Kopplung mit dem Mikrocontroller und Fahrsimulator • Auswahl der parametrierbaren, vorgefertigte Anzeige-Softwarebausteine im AP Tool auf Basis der Konfiguration • Aufbau der parametrierbaren, vorgefertigte Anzeige-Softwarebausteine im AP Tool
	HPBench Templates (für CASE-Tool)	• Aufbau vorkonfigurierte Struktur in CASE-Tools nach Vorgaben der erstellten Konfiguration • Erstellung des Spezifikationsdokumentes zur Beschreibung der Struktur und Schnittstellen für den Mechatronik-Entwickler

Prozess-schritt (Beteiligte Rollen)	**Artefakte**	**Methodische Schritte**
(2) HPBench Spezifikation (System-integrator)	*HPBench Template (für AP-Tool)*	• Aufbau vorkonfigurierte Struktur in AP-Tools nach Vorgaben der erstellten Konfiguration • Erstellung des Spezifikationsdokumentes zur Beschreibung der Struktur und Schnittstellen für den MMS-Entwickler
	HPBench Operator Panel	• Aufbau des Operator Panels zur Online-Änderung von vordefinierten Parametern in den CASE Tools, den AP Tools nach Vorgaben der erstellten Konfiguration • Erstellung des Spezifikationsdokumentes zur Beschreibung der Anwendung für den Prüfer
	Fahr-simulator	• Zielgerichteter Aufbau des Fahrsimulators entsprechend der Gestaltungsparameter-Konfiguration und der Definition der erforderlichen Anpassungen • Definition der Schnittstellen zur Anbindung prototypischen Anzeige- und Bedienhardware des HPBench Baukastens • Anbindung des Operator Panels an den Fahrsimulator
Entwicklung des mechatronischen Regelsys-tems (Mechatronik-Entwickler)	*Funktionale CASE-Tool Prototypen*	• Einbindung der Verhaltensmodelle der Mechatronik-Entwicklung in die Leerstelle der HPBench Templates • Funktionstest des Funktionale CASE-Tool Prototyps
	E/E System-Architektur	• Spezifikation der einzusetzenden Sensoren, Aktoren und Car2X Systeme
	3D E-CAD Modelle	• Erstellung der 3D E-CAD Modelle zur korrekte Positionierung und Ausrichtung der einzusetzenden Sensoren, Aktoren und Car2X Systeme
Entwicklung der MMS (MMS-Entwickler)	*Vordefinierte, digitale Anzeigein-halte*	• Einbindung des AP-Modells der MMS-Entwicklung in die Leerstelle der HPBench Templates • Aubau der digitalen Anzeigeinhalte mit Hilfe der parametrierbaren, vorgefertigten Anzeige-Softwarebausteine des HPBench Baukasten • Funktionstest der vordefinierten, digitalen Anzeigeinhalte
	MMS Basis-Entwurf	• Definition der Fahreraktivitäten zum Betrieb des Systems, der jeweils ausgetauschten Informationen sowie der Prozeduren zur wechselseitigen Übergabe
	3D CAD Modelle	• Erstellung der 3D CAD Modelle zur Positionierung und Orientierung der Anzeigen und Bedienelemente

Prozess-schritt (Beteiligte Rollen)	**Artefakte**	**Methodische Schritte**
(3) Aufbau Planung (System-integrator, Prüfer, ggf. durch Unter-stützung der Entwickler)	*HP Prüf-Spezifikation*	• Definition der Testmethoden, Abdeckungskriterien und Testabschlusskriterien durch den Prüfer • Strukturierung und Priorisierung der Tests durch den Prüfer
	Anpassung des Fahrsi-mulators auf den Anwen-dungsfall	• Analyse der Anforderungen der Prüfspezifikation hin-sichtlich Anforderungen an den Fahrsimulator durch den Systemintegrator • Anpassungen des Fahrsimulators durch den Sys-temintegrator
	Hybrider FAS Prototyp, installiert in Fahrsimula-tors	• Modellierung der Sensoren, Aktoren und Car2X Sys-teme im Simulationssystem nach Vorgabe der E/E System-Architektur • Positionierung und Ausrichtung Sensoren, Aktoren und Car2X Systeme im Simulationssystem nach Vor-gabe der 3D E-CAD Modelle • Auswahl der hybriden Anzeigen und Bedienelemente auf Basis des MMS-Basisentwurfs • Einbau, Positionierung und Ausrichtung Aufbau der hybriden Anzeigen und Bedienelemente im Fahrsimu-lator nach Vorgabe des 3D CAD Modells • Integration der funktionale CASE-Tool Prototypen • Integration der vordefinierten, digitalen Anzeigeinhalte
(4) Aufbau Spezifikation (System-integrator, Prüfer)	*HP Prüf-Spezifikation (erweitert)*	• Spezifikation der Testfälle durch Prüfer • Zuordnung der Testfälle zur Anforderungen der Ent-wicklung • Spezifikation der Testszenarien
	Hybrider FAS Prototyp (erweitert), installiert in Fahrsimula-tors	• Aufbau der virtuellen Fahrumgebung und des virtuel-len Fahrzeugs durch Systemintegrator • Aufbau & Konfiguration der Testszenarien im Simula-tionssystem durch Systemintegrator • Vorbereitung des Messequipments für Online & Off-line Testdatenaufnahme durch Systemintegrator
(5) Test Durch-führung (System-integrator, Prüfer)	*Online Test-daten*	• Durchführung der Testfälle und Testszenarien durch Prüfer • Aufnahme der Online-Testdaten durch Prüfer • „Online“ Parametrierung des hybriden FAS Prototyps über Operator-Panel durch Prüfer • „Offline“ Änderung von Anzeigen und Bedienelemen-ten mit HPBench Baukasten durch Systemintegrator
(6) Test Aufnahme (Prüfer)	*Offline Test-daten*	• Erhebung von Offline-Testdaten durch Prüfer • Erstellung von Testprotokollen durch Prüfer

Prozess-schritt (Beteiligte Rollen)	**Artefakte**	**Methodische Schritte**
(7) Test Auswertung & Abschluss (System-integrator, Prüfer)	*HPiL Prüfbericht*	• Zusammenfassung der gesammelten Testdaten durch Prüfer • Analyse der gesammelten Testdaten durch Prüfer • Auswertung des Testprozesses durch Prüfer • Durchführung einer Ergebnisanalyse durch Prüfer • Erarbeitung von Korrekturvorschlägen durch Prüfer

Anhang E. Erste Evaluationsstudie

Exemplarische Messdaten der Projektteams

Nachfolgend sind zwei Fälle dargestellt: **Abbildung Anhang 1** zeigt exemplarisch einen Fall, in dem das BCAS sowohl im MiL wie auch im HPiL Test beherrschbar ist, das Beherrschbarkeits-Kriterium 16 erfüllt wird. **Abbildung Anhang 2** zeigt einen zweiten Fall, in dem das Beherrschbarkeits-Kriterium 16 nicht erfüllt wird. Beide Darstellungen basieren auf Messdaten des Projektteams 3: Auf Fahrdaten (Geschwindigkeit), Sensordaten (Abstand) und der Ausgabe des CASE-Tools (Aktivierung der Warnstufe). Es werden jeweils der MiL Test links und der HPiL Test (1) rechts in der Abbildung dargestellt.

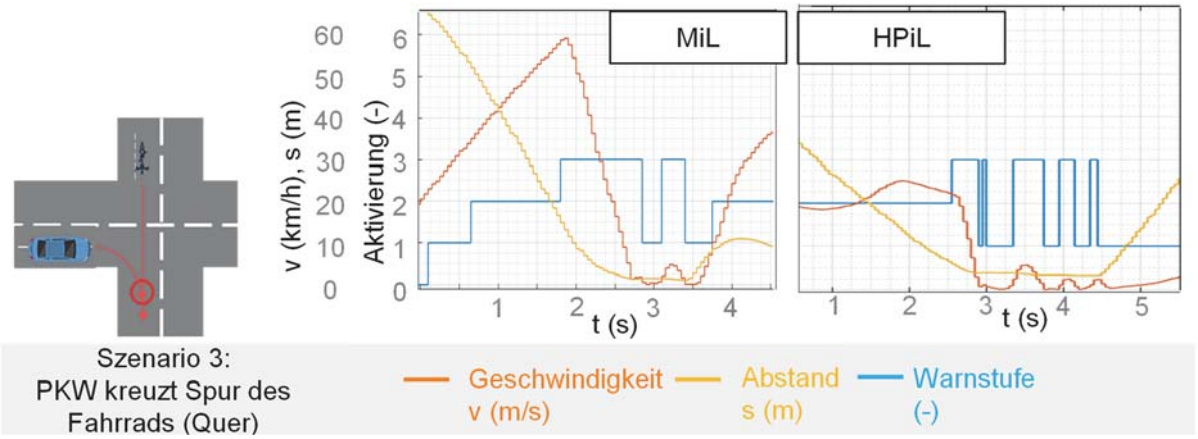


Abbildung Anhang 1: Messdaten des BCAS-Tests in Szenario 3/Projektteam 3 – (Links) MiL Test, (Rechts) HPiL Test (nach Engel et al. 2017)

In beiden Messdaten in **Abbildung Anhang 1** ist das dreistufige Warnkonzept erkennbar: Die Aktivierung der Warnstufe schaltet zwischen den Stufe 0 (keine Warnung), Stufe 1 (Warnanzeige Stufe 1), Stufe 2 (Warnanzeige Stufe 2) und Stufe 3 (Warnanzeige Stufe 3 und Eingriff des BCAS in die Bremse) hin und her. Dazu ist ein Zusammenhang zwischen der Aktivierung der dritten Warnstufe und einer Geschwindigkeitsreduktion zu erkennen. Das Fahrzeug verzögert jeweils erfolgreich. Aus den Messdaten kann im Szenario eine Vorwarnzeit von etwa 1,6s und eine Verzögerung von etwa 6m/s^2 extrahiert werden. Nach den Kriterien des Tests von LKWs, die eine Vorwarnzeit von mindestens 1,2s bei einer Verzögerung von 5m/s^2 vorschreiben, kann das Fahrzeug „rechtzeitig und komfortabel zum Stehen gebracht werden“ (nach Seiniger et al.

2017, S. 327–328). Wie erkennbar, kommt es nach einer längeren ersten Bremsphase in beiden Tests zum wiederholten schnellen Umschalten zwischen Warnstufe 1 (nur Warnung) und Warnstufe 3 (Warnung und Notbremsung). Die Algorithmen des BCAS basieren auf einem Momentan-Wert der Zeit bis zur Kollision t_{TC}: In der Abbiegesituation des Szenarios 3 ist diese bis zum Stand des Fahrzeugs immer kritisch, das BCAS löst die Bremse aus. Erst nachdem das Fahrzeug das Fahrrad in Parallelfahrt ausbeschleunigt, kann die Warnstufe verringert werden. Die resultierende Abweichung ist für die Anforderungserfüllung der Anforderung 16 jedoch unkritisch: Der Unfall wird auf jeden Fall verhindert. **Abbildung Anhang 2** zeigt die Messdaten des für das BCAS der Projektteams 1 und 3 kritischen Szenarios 2 „links abbiegen“. Wie zu erkennen ist, nähert sich das Fahrzeug dem Fahrrad durch die hohe Differenzgeschwindigkeit sehr schnell. Das BCAS löst daher bereits bei hohem Abstand von etwa 60m (MiL) beziehungsweise 140m (HPiL) die Notbremsung aus. Im MiL Test wird das Fahrzeug so von etwa 6m/s auf eine Geschwindigkeit von 0,5m/s, also nahezu Stillstand, herab gebremst. Anschließend beschleunigt das Fahrzeug wieder und wird bei erneuter Annäherung an das Fahrrad wiederholt kurz gebremst. Nach dem Passiervorgang, der etwa bei 3,5s abgeschlossen ist, entfernt sich das Fahrzeug vom Fahrrad. In der Abstandsmessung ist eine Übergabe von Sensor 1 auf Sensor 3 erkennbar. Es ist zwischen Sekunde 3,5 und 4 eine vermeintliche Lücke in der Sensorerfassung erkennbar: Trotz geringem Abstand von zuvor 0,5m wird auf Warnstufe 0 zurückgefahren, der anschließend durch Sensor 3 angezeigte Abstand liegt dann sogar bei 0m. Eine nur auf Messdaten basierte Interpretation lässt damit auf eine Kollision schließen. Der Abgleich mit der Screencast-Aufnahme der Fahrt beweist allerdings die Kollisionsfreiheit.

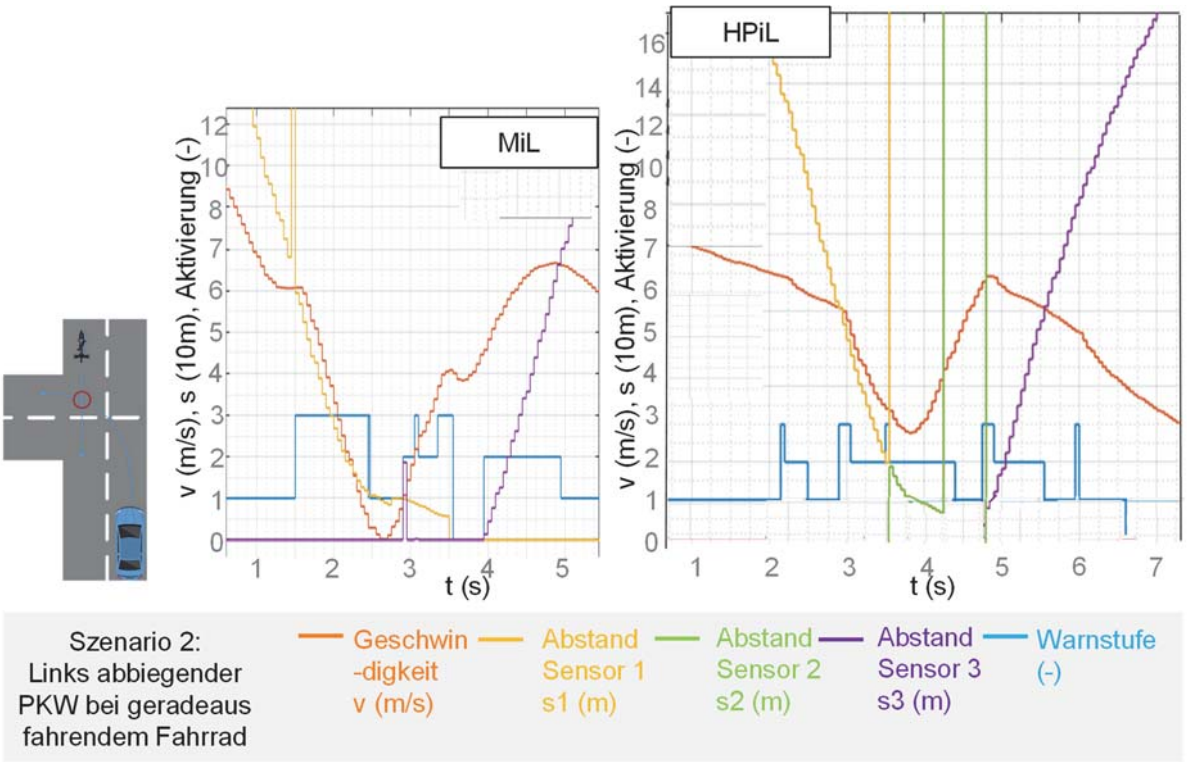


Abbildung Anhang 2: Messdaten des BCAS-Tests in Szenario 2/Projektteam 3 – (Links) MiL Test, (Rechts) HPiL Test (nach Engel et al. 2017)

Im HPiL Test wird die Notbremsung am Beginn nur kurz ausgelöst, anschließend springt die Warnstufe zwischen 1 und 3, die Geschwindigkeit fällt im gesamten Test nie unter 2,5m/s. Dieses Verhalten resultiert aus dem durch das Projektteam angegebene „schlechte Timing“ des Anwenders. Zum einen fährt dieser langsamer als der

MiL-Fahrer an die kritische Situation heran, zum anderen lenkte der Anwender weniger konstant und gleichmäßig als der ideale MiL Fahrer. In Konsequenz greift das BCAS nicht konstant, sondern nur sporadisch bei Überschreitung des Grenz-Lenkwinkels und zu geringer t_{tc} ein. Die Geschwindigkeit kann nicht ausreichend verringert werden, es kommt zur Kollision. Diese befindet sich in der auch hier erkennbaren Sensorlücke zwischen Sekunde 4.3 und 5.0, und wurde durch Beobachtung und Auswertung des Screencasts festgestellt.

Fragebogen „Beherrschbarkeits-Testbarkeit Mechatronik“ (Englisch)

	No agreement			**Full agreement**	
	1	2	3	4	5
1. The Controller Framework is easy to understand	☐	☐	☐	☐	☐
2. The behavior models are easy to adapt to the controller framework	☐	☐	☐	☐	☐
3. The controller Framework enables an fast integration of behavior models	☐	☐	☐	☐	☐
4. Controller Framework enables easy live parameter changes at behavior models during test	☐	☐	☐	☐	☐

Fragebogen „Beherrschbarkeits-Testbarkeit MMS“ (Englisch)

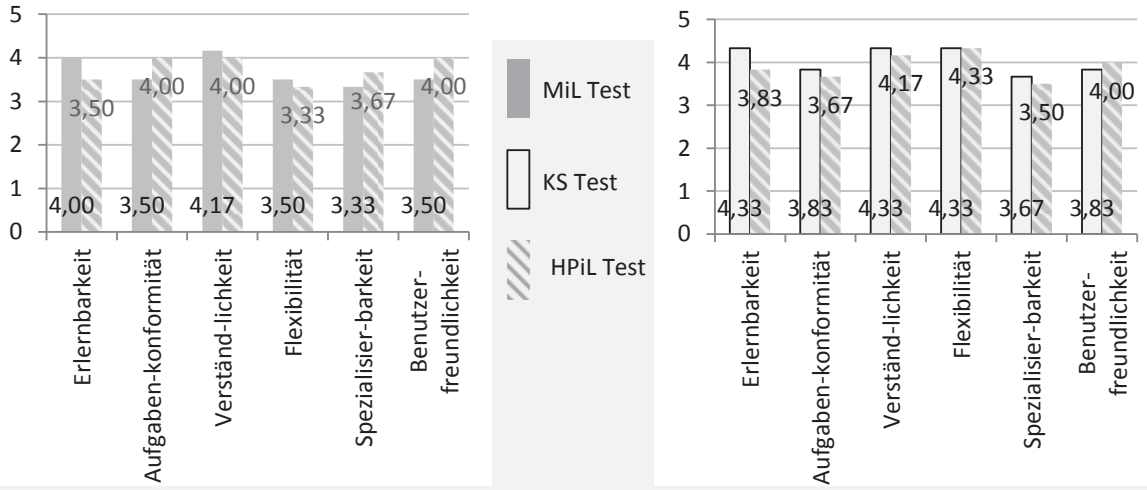
	No agreement			**Full agreement**	
	1	2	3	4	5
1. HPBench enables an easy implementation of visual **display** designs for the HMI Designer	☐	☐	☐	☐	☐
2. HPBench enables an easy implementation of acoustic **display** designs for the HMI Designer	☐	☐	☐	☐	☐
3. HPBench enables an easy implementation of haptic **display** designs for the HMI Designer	☐	☐	☐	☐	☐
4. HPBench enables an easy implementation of haptic **control element** designs for the HMI Designer	☐	☐	☐	☐	☐
5. HPBench enables an easy build-up of hybrid prototypes for the HMI Designer	☐	☐	☐	☐	☐
6. HPBench enables fast and easy modifications at HMI software (Processing, Arduino) during test	☐	☐	☐	☐	☐
7. HPBench enables easy modifications at HMI hardware during test	☐	☐	☐	☐	☐

Abschließende Analyse aus dem HPiL Prüfbericht der 3 Projektteams

Projektteam 1 (Controllability Signoff, VEI Team 1: Grohmann, J. et al. 2017)
The results in the drive simulator are influenced by the driving style of the test driver. The system fails when the test driver violates the Traffic Code.

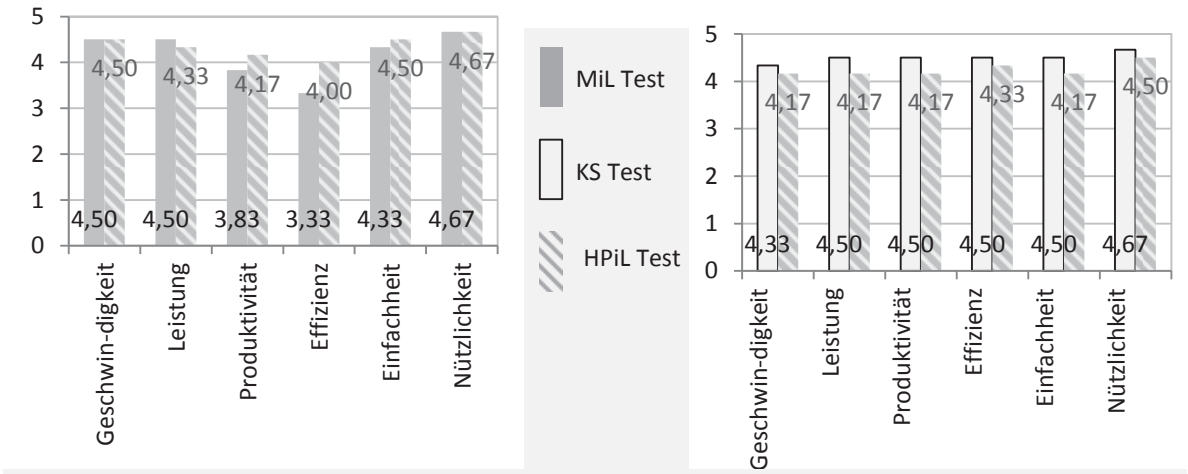
Projektteam 2 (VEI Team 2: Croker, Z. et al. 2017, S. 15)
Combining the logical model and HMI allowed us to verify the system's functions as a whole. The main feedback from this test was that the thresholds in the logical model were not correct. Test 3 allowed us to see the faults in our system for every given scenario. Although the system did activate, it had issues: Scenario 1 – The system was too eager. It would brake too early, even when the car just passed next to the bike. Scenario 2 – The system activated too late. We would only start getting warnings when we were well in to the turn. Scenario 3 – Similar to scenario 2, it was very late to activate. Scenario 4 – Similar to scenario 1, it was too eager and braked even if we just stayed in our lane. The ergonomic requirements from 1b were checked again and the same criticisms were made.

Projektteam 3 (VEI Team 3: Engel, C. et al. 2017, S. 40)
For our purpose, we get good results if we use the "model- in-the-loop" (MiL)- Method for some requirements, which integrates our logical model into the virtual car, while the simulation is processed in virtual environment with a virtual driver. So the main difference between DiL and the MiL is the Driver who is real in DiL and will communicate and drive the car using the Human – Machine Interfaces (HMI) of the drive simulator. So in the DiL the system model and the HMI can be tested in the same test. When using the MiL-Method, the HMI has to be tested separately, in an extra HMI-Test (HMIT). This will make sure all parts are working as the requirements demand



0,270	0,270	0,687	0,599	0,549	0,395	Signifikanz-niveau α	0,484	0,721	0,721	1,000	0,687	0,765

Abbildung Anhang 3: Beurteilung der wahrgenommenen Nutzbarkeit im Vergleich zwischen MiL und HPiL Test (1) sowie KS und HPiL Test (1) durch die Prüfer



1,000	0,599	0,605	0,341	0,599	1,000	Signifikanz-niveau α	0,664	0,401	0,401	0,687	0,401	0,599

Abbildung Anhang 4: Beurteilung der wahrgenommenen Nützlichkeit im Vergleich zwischen MiL und HPiL Test (1) sowie KS und HPiL Test (1) durch die Prüfer

Tabelle Anhang 4: Beurteilung der Beanspruchungshöhe im Vergleich zwischen MiL und HPiL Test (1) sowie KS und HPiL Test (1) durch die Prüfer

	MiL		HPiL			KS		HPiL		
	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor
1. Geistige Anforderungen	75,83	10,96	53,33	17,22	0,06	60,83	29,67	67,92	18,06	0,67
2. Körperliche Anforderungen	17,92	15,17	14,17	5,83	0,62	30,83	24,35	32,08	20,28	0,94
3. Zeitliche Anforderungen	77,50	8,54	47,50	7,50	**0,00**	38,75	27,45	37,92	19,58	0,96
4. Ausführung der Aufgaben	83,33	9,86	84,17	9,17	0,90	83,75	8,63	70,42	18,61	0,26
5. Aufwand	75,00	21,21	66,25	12,50	0,49	50,83	27,90	54,17	22,22	0,85
6. Frustration	64,58	21,81	18,33	12,78	**0,00**	14,17	7,86	28,75	12,08	0,09

Fett markierte Werte: t-Faktor zeigt Signifikanz für α=0,05

Anhang F. Zweite Evaluationsstudie

Fragebogen: Bewertung der Beherrschbarkeit

	Stimme gar nicht zu				**Stimme komplett zu**	**nicht beurteilen**
	1	2	3	4	5	
1) Die Warnungen des Fahrerassistenzsystems sind verständlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2) Die Warnungen des Fahrerassistenzsystems sind eindeutig	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3) Die Warnungen sind mit anderen Warnungen/Informationen im Cockpit vereinbar	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4) Der Fahrer ist ausreichend über Status und Funktion des System informiert	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5) Die Position der Anzeigen passen in den Kontext bestehender Anzeigen	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6) Die Position der Bedienelemente passen in den Kontext bestehender Bedienelemente	☐	☐	☐	☐	☐	☐
7) Es ist dem Fahrer möglich, das System jederzeit ein- und auszuschalten	☐	☐	☐	☐	☐	☐
8) Das Bedienelement zum Ein-/Ausschalten ist für den Fahrer nutzbar	☐	☐	☐	☐	☐	☐
9) Es ist dem Fahrer möglich, die verschiedenen Betriebsmodi des Systems zu unterscheiden	☐	☐	☐	☐	☐	☐
10) Die Warnungen sind in typischen relevanten Verkehrssituationen wahrnehmbar.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
11) Die Warnungen sind der Kritikalität der Verkehrssituation angemessen	☐	☐	☐	☐	☐	☐
12) Es ist möglich, das System jederzeit zu übersteuern* **z. B. durch Gas geben, wenn das BCAS automatisch bremst*	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Fragebogen: Bewertung der Beherrschbarkeit im Vergleich

In welchem Testsetup konnten sie das BCAS am besten (1), zweitbesten (2), drittbesten (3) beurteilen?

	Statisch mit VR (Unity3D)	Simulator mit Bildschirm (dSpace)	Simulator VR (Unity3D)	Kann ich nicht beurteilen
1) Die Warnungen des Fahrerassistenzsystems sind verständlich				
2) Die Warnungen des Fahrerassistenzsystems sind eindeutig				
3) Die Warnungen sind mit anderen Warnungen/Informationen im Cockpit vereinbar				
4) Der Fahrer ist ausreichend über Status und Funktion des System informiert				
5) Die Position der Anzeigen passen in den Kontext bestehender Anzeigen				
6) Die Position der Bedienelemente passen in den Kontext bestehender Bedienelemente				
7) Es ist dem Fahrer möglich, das System jederzeit ein- und auszuschalten				
8) Das Bedienelement zum Ein-/Ausschalten ist für den Fahrer nutzbar				
9) Es ist dem Fahrer möglich, die verschiedenen Betriebsmodi des Systems zu unterscheiden				
10) Die Warnungen sind in typischen relevanten Verkehrssituationen wahrnehmbar.				
11) Die Warnungen sind der Kritikalität der Verkehrssituation angemessen				
12) Es ist möglich, das System jederzeit zu übersteuern (z. *B. durch Gas geben, wenn das BCAS automatisch bremst)*				

Tabelle Anhang 5: Durchschnittliche Bewertung der Beanspruchungshöhe – Wertetabelle

	KS		HPiL (dSpace)			KS		HPiL (Unity)		
	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor
1. Geistige Anforderungen	22,50	*19,04*	33,54	*24,00*	0,205	22,50	*19,04*	41,04	*24,87*	**0,007**
2. Körperliche Anforderungen	14,38	*9,72*	17,50	*12,25*	0,935	14,38	*9,72*	25,83	*21,10*	**0,022**
3. Zeitliche Anforderungen	19,17	*16,81*	34,38	*23,11*	0,059	19,17	*16,81*	37,71	*27,61*	**0,008**
4. Ausführung der Aufgaben	34,38	*27,09*	42,08	*23,18*	0,405	34,38	*27,09*	51,67	*27,03*	**0,035**
5. Aufwand	20,63	*13,33*	31,46	*23,74*	0,185	20,63	*13,33*	35,63	*23,55*	**0,011**
6. Frustration	23,96	*16,95*	37,29	*23,32*	0,093	23,96	*16,95*	39,58	*26,85*	**0,023**

Fett markierte Werte: t-Faktor zeigt Signifikanz für α=0,05

Tabelle Anhang 6: Durchschnittliche Bewertung der Anforderungen durch die Probanden in der 2. Evaluationsstudie – Wertetabelle

	KS		HPiL (dSpace)			KS		HPiL (Unity)		
	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor
8a	4,29	0,68	4,13	0,88	0,59	4,29	0,68	3,88	1,05	0,20
8b	4,00	0,96	3,75	0,97	0,46	4,00	0,96	3,42	1,22	0,12
9	3,90	0,92	3,70	0,95	0,57	3,90	0,92	3,91	0,97	0,97
10	4,33	0,80	4,08	0,95	0,45	4,33	0,80	3,91	1,06	0,22
11a	4,09	0,97	3,71	1,37	0,36	4,09	0,97	4,04	0,79	0,90
11b	4,13	0,80	4,08	0,95	0,90	4,13	0,80	3,88	1,01	0,45
18	4,79	0,41	4,50	0,89	0,33	4,79	0,41	4,46	0,91	0,27
4	4,67	0,47	4,48	0,83	0,51	4,67	0,47	4,38	0,70	0,29
5	4,21	0,87	4,42	0,70	0,50	4,21	0,87	4,21	0,71	1,00
12	4,14	1,01	4,17	0,80	0,91	4,14	1,01	3,96	0,84	0,62
6	3,64	0,88	3,38	0,86	0,42	3,64	0,88	3,50	1,04	0,70
17	3,25	1,23	2,67	1,11	0,28	3,25	1,23	3,13	1,11	0,83

Fett markierte Werte: t-Faktor zeigt Signifikanz für α=0,05

Tabelle Anhang 7: Vergleich der drei Testmethoden zur Bewertung Beherrschbarkeit-Kriterien - Wertetabelle

	KS		HPiL (dSpace)			KS		HPiL (Unity)		
	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor
8a	1,60	0,77	2,08	0,75	0,09	1,60	0,77	2,04	0,88	0,14
8b	1,75	0,81	1,83	0,76	0,78	1,75	0,81	2,12	0,83	0,21
9	2,04	0,90	2,04	0,75	1,00	2,04	0,90	1,64	0,67	0,20
10	1,65	0,72	2,04	0,87	0,20	1,65	0,72	2,00	0,79	0,25
11a	1,74	0,76	2,13	0,82	0,20	1,74	0,76	1,91	0,81	0,57
11b	1,83	0,83	1,88	0,69	0,89	1,83	0,83	1,67	0,84	0,59
18	2,05	2,42	1,73	0,74	0,58	2,05	2,42	1,68	0,67	0,52
4	1,50	0,80	1,73	0,74	0,47	1,50	0,80	1,73	0,67	0,46
5	1,70	0,84	1,65	0,73	0,89	1,70	0,84	1,74	0,73	0,89
12	2,27	0,84	1,65	0,65	**0,03**	2,27	0,84	1,77	0,70	0,08
6	2,32	0,85	1,68	0,67	**0,05**	2,32	0,85	1,86	0,64	0,15
17	2,00	0,89	1,69	0,62	0,43	2,00	0,89	1,88	0,72	0,75

Fett markierte Werte: t-Faktor zeigt Signifikanz für α=0,05

Tabelle Anhang 8: Durchschnittliche Bewertung des Produkterlebnisses – Wertetabelle

	KS		HPiL (dSpace)			KS		HPiL (Unity)		
	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor	Mittel-Wert	SD	Mittel-Wert	SD	t-Faktor
Nützlichkeit	5,33	0,80	5,00	0,75	**0,044**	5,33	0,80	5,17	1,33	**0,004**
Benutzbarkeit	5,83	0,77	5,67	1,07	**0,024**	5,83	0,77	6,00	1,24	**0,047**
visuelle Ästhetik	4,50	1,02	4,33	1,05	0,264	4,50	1,02	4,50	1,15	0,105
Status	2,83	1,47	2,33	1,34	0,513	2,83	1,47	2,67	1,46	0,821
Bindung	1,33	0,82	1,50	0,67	0,266	1,33	0,82	1,17	0,79	0,232
positive Emotionen	3,08	1,14	3,17	1,06	0,181	3,08	1,14	2,92	0,90	**0,006**
negative Emotionen	2,70	0,99	2,80	1,15	**0,006**	2,70	0,99	3,30	1,19	**0,002**
Nutzungsintention	3,50	0,94	3,83	1,07	0,561	3,50	0,94	3,33	1,29	0,181
Produktloyalität	3,33	0,97	3,50	1,21	0,669	3,33	0,97	3,17	1,23	0,153
Gesamturteil	3,59	0,62	3,48	0,53	0,265	3,59	0,62	3,55	0,63	0,290

Fett markierte Werte: t-Faktor zeigt Signifikanz für α=0,05

Freie Kommentare der Probanden zu BCAS und Testumgebung

Was empfanden Sie am BCAS gut?

Anz	Gesamt & Konzept	Anz	Anzeigen
8	Gesamtsystem/Konzept	4	Visuelle Anzeigen: Gestaltung, Position
8	System zum Schutz Fahrradfahrer, speziell bei unübersichtlichen Situationen	2	Visuelle Anzeigen: Intuitive Farben

Was empfanden Sie am BCAS gut?

Anz	Gesamt & Konzept	Anz	Anzeigen
2	Übersichtlichkeit	3	akustische Anzeigen: Gestaltung
1	Eingriff durch Bremsen	3	haptische Anzeigen: Gestaltung
1	Modus 2: Unaufdringlich, aber wirksam		

Was empfanden Sie am BCAS Verbesserungswürdig

Anz		Anz	Anzeigen
2	Übersichtlichkeit	5	Visuelle Anzeigen: Gestaltung, Position
1	Bremsvorgang zu ungenau	1	Visuelle Anzeigen: Nicht erforderlich - Haptik & Audio reichen

2	Übersichtlichkeit	6	Visuelle Anzeigen: Links blinken – Links wird angezeigt, auch wenn das Fahrrad von rechts kommt
1	Zeitliche Unterschiede der Warnungen	2	Visuelle Anzeigen: Gelb und Orange der Stufen 1 und 2 schlecht unterscheidbar
1	Viele Warnungen ohne Grund/Fehlauslösungen	7	Akustische Anzeigen: Auswahl der Töne/weniger nervige Töne
		3	akustische Anzeigen: Bessere Abgrenzung der Warnlevel! Gerade 1 und 2 zu ähnlich
		1	Akustische Anzeigen: Fehlende Akustische Warnung auf Stufe 1
		1	Fehlende haptische Warnung auf Stufe 1

Was empfanden Sie an der Testumgebung gut?

Anz	Fahrsimulator	Anz	Szenario
7	Bewegungssystem/Haptisches Feedback	7	Fahrumgebung/Stadtszenario wirkte realistisch und verständlich
4	Realitätsnähe des Fahrsimulator-Cockpits	2	3D Darstellung Unity-Szene
3	Übersichtlichkeit/Verständlichkeit		
1	Sitz des Fahrsimulators		

Was empfanden Sie an der Testumgebung Verbesserungswürdig?

Anz	Fahrsimulator	Anz	Szenario
9	Framerate: Ruckelt sehr stark bei Unity	2	Detailgrad der Szene verbessern
1	Auflösung	2	2 Modellierung der Fahrradfahrer
1	Grafik zu schlecht: Daher Verkehrssituationen nicht immersiv	1	Bessere Abgrenzung und Verdeutlichung der Situation mit oder ohne BCAS
1	Lenkrad verdeckte teilweise Anzeigen	1	Einfachere Szenarien
1	VR Bild wurden teilweise durch Hardware verdeckt	2	Realistischere Verkehrssituationen (Abbiegesituationen, mehr Fahrräder, mehr Verkehr)
1	Sound/Fahrgeräusche	1	Szenen teilweise unterschiedlich: Mal gebremst, mal nicht
1	Sitz zu „Rennauto-Mäßig“		

1	Schwerer Ein-/Ausstieg		
3	Bewegungssystem des Fahrsimulators (Unrealistisch/Übertrieben)		
3	Lenkung des Fahrsimulators		
1	Fahrdynamik des Fahrsimulators		
1	Fahrzeug schaltet zu spät		

Freie Kommentare

- 2 Nennungen: Zu viele Signale sind im Alltag zu störend: Bremsen sollte der Fahrer und nicht ein FAS
- 1 Nennung: Während der Simulationsfahrt die Lichter nicht wahrgenommen

Anhang G. Beherrschbarkeits-Test zukünftiger Fahrerassistenzsysteme und Übertragbarkeit der HPiL Methodik

Fragebogen: Vergleich der BCAS Varianten A und B

Frage	Auswahl A/B
Durch welche BCAS-Variante bist du weniger gestresst?	
Mit welcher Variante des BCAS kannst du deine Aufgabe besser erfüllen?	
Welche der beiden BCAS-Variante reagiert hinsichtlich der Kritikalität der Verkehrssituation angemessener?	
Welche der beiden BCAS-Varianten würdest du eher kaufen?	

Fragebogen: Bewertung der Beherrschbarkeit des BCAS im Vergleich zum gekoppelten System (BCAS und LKAS)

	Stimme gar nicht zu				Stimme komplett zu	nicht beurteilbar
	1	2	3	4	5	
1) Das ist für mich selbsterklärend	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2) Ich verstehe die Reaktionen des ***	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3) Ich verstehe die Grenzen des ***	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4) Ich weiß jederzeit, ob das *** ein- oder ausgeschaltet ist	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5) Ich fühle mich durch das *** gestresst	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6) Die Reaktion des *** ist der Kritikalität der jeweiligen Verkehrssituation angemessen	☐	☐	☐	☐	☐	☐

***BCAS oder BCAS + LKAS

Anhang H. Relevante Vorveröffentlichungen

Veröffentlichung: Buchholz, C.; Kind, S.; Blume, C.; Enin, A.; Stark, R. (2018a): Hybrid Prototype-in-the-Loop. In: ZWF 113 (4), S. 240–245.

Beitrag der Veröffentlichung zur Dissertation:

- (Kapitel 8.2: Ausblick) Aufzeigen der Übertragbarkeit des HPiL Testverfahrens sowie der HPiL Methodik auf den Anwendungsfall der Kollaboration zwischen Mensch und Roboter

Substanzieller Beitrag C. Buchholz:

- Planung, Durchführung und Auswertung des beschriebenen Versuchs
- Autor der Kapitel „Hybrid Prototype-in-the-Loop (HPiL) – Ansatz“, „Proof of Concept“ und „Auswertung“ zur Beschreibung der Planung, Durchführung und Auswertung des Versuchs

Veröffentlichung: Buchholz, C.; Stark, R. (2017): Vergleich hybrider und virtueller Model-in-the Loop Methoden für die frühe menschzentrierte Verifikation und Validierung fortschrittlicher Fahrerassistenzsysteme. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Proceedings 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. 11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit. Berlin, 28., 29.11. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Nichtredigierter Manuskriptdruck. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2312), S. 69–80.

Beitrag der Veröffentlichung zur Dissertation:

- (Kapitel 7.3) Auswertung der Probandenversuche hinsichtlich des Messkriteriums „Beanspruchungshöhe“ – in der Dissertation übernommen und als externe Quelle gekennzeichnet

Substanzieller Beitrag C. Buchholz:

- Planung, Durchführung und Auswertung der beschriebenen ersten Evaluationsstudie
- Autor aller Kapitel der Veröffentlichung

Veröffentlichung: Hartfiel, B.; Buchholz, C.; Fresemann, C.; Tomaszek-Staude, W.; Stark, R. (2018): Use Case orientierte Gestaltungsempfehlungen für Fahrsimulatoren zur menschzentrierten Absicherung von Sicherheits- und Komfortfunktionen. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Proceedings: 19. VDI-Kongress "SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung". 19. VDI-Kongress "SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung". Baden-Baden, 20.-21.11.: VDI Verlag GmbH (VDI Berichte 2333), 655-669.

Beitrag der Veröffentlichung zur Dissertation:

- (Kapitel 3.1 und Kapitel 4) Beschreibung verschiedener Trends und Herausforderungen in der Entwicklung von FAS basierend auf Experteninterviews (in der Dissertation übernommen und als externe Quelle gekennzeichnet)
- (Kapitel 3.3) Ansatz Klassifizierung von Fahrsimulatoren, Beitrag zur Klassifizierung von Fahrer-Verhaltensmodellen (in der Dissertation übernommen und als externe Quelle gekennzeichnet)
- (Kapitel 3.4) Beschreibung verschiedener Aspekte im Vorgehen des Standes der Technik basierend auf Experteninterviews (in der Dissertation übernommen und als externe Quelle gekennzeichnet)

- (Kapitel 5) Ergebnisse der Experteninterviews als Anforderungen an die zielorientierte Ausgestaltung der Testumgebung Fahrsimulator. Fahrsimulator-Konfiguration für den Test von Fahrerassistenzsystemen im Funktionsverbund als Grundlage für die Fahrsimulator-Konfiguration der Dissertation (in der Dissertation übernommen und als externe Quelle gekennzeichnet)

Substanzieller Beitrag C. Buchholz:

- Planung, Durchführung und Auswertung der Experteninterviews in Zusammenarbeit mit B. Hartfiel
- Gemeinsame Entwicklung des Gestaltungsparameter-Konfiguration eines Fahrsimulators für den Test von FAS mit B. Hartfiel
- Gemeinsame Autorenschaft aller Kapitel der Veröffentlichung mit B. Hartfiel. Aufteilung in den Anwendungsfällen: C.Buchholz als Autor aller Beiträge zum Anwendungsfall „Test und Absicherung von FAS im Funktionsverbund“, B. Hartfiel als Autor aller Beiträge zum Anwendungsfall „dynamische Sichtbarkeit“.

Veröffentlichung: Buchholz, C.; Vorsatz, T.; Kind, S.; Stark, R. (2017): SHPbench – A Smart Hybrid Prototyping Based Environment for Early Testing, Verification and (user based) Validation of Advanced Driver Assistant Systems of Cars. In Procedia CIRP 60, pp. 139–144.

Beitrag der Veröffentlichung zur Dissertation:

- (Kapitel 5) Erste Zusammenführung des Smart Hybrid Prototyping mit der Fahrsimulation in einem Proof of concept, (Teil-) Publikation des Testsetups für die Bereitstellung der vordefinierten, digitalen Anzeige-Inhalte
- (Kapitel 6) Erste Konzeption des Werkzeuges HPBench (hier noch als SHP-Bench bezeichnet)

Substanzieller Beitrag C. Buchholz:

- Alleinige Konzeption des SHPBench Werkzeuges und des Ansatzes der Zusammenführung des Smart Hybrid Prototyping mit der Fahrsimulation
- Planung, Durchführung und Auswertung des Proof of Concept
- Haupt-Autor aller Kapitel der Veröffentlichung

Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin

Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen
Hartwig Weber. 201 Seiten, 46 Abb., 7 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4496-6

Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten industrieller Qualitätstechniken im Dienstleistungsbereich
Alexander Gogoll. 173 Seiten, 71 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4498-2

Perforierschneiden mit Nd:YAG-Festkörper hoher Impulsenergien
Jürgen Betz. 167 Seiten, 97 Abb., 5 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4499-0

Analyse der Werkstückhaltekräfte am Dreibackenfutter im Rahmen einer Maschinen- und Prozeßüberwachung
Rolf Thiel. 130 Seiten, 69 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4495-8

Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Florian Golm. 173 Seiten, 83 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4497-4

Fehlersensitive Produktgestaltung in integrierten Systemarchitekturen
Michael Stephan. 164 Seiten, 58 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4512-1

Wirtschaftliche Einführung der rechnerintegrierten Produktion in kleinen Unternehmen mit komplexer Produktionsstruktur
Wolfgang Bilger. 174 Seiten, 42 Abb., 1 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4511-3

Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen
Claudia Hentschel. 160 Seiten, 54 Abb., 16 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4513-X

Entwicklung eines Modells für eine rechnerunterstützte Qualitätswissensbasis
Jörg-Peter Brauer. 150 Seiten, 40 Abb., 2 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4520-2

Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe
Thomas Brücher. 330 Seiten, 124 Abb., 17 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4523-7

Einführen und Umsetzen von Total Quality Management
Christian Malorny. 310 Seiten, 68 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4524-5

Qualitätsmanagement für die Einführung bestandsarmer Produktionskonzepte
Torsten Walter. 143 Seiten, 37 Abb., 13 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4525-3

Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign
Jörg Lüddemann. 166 Seiten, 76 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4519-9

Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen
Mehdi Al-Radhi, 165 Seiten, 45 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4528-8

Produktionsstrukturierung auf der Basis strategischer Eigenfertigungskomponenten
Olaf Sauer, 144 Seiten, 62 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4532-6

Auswahl und Konditionierung von Werkzeugen für das Außenrund-Profilschleifen technischer Keramiken
Ingo Liebe, 170 Seiten, 79 Abb., 16 Tab. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4509-1

Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur
Thomas Gottschalk, 140 Seiten, 70 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4531-8

Featureintegrierte Fertigungsplanung
Armin Ulbrich, 209 Seiten, 93 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4529-6

Aufgabenbezogene Anordnung und Programmierung von Laserscannern für die 2D-Geometrieinspektion
Heinrich Schuler, 148 Seiten, 81 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4530-X

Arbeitsgestaltung zur Fehlervermeidung bei der SMD-Elektronikmontage
Stephan Krüger, 173 Seiten, 51 Abb., 22 Tab. 1996. Kartoniert.
ISBN 3-8167-4540-7

Modell der zyklischen Prozeßrestrukturierung als Teil des Total Quality Managements
Timo Füermann, 176 Seiten, 79 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4545-8

Analyse der Rentabilität von Qualitätstechniken
Philipp Theden, 158 Seiten, 50 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4544-X

Thermisch beschichtete CFK-Wellen im Maschinenbau
Andreas Kranz, 148 Seiten, 76 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4547-4

Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikationstechnik
Thomas Kiesewetter, 169 Seiten, 60 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4548-2

Verbesserung der Planung von Produktionsprozessen im Werkzeugbau durch Qualitätsplanung mittels Quality Function Deployment (QFD)
Manfred Zoschke, 140 Seiten, 14 Abb., 7 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4546-6

Flexibel anpaßbare Softwaresysteme zur rechnerunterstützten Fertigungssteuerung
Harald Krause, 148 Seiten, 89 Abb., 27 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4551-2

Anpassung des Qualitätswesens bei Total Quality Management
Frank Krämer, 262 Seiten, 75 Abb., 40 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4558-X

Integration von Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen und ihre betriebliche Umsetzung
Detlev Butterbrodt, 240 Seiten, 60 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4559-8

Die Entwicklung des deutschen Werkzeugmaschinenbaus in der Zeit von 1930 bis 1960
René Haak, 225 Seiten, 30 Abb., 9 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4556-3

Fertigungsintegrierte Instandhaltung
Ralf Jagodejkin, 195 Seiten, 55 Abb., 21 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4557-1

Analyse der Prozeßkette Pulverspritzgießen
Peter Merz, 165 Seiten, 78 Abbildungen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4629-2

Bearbeitung von metallischen Gasturbinenwerkstoffen durch Tiefschleifen und Drahterodieren
Achim Meier, 220 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4627-6

Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen
Holger Eichhorn, 200 Seiten, 86 Abb., 13 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4630-6

Läppen von einkristallinem Silicium
Hendrik Engel, 200 Seiten, 85 Abbildungen, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4631-4

Verschleißverhalten von polykristallinem Diamant bei instationärer Beanspruchung
Uwe Lachmund, 210 Seiten, 100 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4632-2

Feature-basierte Meßplanung für Koordinatenmeßmaschinen
Michael Ciesla, 162 Seiten, 79 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4613-6

Informationssystem für heterogen verteilte Qualitätsinformationen
Volker Kleinhans, 150 Seiten, 67 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4612-8

Untersuchung und Interpretation der beim Schleifen der Nickelbasislegierung IN 738 LC induzierten Gefügeänderungen in der Randzone
Pengxi Li, 147 Seiten, 135 Abb., 19 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4634-9

Thermische Stabilisierung von Werkzeugmaschinen-Spindelkästen durch Carbonfaserverbundkunststoffe
Matthias Liebetrau, 200 Seiten, 122 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4638-1

Kooperationsentwicklung mit Zulieferern in der Automobilindustrie Indonesien
Ida-Bagus Kesawa Narayana, 214 Seiten, 95 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4642-X

Flexible On-line-Prozeßoptimierung mit integrierten adaptiven Modellen
Martin Bauer, 160 Seiten, 55 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4622-5

Einsatz eines Mobilrobotersystems in der Endmontage des Schiffsstahlkörperbaus
Henning Müller, 170 Seiten, 62 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4552-0

Prozeßmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Entwicklung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge
Martin Wagner, 170 Seiten, 100 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5130-X

Honen keramischer Werkstoffe
Uwe-Peter Weigmann, 250 Seiten, 103 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4639-X

Modellierung und Vermessung linearer Gelenkbewegungen bei Industrierobotern
Michael Grethlein, 154 Seiten, 56 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4644-6

Globalisierungspotentiale im Maschinenbau
Jens Nackmayr, 174 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5132-6

Entwicklung und praktische Erprobung eines Kennzahlensystems für das Total Quality Management
Olaf Wolter, 190 Seiten, 52 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5136-9

Prozeßorientierte Techniken zur systematischen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes
Ulrich Tammler, 185 Seiten, 72 Abb., 25 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5134-2

Eine Methode zur automatischen Strukturinterpretation in digitalisierten technischen Zeichnungen
Nailja Luth, 150 Seiten, 76 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4646-2

Ganzheitliches Modell zur Umsetzung von Total Quality Management
Philipp Radtke, 180 Seiten, 50 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5148-2

Ein methodischer Ansatz zum Strukturvergleich technischer Objekte
Matthias Müller, 245 Seiten, 54 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5160-1

Prozeßparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen
Andreas Pöllmann, 154 Seiten, 80 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5150-4

Biologisch basierte Verfahren zur Objekterkennung und Texturanalyse
Javier Ruiz-del-Solar, 145 Seiten, 98 Abb., 8 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4647-0

Methodisches Konstruieren als Mittel zur systematischen Gestaltung von Dienstleistungen
Wolfgang Schwarz, 130 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5140-7

Techniken zur Entwicklung von Führungsqualität im Total Quality Management
Claudia Kostka, 200 Seiten, 30 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5165-2

Metamodellierung als Instrument der Verknüpfung von Unternehmensmodellen
Wolfgang Müller, 170 Seiten, 61 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5164-4

Entwicklung und Realisierung einer Methode für die flexible Auswertung von Profillinien
Lorenz Voit, 145 Seiten, 75 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5174-1

Gewichts- und Lärmminderung von Laufrädern für Schienenfahrzeuge durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen
Frank Warmuth, 130 Seiten, 110 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5173-3

Prozeß-Benchmarking – Methode zum branchenunabhängigen Vergleich von Prozessen
Gunnar Siebert, 130 Seiten, 45 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5182-2

Modellierungsvorgehen zur Planung von Geschäftsprozessen
Martin Schwermer, 160 Seiten, 54 Abb., 6 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5163-6

Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel
Ronald Fritsche, 135 Seiten, 71 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5169-5

Analyse des Drehens duktiler Werkstoffe mit der Finite-Elemente-Methode
Steffen Gerloff, 272 Seiten, 116 Abb., 7 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5161-X

Prozeßorientierte Auswahl von PPS-Systemen
Georg Neubauer, 146 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5184-9

Featurebasiertes Gestalten von Produkten mit Freiformgeometrien
Christiane Stiel, 153 Seiten, 50 Abb., 1 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5170-9

Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung
Jörg Niemeier, 120 Seiten, 75 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5177-6

Beschleunigte Evolutionsstrategie zur Optimierung von Fertigungsprozessen
Jürgen H. Bremer, 125 Seiten, 38 Abb., 23 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5183-0

Konfigurierbares, multimediales Fernbetreuungssystem für rechnergesteuerte Fertigungseinrichtungen
Zaharya Menevidis, 155 Seiten, 51 Abb., 9 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5171-7

Funkenerosive Bearbeitung von polykristallinem Diamant
Steffen Appel, 150 Seiten, 62 Abb., 10 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5162-8

Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen
Stefan Liebelt, 180 Seiten, 70 Abb., 12 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5190-3

Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung
Udo Bahrke, 168 Seiten, 120 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5193-8

Controlling des Fabrikbetriebes auf der Basis des Total Quality Managements (TQM)
Dirk Wilmes, 195 Seiten, 51 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5194-6

Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen
Sven-Norman Gembrys, 120 Seiten, 48 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5199-7

Konzept eines Modells zur Produktentwicklung
Hanno Weber, 160 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5205-5

Entwicklung einer handlungsorientierten Interaktionsmethode zur Benutzung produktionstechnischer Datenbanken
Regine Gernert, 168 Seiten, 40 Abb., 15 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5213-6

Modell zur Gestaltung und Auswahl von CAQ-Lösungen
Thomas Konert, 172 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5207-1

Globales Produktdatenmanagement zur Verbesserung der Produktentwicklung
Matthias Doblies, 139 Seiten, 49 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5224-1

Designintegrierte Produktplanung und Produktkonzeption
Timm Kehler, 158 Seiten, 78 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5237-3

Verkürzung der Produktentwicklungszeit durch Parallelverarbeitung
Haygazun Hayka, 175 Seiten, 46 Abb., 13 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5228-4

Analyse der Schnitt- und Kerbgeometrie sowie des Strahls beim Abrasivwasserstrahlschneiden
Bernhard Axmann, 199 Seiten, 100 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5236-5

Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung beim Fräsen
Edgar Fries, 200 Seiten, 106 Abb., 14 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5244-6

Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von Produktionseinrichtungen
Ulf Perlewitz, 162 Seiten, 75 Abb., 6 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5260-8

Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken
Jörg Krüger, 170 Seiten, 101 Abb., 21 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5268-3

Beitrag zur Entwicklung eines modularen TQM-Modells für das Krankenhauswesen
Bettina Hahne, 180 Seiten, 50 Abb., 5 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5290-X

Steuerungsintegriertes Prozeßüberwachungssystem für Drehmaschinen
Ireneus Suwalski, 167 Seiten, 106 Abb., 13 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5286-1

Montagesystemplanung und -steuerung für die variantenreiche Serienmontage
Kuo-Wen Chang, 148 Seiten, 59 Abb. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5294-2

Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung
Uwe Mette, 227 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5271-3

Bildanalysesystem zur robusten Erkennung von Kennzeichen an Fahrzeugen
Lutz Lohmann, 184 Seiten, 81 Abb., 18 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5534-8

Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken
Holger Perlewitz, 180 Seiten, 72 Abb., 53 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5538-0

Simulation von Produktentwicklungsprozessen
Hans-Christoph Raupach, 150 Seiten, 60 Abb., 4 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5544-5

Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen
Ute Forstmann, 110 Seiten, 59 Abb., 2 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5547-X

Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis Neuronaler Netze
Alexander Carl, 135 Seiten, 53 Abb., 2 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5568-2

Konzeption eines webbasierten Beratungs-Unterstützungs-Systems am Fallbeispiel einer PDM-Systemauswahl
Toralf Kahlert, 140 Seiten, 50 Abb., 4 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5569-0

Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen
Petrik Ziebeil, 155 Seiten, 44 Abb., 6 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5577-1

Rapid Styling Validation - Berechnung und Simulation in der Konzeptphase der Produktentwicklung
Yasmina Bock, 150 Seiten, 57 Abb., 5 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5592-5

Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik
Thomas Ardelt, 200 Seiten, 102 Abb., 19 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5609-3

Beitrag zum Greifen von Textilien
Jörg Stephan, 140 Seiten, 100 Abb, 20 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5622-0

Integrierte Unternehmensplanung auf der Basis von Unternehmensmodellen
Roland Jochem, 170 Seiten, 77 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5623-9

Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen
Katrin Müller, 177 Seiten, 45 Abb., 46 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5884-3

Business-Exzellenz als qualitätsorientierter Entwicklungsansatz für Gründungsaktivitäten
Gunter Busch. 199 Seiten, 46 Abb., 4 Tab., 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6045-7

Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service
Andreas Edler. 131 Seiten, 64 Abb., 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5902-5

Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung
Karsten Gessner. 154 Seiten, 39 Abb., 6 Tab., 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5636-0

System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen
Michael Ising, 200 Seiten, 101 Abb., 5 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5890-8

Verteilte Simulation des Materialversorgungsprozesses in Produktionsverbünden
Dirk Krützfeld, 141 Seiten, 78 Abb., 13 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6035-X

Integration eines visuellen Lageregelungssystems für sechs Freiheitsgrade in Industrieroboter
Yong-Uk Kwon, 161 Seiten, 63 Abb., 9 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6044-9

Magnetische Flüssigkeiten als Schmierstoff in hydrodynamischen Gleitlagern
Reiner Patzwald, 176 Seiten, 148 Abb., 27 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5892-4

Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage
Alexander Stenzel, 129 Seiten, 66 Abb., 6 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5885-1

Strategische Unternehmensprozessgestaltung mit der Methode des Target Processing
Florian Weymar. 170 Seiten, 59 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5898-3

Beitrag zur Innovationsentwicklung in indonesischen Unternehmen durch kompetenzorentierte Netzwerkbildung
Agung Budi Utomo Halim. 206 Seiten, 73 Abb., 53 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6065-1

Fehlerbeseitigungsmanagement unter Berücksichtigung der Plattformstrategie am Beispiel der Automobilindustrie
Daniel Schukraft. 137 Seiten, 87 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6079-1

Auslegung magnetumgeformter Verbindungen durch Simulation
Stefan Mehnert. 141 Seiten, 118 Abb., 17 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6086-4

Statistische Prozessregelung bei administrativen Prozessen im Rahmen eines ganzheitlichen Prozesscontrollings
Thomas Gerboth. 123 Seiten, 46 Abb., 12 Tab., 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6080-5

Sichere synchrone Telekooperation zur Optimierung der verteilten Produktentstehung
Ralf Schultz. 150 Seiten, 61 Abb., 4 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6088-0

Verbesserte Anpassungsfähigkeit des Änderungsmanagements durch komplementäre Selbstorganisation
Ralf Brunken. 134 Seiten, 52 Abb., 2 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6144-5

Durchlaufzeitreduzierung durch Harmonisierung von Belegungszeiten und Einführung flexibler Prozeßteams
Reiner Friedland. 170 Seiten, 47 Abb., 13 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6139-9

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch eine Life Cycle Unit
Waldemar Grudzien. 170 Seiten, 75 Abb., 33 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6174-7

Beitrag zum Variantenmanagement und zur Prozessoptimierung im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen
Holger Schmidt. 170 Seiten, 84 Abb., 10 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6178-X

Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation
Markus Rabe. 222 Seiten, 135 Abb. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6262-X

CVD-Diamant als Schneidstoff
Marcus Brücher. 187 Seiten, 87 Abb., 18 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6280-8

Berechnungsmodell zur Ermittlung von Spannkräften bei Backenfuttern
Pingfa Feng. 213 Seiten, 203 Abb., 17 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6371-5

Beitrag zur Entwicklung modularer Demontagewerkzeuge
Uwe Rebafka. 138 Seiten, 78 Abb., 28 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6381-2

Beitrag zur voxelbasierten Simulation des fünfachsigen NC-Fräsens
Zengxuan Hou. 160 Seiten, 80 Abb., 3 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6401-0

Aufbau hierarchiearmer Produktionsnetzwerke – Technologiestrategische Option und organisatorische Gestaltungsaufgabe
Carsten S. Schröder, 210 Seiten, 59 Abb., 1 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6398-7

Sprache zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Roland Heimann, 158 Seiten, 55 Abb., 6 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6456-8

Beitrag zur dynamischen Prozessplanung und Generierung von Steuerungssequenzen für flexible Demontagesysteme
Hyung-Ju Kim. 164 Seiten, 75 Abb., 19 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6559-9

Öko-Effizienz durch Nutzenverkauf am Beispiel der Automobilindustrie
Gitta Vischer. 193 Seiten, 62 Abb., 42 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6561-0

Applications of Subdivision Techniques in Product Development
Nele Gross. 136 Seiten, 51 Abb. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6576-9

Werkzeuge zum impulsmagnetischen Warmfügen von Profilen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen
Robert Hahn. 209 Seiten, 95 Abb., 18 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6642-0

Ultraschallunterstütztes Quer-Seiten-Schleifen
Nikolai-Alexander Daus. 145 Seiten, 78 Abb., 5 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6657-9

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch Anpassen von Mobiltelefonen
Bahadir Basdere. 208 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6662-5

Informationstechnische Integration hybrider Demontagesysteme
Thomas Keil. 183 Seiten, 79 Abb., 15 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6688-9

Soft Data Fusion for Computer Vision
Aureli Soria-Frisch. 242 Seiten, 118 Abb., 7 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6689-7

Trennende Schutzeinrichtungen für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung
Jörg Bold. 220 Seiten, 99 Abb., 39 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6697-8

Auslegung dünner Hartstoffschichten für Zerspanwerkzeuge
Karsten Klein. 172 Seiten, 88 Abb., 17 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6700-1

Methode zur Komplexitätsreduzierung der Auftragssteuerung in der Elektronikmontage
Dietrich Fischer. 202 Seiten, 97 Abb., 6 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6729-X

Sicherheitszentrierte Architektur für Internet-basierte Dienste im Maschinen- und Anlagenbau
Ralf Berger. 120 Seiten, 70 Abb., 16 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6777-X

Methodische Entwicklung von modularen IT-Dienstleistungen
Klaus Herbst. 219 Seiten, 63 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6778-8

Flexible Integration von Rapid Prototyping Prozessketten in die Produktentwicklung
Stefan Dreher. 139 Seiten, 54 Abb., 10 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6843-1

Risikominimierung bei der Beschaffung investiver Dienstleistungen durch den Einsatz von Methoden des Qualitätsmanagements
Marc Bockshecker. 195 Seiten, 36 Abb., 6 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6900-4

Verfahren zum Einzelpunktlöten von elektrischen Anschlusskontakten mit getrennter Erwärmung von Lötstelle und Lot
Andreas Frenzke. 140 Seiten, 69 Abb., 17 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6919-5

Adaptive Modellierung und Simulation von Produktentwicklungsprozessen
Johannes Voigtsberger. 174 Seiten, 58 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6929-2

Konditionieren von Diamantschleifscheiben
Frank Sroka. 229 Seiten, 111 Abb., 7 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6937-3

Zustandsorientierte Instandhaltung von Standardkomponenten mit Life Cycle Units
Alexander Buchholz. 200 Seiten, 99 Abb., 9 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6938-1

Beitrag zur Gestaltung horizontaler Innovationskooperationen in Klein- und Mittelbetrieben am Beispiel Schienengüterverkehr
Ulrich Kroß. 166 Seiten, 56 Abb., 11 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6962-4

Verfahren und Systeme zur Demontage komplexer technischer Gebrauchsgüter
Jens-Peter Härtwig. 242 Seiten, 108 Abb., 19 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6963-2

Neue Einsatzmöglichkeiten von Ferrofluiden in technischen Systemen mit relativ zueinander bewegten Komponenten
Nayim Bayat. 175 Seiten, 113 Abb., 19 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7014-2

Wissensbilanzen für mittelständische Organisationen
Kay Alwert. 181 Seiten, 65 Abb., 25 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7033-9

Entwicklung eines lernfähigen Bildverarbeitungssystems unter Einsatz von Verfahren des Soft Computing
Mario Köppen. 158 Seiten, 56 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7056-8

Hochleistungsfräsen von Superlegierungen
Eric Wiemann. 239 Seiten, 124 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7082-7

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Anpassungsprogrammplanung
Carsten Franke. 220 Seiten, 82 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7095-9

Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte
Markus Ciupek. 179 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7112-2

Management von Ingenieurkompetenzen im Spannungsfeld beruflicher Arbeitsteilung
Matthias Patrick Meyer. 180 Seiten, 31 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7127-0

Approach of Integrated Order Scheduling and Flexible Resource Planning for Mass Customization
Ingo Lümkemann. 193 Seiten, 38 Abb., 10 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7223-4

Entwicklung von Hartmetallwerkzeugen für die Mikrozerspanung mit definierter Schneide
Kai Schauer. 178 Seiten, 107 Abb., 15 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7245-5

Informationssystemische Prozessorganisation mit sozioorientierter Transformation
Dieter Schacher. 163 Seiten, 65 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7285-9

Eigenschaften und Einsatzverhalten CVD-diamantbeschichteter Hartmetallwerkzeuge
Rouven Kott. 166 Seiten, 84 Abb., 7 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7323-8

Grundlagen und Prozessstrategien der Mikrofunkenerosion für die Bearbeitung von Rotationsbauteilen
Sascha Piltz. 266 Seiten, 139 Abb., 27 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7345-0

Verfahrensgrundlagen und Technologie des Hubschleifens mit viskosen Schleifmedien
Hubert Szulczynski. 175 Seiten, 87 Abb., 13 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7379-5

Modellierung und Analyse verteilter Entwicklungsprozesse für mechatronische Systeme
Chris Biantoro. 174 Seiten, 102 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7406-8

Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile
Frank Szimmat. 177 Seiten, 106 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7424-2

Kompetenzabhängiges Simulationsverfahren zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
Matthias Strebel. 132 Seiten, 33 Abb., 1 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7432-7

Integriertes Benchmarking für kleine und mittlere Unternehmen
Holger Kohl. 166 Seiten, 41 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7439-6

Informationsmanagement zur Planung und Verfolgung von Produktlebenszyklen
Holger Jungk. 147 Seiten, 72 Abb., 5 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7461-7

Beitrag zum wirtschaftlichen Betrieb von Recyclingnetzwerken
Monica Vanegas. 174 Seiten, 65 Abb., 41 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7558-4

Eine Ontologie-basierte Methode zur Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung
Hauke Arndt. 193 Seiten, 59 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7641-3

Analyse der Effekte beim Trockeneisstrahlen
Mark Claudius Krieg. 144 Seiten, 60 Abb., 27 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7625-3

Optimierte Zulieferintegration in der Produktentwicklung durch Ad-hoc-Kooperationswerkzeuge
Hendrik Gärtner. 166 Seiten, 61 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7655-0

Zerspansimulationslösungen für die Werkzeugkonstruktion und Prozessauslegung beim Fräsen
Alexander Marc Mattes. 169 Seiten, 79 Abb., 20 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7847-9

Aerodynamische Trenn- und Förderprozesse zur Steigerung der Demontageflexibilität bei Automobilkomponenten
Stefano Consiglio. 154 Seiten, 71 Abb., 13 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

Planung der Wiederverwendung von Elektro(nik)altgeräten
Sebastian Kernbaum. 236 Seiten, 87 Abb., 19 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7966-7

Verfahren zur ad hoc-Modellierung und -Simulation räumlicher Feder-Masse-Systeme für den Einsatz in Virtual Reality-basierten Handhabungssimulationen
Jens Neumann. 226 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

Beeinflussung des Vorbehandlungszustandes der Substratrandzone durch Trockeneisstrahlen am Beispiel von Klebverbindungen
Adil El Mernissi. 157 Seiten, 72 Abb., 21 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7980-3

Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Modularisierung von Produkten
Marco Zettl. 236 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7986-5

Herstellung und Einsatz CVD-diamantbeschichteter Bohrgewindefräser
Jens König. 188 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0025-2

Akzeptanzförderung bei der Einführung von Wissensmanagement - Ein Methodenbaukasten für kleine und mittlere Unternehmen
Ina Kohl. 178 Seiten, 30 Abb., 13 Tab., 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0050-4

Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Flexibilität in Rohbaunebenlinien
Arne Lambertz. 240 Seiten, 164 Abb., 10 Tab, 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0117-4

Charakterisierung und Auslegung der Grenzschicht PVD-beschichteter Schneidkeramiken.
Tom Hühns. 179 Seiten, 72 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0132-7

Virtuelle Rekonstruktion von Innenräumen basierend auf Messdaten von Tiefenkameras
Alexander Sabov. 174 Seiten, 86 Abb., 10 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0144-0

Ermittlung, Berechnung und Optimierung des strukturmechanischen Verhaltens am Beispiel von Fräsmaschinen
Carsten Mense. 169 Seiten, 58 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0156-3

Beitrag zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung durch multiattributive Bewertung von Montageanlagen
Timo Fleschutz. 193 Seiten, 62 Abb., 8 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0171-6

Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme
Nils Weinert. 174 Seiten, 52 Abb., 16 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0173-0

Semantic-Web-Wissensbank für Planungsprozesse bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen
Robert Harms. 210 Seiten, 93 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0180-8

Einsatzverhalten genuteter CBN-Schleifscheiben mit keramischer Bindung beim Außenrund-Einstechschleifen
Mathias Kirchgatter. 173 Seiten, 85 Abb., 19 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0211-9

Planung ingenieurwissenschaftlicher Qualifizierung mit Semantik-Web-Wissensbanken
Carsten Reise. 178 Seiten, 61 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0217-1

Development of an Intellectual Capital-Based Management System for Science Parks
Hamad Al Hashemi. 154 Seiten, 54 Abb., 7 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0218-8

Adaptive physikbasierte Modelle für die interaktive Deformationssimulation in der Virtuellen Realität
Ulrike Völlinger. 222 Seiten, 109 Abb., 25 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0273-7

Beitrag zu verteilten technischen Innovationsprozessen unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien
Semih Severengiz. 208 Seiten, 35 Abb., 15 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0232-4

Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung
Johann Habakuk Israel. 389 Seiten, 120 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0330-7

Depth Data based Determination of Gait Parameters of Subjects after Stroke for the Use in Clinical Gait Rehabilitation
Jochen Radmer. 152 Seiten, 84 Abb., 14 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0332-1

Integration von Modellkonzeption und Management der Unternehmensmodellierung
Thomas Knothe. 190 Seiten, 48 Abb., 32 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0355-0

Wissensgenerierung in hybriden Leistungsbündeln durch die Virtual Life Cycle Unit
René Gegusch. 184 Seiten, 81 Abb. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0371-0

Strategische Unternehmensentwicklung auf Basis immaterieller Werte in KMU
Markus Will, 219 Seiten, 56 Abb., 31 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0376-5

Modellbasierte Prozessauslegung des Druckfließläppens am Beispiel keramischer Werkstoffe
Vanja Mihotovic, 166 Seiten, 65 Abb., 5 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0390-1

Schleifen von Hartmetall- und Vollkeramik-Schaftfräsern
Christoph Hübert, 154 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0393-2

A haptic control framework for end-effector based gait simulation interfaces and its application in patient-adaptive rehabilitation training
Sami Hussein, 160 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0464-9

Auditierung von Wissensbilanzen. Eine Methode zur Qualitätssicherung von Bilanzen des Intellektuellen Kapitals
Wen-Huan Wang, 200 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0490-8

Einsatzverhalten von PKD und Bor-dotiertem CVD-Diamant bei der Mikrofunkenerosion
Markus Röhner, 224 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0497-7

Effective Motion Design Applied to Energy-Efficient Handling Processes
Tobias Brett, 205 Seiten, 84 Abb. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0511-0

Fortschrittsbewertung von Fabrikplanungsprojekten
Sven Glinitzki, 230 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0520-2

Kompensation der Verlagerung an nachgiebigen Werkzeugmaschinengestellen am Beispiel von Fräsmaschinen für die Mikrobearbeitung
Jörg Eßmann, 164 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0565-3

Approach for Integrating Predictive-Reactive Job Shop Scheduling with PLC-Controlled Material Flow
Azrul Azwan Abdul Rahman, 168 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-0622-3

Product-Service Systems Enabling for Sustainable City Mobility
Jialiang Hu,167 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0632-2

Integration optischer Messtechnik in Ultrapräzisionsmaschinen für die Korrekturbearbeitung beim Drehen mit Slow-Slide-Servo
Martin Kurz, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0630-8

Contribution to efficient water use and reducing environmental impact of wastewater in industry
Chenqing Wang, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0637-7

Patientengerechte Gestaltung computerbasierter Anwendungen in der gerätegestützten, motorischen Therapie nach Schlaganfall
Simone Schmid, 182 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0634-6

Einfluss der Oberflächenstrukturierung und -texturierung eines Kunststoffsubstrats auf die Anhaftung von Zellen
Quang Ut Huynh, 193 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0631-5

Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens einer Werkzeugmaschine mit der Finite-Elemente-Methode
Jiangmin Hu, 191 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0660-5

Möglichkeiten und Grenzen des Strahlspanens mittels CO_2 Hochdruckstrahlen
Martin Bilz, 170 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0661-2

Nachhaltige Technologiepfade für unterschiedliche Entwicklungsniveaus
Pia Gausemeier, 247 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0670-4

Enabling sustainable value creation by engineering capacity building
Sadiq Ahmad Muhammad Abd Elall, 161 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-0687-2

Verwendung von Traceability-Modellen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme.
Grischa Beier, 378 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0681-0

Effiziente Erfassung und Pflege von Traceability-Modellen zur Entwicklung technischer Systeme
Asmus Figge, 311 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0705-3

Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Mikrofräsen durch Schneidkantenpräparation mittels Tauchgleitläppen.
Armin Löwenstein, 222 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

Integrated Engineering of Products and Services
Patrick Müller, 366 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0549-3

Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung
Simon Frederick Königs, 258 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

Community-Based Design of Process Chains for Manufacturing and Recycling
Steffen Heyer, 189 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0731-2

Werker-Assistenz und -Qualifizierung für manuelle (De-)Montage durch bild- und schrift-gestützte Visualisierung am Arbeitsplatz
Aleksandra Barbara Postawa, 206 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-0733-6

Vereinfachung der Systemmontage von metalloptischen IR-Spiegelteleskopen
Sebastian Scheiding, 163 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0774-9

Geschäftsmodelle der Wiederaufbereitung für Hersteller von Originalteilen
Henry Widera, 218 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0820-3

Verfahren zur mechanischen Erzeugung periodischer nanooptischer Strukturen mit monokristallinen Diamantwerkzeugen am Beispiel von Blazegittern
Kurt Haskic, 196 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0859-3

Absicherung des Innovationserfolgs unter Berücksichtigung des Open-Innovation-Ansatzes
Manuel Rothe, 184 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0861-6

Steigerung der Nutzungspotenziale von CVD-diamantbeschichteten Werkzeugen
Fiona Sammler, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0906-4

Prozessstrategien beim NC-Formschleifen mit Schleifstiften
Tiago Borsoi Klein, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0943-9

Netzfreie Zerspanungssimulation mit der Finite-Pointset-Methode
Robert Gerstenberger, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0946-0

Untersuchung des Einflusses von Dreh-, Drehfräs-, Glattwalz- sowie Schleifprozessen auf das tribologische Einsatzverhalten von Stahl am Beispiel des Rad-Schiene-Kontakts
Stefan Gebhard, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0955-2

Keramische Schaftfräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Nickelbasis-Legierungen
Manuel Wacinski, 148 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0965-1

Additive Fertigung von Nickelbasis-Superlegierungen mittels Laserstrahlschmelzens am Beispiel von Diamalloy 4004NS
Kamilla König-Urban, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0978-1

Modellbasierte Prozessoptimierung für das Mikrofräsen
Frederik Felix Mahr, 234 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0986-6

Quantitative Betriebsmittelbedarfsplanung für die getaktete Fließfertigung
Jakob Dinse, 158 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0951-4

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen Qualitätsmanagementsystems
Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0998-9

Entscheidungsmethodik zur kompetenzbasierten Team-Organisation bei der Implementierung von Energiemanagementsystemen
Phillip Karcher, 240 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0991-0

Nutzenoptimierter Einsatz präventiver Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie
Markus Heintzmann, 238 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0993-4

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen Qualitätsmanagementsystems
Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0998-9

Qualitätsreferenzmodell für die Produktion von Unikaten und Kleinserien
Dominik Rößle, 281 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1035-0

Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlergebnis.
Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1014-5

Niedrigdimensionale Modelle zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der Pose.
Jens Hermann Wintering, 207 S., viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0999-6

Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlergebnis.
Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1014-5

Trockenfunkenerosives Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen
Tassilo-Maria Schimmelpfennig, 149 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-1060-2

Nachhaltige Unternehmensentwicklung aus ressourcenorientierter Perspektive
Ronald Orth, 388 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1062-6

Verfahren zur schnellen, digitalen Modellbildung für Inspektions- und Reengineeringprozesse
Hendrik Grosser, 385 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1077-0

Prozessauslegung zum Schnellhubschleifen von Hochleistungskeramik
Christoph Sammler, 205 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1064-0

Co_2-Schneeentstehung und deren Wirkung auf die Effekte beim Co_2-Schneestrahlen
Michael Kretzschmar, 171 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1065-7

Einsatzverhalten nanocomposite-beschichteter PcBN-Werkzeuge für die Hartdrehbearbeitung
Javier Alejandro Oyanedel Fuentes, 162 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-1081-7

Kubisch-kristallines Bornitrid ohne Bindephase als Schneidstoff in der Ultrapräzisions-Zerspanung
Julian Polte, 187 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1137-1

Herstellung und Einsatz von PKD-Mikrofräswerkzeugen
Mitchel Polte, 173 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1138-8

Trockeneisstrahlen als Vorbehandlungsverfahren vor dem Galvanisieren
El Mustapha Baira, 171 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1157-9

Umweltbewertung und Ökoeffizienz beim Metall-Schutzgasschweißen von Dickblechverbindungen
Gunther Sproesser, 179 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1175-3

Einflussfaktoren der Reinigung mit flüssigem Kohlendioxid auf fertigungsrelevante Materialeigenschaften medizintechnischer Kunststoffe
Johannes Mankiewicz, 166 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1180-7

Simulationsmodell als Basis zur Ableitung von Zerspanstrategien zur Reduzierung von thermischen Bearbeitungseinflüssen beim Hartdrehen
Ivan Mitkov Ivanov, 166 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1201-9

Adaptives Entwicklungstool zur intelligenten Konfigurierung von Condition-Monitoring-Algorithmen
Abdelhakim Laghmouchi, 176 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1222-4

Die-Sinking EDM of High Aspect Ratio Cavities in Nickel-Base Alloy
David Carlos Domingos, 249 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1163-0

Kinematisch modulierte Schleifprozesse zur Strukturierung von tribologisch beanspruchten Funktionsoberflächen
Clemens Bäcker, 204 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1235-4

Resource-Optimized Verification Planning for Mechatronic Systems in the Virtual Stage of Product Creation
Frank Gerhorst, 185 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1255-2

Wissensbasierte Entwicklung nachhaltiger Produkte
Kai Lindow, 246 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1271-2

Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie und dessen Umsetzung an Produktionsstandorten in der Volksrepublik China unter Berücksichtigung kultur- und kooperationsbedingter Einflüsse
Oliver Linthe, 190 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1276-7

Gestaltungsaspekte immersiver Fahrsimulationsumgebungen
Diana Reich, 258 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1283-5

Benchmarking-unterstützte Standortplanung von industriellen Wertschöpfungsprozessen
Xing Zhou, 226 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1296-5

Einsatzverhalten und Leistungsbedarfe unterschiedlicher Kühlungsmethoden beim Außen-Längs-Runddrehen
Paul Fürstmann, 178 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1317-7

Grinding of high performance materials with spherical mounted point
Stefan Koprowski, 160 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1311-5

Methodik zur integrierten virtuellen Auslegung und Absicherung flexibler Bauteile
Nicolas Hofheinz, 248 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1298-9

Werkzeug- und prozessseitige Grundlagen des Schienenschleifens unter Berücksichtigung der Schienentemperatur und der Wechselwirkung mit dem Einsatzverhalten der Schiene
Pavlo Lypovka, 224 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1306-1

Spannutschleifen von Hartmetall-Schaftwerkzeugen mit gradierten Schleifscheiben
Nikolas Schröer, 166 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1310-8

Methode zur Bestimmung spezifischer Kräfte durch Fräsversuche und Anwendung bei der Natursteinbearbeitung
Marcel Manthei, 160 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1288-0

Endkonturnahe Schruppbearbeitung von Titanaluminid mittels Wasserabrasivstrahlen mit kontrollierter Schnitttiefe
Fabian Faltin, 160 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1309-2

Ultrapräzisionsverfahren zur Erhöhung der Güte abbildender Beugungsgitter
Stefan Kühne, 209 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1301-6

Fräsbearbeitung von Nickelbasislegierungen mit Industrierobotern
Sascha Reinkober, 214 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1328-3

Methodology for the in-process evaluation of software-based process failures in Selective Laser Melting machine tools
Rodrigo Pastl Pontes, 186 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1350-4

The Working Posture Controller: Automated adaptation of the workpiece pose to enable a neutral working posture
The Duy Nguyen, 219 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1355-9

Finishbearbeitung technischer Oberflächen aus gehärtetem Stahl unter Verwendung von Rundbürsten mit Schleiffilamenten
Leif Hochschild, 212 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1347-4

Entwicklung eines hochauflösenden wellenlängendispersiven Spektrometers für den Spektralbereich harter Röntgenstrahlung
Ina Holfelder, 198 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1375-7

Ganzheitliche Planung der Qualitätsorganisation in produzierenden Unternehmen
Falk Johannes Behmer, 226 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1368-9

Laser-Pulver-Auftragschweißen in der additiven Prozesskette für Legierungen aus dem Turbomaschinenbau
Benjamin Graf, 138 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1387-0

Vorgehensmodell zur Methodenauswahl in Six-Sigma-Projekte
Julian Enriquev Ariza Alvarez, 236 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-1383-2

Optimized Data Integration for Tracelinking in Product Development through the Application of Semantic Web Technologies
Robert Woll, 201 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1389-4

Entwicklung eines methodenbasierten Modells zur Messung und Bewertung der Produktivität von Dienstleistungsprozessen
Ahmad Schafiq Amini, 340 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1412-9

Entwicklung eines Validierungsframeworks zur erlebbaren Absicherung von Fahrerassistenzsystemen
Maik Auricht, 342 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1415-0

Fallbasierte Feinplanung im Rahmen der kurzfristigen Fertigungssteuerung
Reinhard Arlt, 246 Seiten, viele Abb. und Tab., 2018. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1429-7

Systematische Methodenanwendung im dynamischen Qualitätsmanagement bei KMU
Johannes Schober, 302 Seiten, viele Abb. und Tab., 2019. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1447-1

Entwicklung eines methodengestützten Vorgehensmodells für das Qualitätsmanagement Reporting (QMR)
Tobias Gruber, 252 Seiten, viele Abb. und Tab., 2019. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1451-8

Prototyping von Produkt-Service Systemen und Smart Services in der Konzeptphase des Entwicklungsprozesses
Konrad Exner, 282 Seiten, viele Abb. und Tab., 2019. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1457-0

Merkmalbasiertes Nutzerunterstützungssystem für die Erfassung von Bauteilen mittels industrieller Computertomographie
Nikolas Sawczyn, 275 Seiten, viele Abb. und Tab., 2019. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1464-8

Verfahren zur kamerabasierten Instrumentennavigation am Beispiel der HNO-Chirurgie
Manuel Katanacho, 179 Seiten, viele Abb. und Tab., 2019. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1498-3

Liquid Metal Embrittlement of Advanced High Strength Steels during Resistance Spot Welding
Julian Frei, 167 Seiten, viele Abb. und Tab., 2019. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1495-2

Assistenzsystem für die Entwicklung nachhaltiger Produkte
Tom Buchert, 298 Seiten, viele Abb. und Tab., 2019. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1508-9

Einsatzverhalten keramischer Fräswerkzeuge bei der Zerspanung von glas- und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen
Bartek Stawiszynski, 182 Seiten, viele Abb. und Tab., 2020. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1610-9

Investigation of the Metallurgical and Thermo-Mechanical Factors Influencing Centreline Solidification Cracking by Laser Beam and Hybrid
Vanessa Penaranda Quiroz , 198 Seiten, viele Abb. und Tab., 2020. Kartoniert.
ISBN 978-3-8396-1601-7

Sortierung von Objekten in mikrofluidischen Systemen auf Basis von piezogetriebenen Aktoren
Peter Paul Horbert, 202 Seiten, viele Abb. und Tab., 2020. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1630-7

Fahrerassistenzsysteme (FAS) haben in den vergangenen Jahrzehnten einen wesentlichen Beitrag zur Vermeidung von Unfällen und zur Abschwächung von Unfallfolgen geleistet. In der Entwicklung hin zum vollständig autonomen Fahrzeug werden FAS zukünftig immer umfangreichere Aufgaben der Fahrzeugsteuerung übernehmen. Der erfolgreiche Einsatz von FAS setzt voraus, dass der Fahrer das FAS versteht und mit diesem situationskonform interagieren kann. Die dazu erforderliche vollständige Interaktion zwischen Fahrer und FAS kann heute jedoch erst spät in der Entwicklung getestet werden. Im Rahmen der Arbeit wird daher das neuartige Hybrid-Prototype-in-the-Loop (HPiL) Testverfahren entwickelt, welches den Test der vollständigen Fahrer-FAS Interaktion auf Basis frühester Entwicklungsprototypen ermöglicht. Die Bereitstellung der Prozesse, Methoden und Werkzeuge der Hybrid-Prototype-in-the-Loop Methodik ermöglicht den effizienten Einsatz des HPiL-Testverfahrens im Entwicklungsprozess. Auf Basis verschiedener Nutzertests werden der Nutzen und die Potentiale des HPiL-Testverfahren für die heutige und die zukünftige FAS Entwicklung herausgearbeitet.

ISBN 978-3-8396-1650-5

9 783839 616505

FRAUNHOFER VERLAG