



Benedikt Strasser

---

# Vernetzung von Test- und Simula- tionsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenz- systemen



## Audi-Dissertationsreihe, Band 69





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Ergonomie

**Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die  
Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen**

Peter Sebastian Benedikt Strasser

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen  
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb (i. R.)  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer,  
Technische Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig  
3. Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Die Dissertation wurde am 17. August 2011 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14. Mai 2012 angenommen.



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2012  
Zugl.: (TU) München, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-263-0

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-263-0



*Ich wünsche dir günstigen Wind,  
wenn du eine neue Aufgabe anpackst.  
Möge dein Engel dir dabei zur Seite stehen!  
Dann wirst du mit Mut und Zuversicht  
bestimmt gut vorankommen!*  
Sonntag (2005)

**Meinen Engeln:  
Meiner Frau, Meiner Familie**





# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Menschen bedanken, die mich in den letzten Jahren auf dem Weg zu dieser Arbeit begleitet haben.

Zu allererst ein großes Dankeschön meinem ersten Arbeitgeber und Doktorvater Herrn Professor (i. R.) Dr. rer. nat. Heiner Bubb, der sich trotz seiner unzähligen Aufgaben immer die Zeit genommen hat, mich fachlich und persönlich zu betreuen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Markus Maurer möchte ich ebenfalls meinen tiefen Dank aussprechen. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, über das INI.TUM-Projekt an dieser Promotion zu arbeiten. Zusätzlich konnte ich mich auch immer mit fachlichen Fragen an ihn wenden und mit ihm sehr konstruktive Diskussionen führen.

Herrn Professor Dr. phil. Klaus Bengler danke ich sehr für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Udo Lindemann für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses.

Ein ganz besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Karl-Heinz Siedersberger, der mich nicht nur von Seiten der AUDI AG hervorragend zu jeder Zeit und zu jedem Thema unterstützt hat, sondern auch durch sein persönliches Engagement ein einmaliges Arbeitsklima in seinem Projekthaus, der Vorentwicklung Fahrerassistenzsysteme, geschaffen hat.

All meinen Kollegen des Projekthauses Fahrerassistenzsysteme sowie „meinen“ Studenten danke ich für die zahlreichen, sehr hilfreichen fachlichen und persönlichen Diskussionen sowie deren ständige Bereitschaft, mich in meinem Projekt zu unterstützen. Selber Dank gilt natürlich auch den Kolleginnen und Kollegen meiner zweiten Arbeitsheimat, dem Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München.

Zu guter Letzt danke ich noch ganz besonders meiner Ehefrau und meiner Familie, die mir immer den Rücken frei gehalten haben und die auch manchmal schwierige Zeiten mit mir durchgestanden haben.

Euch allen herzlichen Dank,  
es waren großartige Jahre, die ich nicht missen möchte!

Tauberfeld, 26. Oktober 2012

*Benedikt Strasser*







# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund . . . . .	1
1.2 Motivation . . . . .	3
<b>2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung</b>	<b>5</b>
2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung . . .	5
2.1.1 Software in the Loop . . . . .	16
2.1.2 Hardware in the Loop . . . . .	17
2.1.3 Driver in the Loop . . . . .	18
2.1.4 Vehicle in the Loop . . . . .	19
2.1.5 Realtest . . . . .	21
2.2 Methoden der Fahrzeugsystem-Entwicklung . . . . .	22
<b>3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme</b>	<b>25</b>
3.1 Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	25
3.2 Adaptive Cruise Control . . . . .	28
3.2.1 Technische Daten . . . . .	28
3.2.2 Eingesetzte Hardware . . . . .	31
3.2.3 Bedienung und Anzeige . . . . .	32
3.2.4 Systemgrenzen . . . . .	33
3.3 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen in Forschung und Entwicklung	35
3.3.1 Fahrzeuge bzw. Bedienelemente . . . . .	35
3.3.2 Auswirkungen auf die Umwelt . . . . .	36
3.3.3 Fahrerverhalten . . . . .	37
3.3.4 Fahrzeugsystem . . . . .	40
3.3.5 Zusammenfassung . . . . .	40
	<b>VII</b>



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>4</b>	<b>Ziele und Ansatz dieser Arbeit</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC</b>	<b>45</b>
5.1	Untersuchungshypothesen . . . . .	45
5.2	Versuchskonzept . . . . .	47
5.2.1	Testszenarien . . . . .	48
5.2.2	Probanden . . . . .	52
5.2.3	Versuchsstrecke . . . . .	53
5.2.4	Versuchsfahrzeuge Studie I und Studie II . . . . .	54
5.2.5	Messmethoden . . . . .	55
5.2.6	Versuchsplan . . . . .	62
5.3	Messergebnisse . . . . .	64
5.3.1	Subjektive Bewertung . . . . .	64
5.3.2	Objektive Messgrößen . . . . .	70
5.4	Definition des Sollverhaltens . . . . .	81
5.4.1	Bewertungsfunktionen des Manövers Auffahren auf Kolonne . . . . .	82
5.4.2	Bewertungsfunktionen des Manövers Überholen . . . . .	83
5.4.3	Bewertungsfunktionen des Manövers Reaktion auf Einscherer . . . . .	85
5.4.4	Bewertungsfunktionen des Manövers Reaktion auf Ausscherer . . . . .	86
5.5	Validierung der Methodik am Beispiel von ACC im neuen Audi A8 . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation</b>	<b>93</b>
6.1	Konzept und Systemaufbau eines FAS-Domänen-HILs . . . . .	93
6.1.1	Simulationsrechner . . . . .	96
6.1.2	Echtzeit System . . . . .	96
6.1.3	FAS-Steuergerät . . . . .	97
6.1.4	Auswerterechner . . . . .	98
6.2	Sensormodell des ACC-Domänen-HILs . . . . .	99
6.2.1	Modellierungskonzept . . . . .	99
6.2.2	Messungen und Ergebnisse . . . . .	103
6.2.3	Implementierung . . . . .	114
6.2.4	Validierung . . . . .	122
6.2.5	Zusammenfassung . . . . .	124
6.3	Validierung der Eigenschaftsentwicklung am ACC-Domänen-HIL . . . . .	125



## *INHALTSVERZEICHNIS*

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
<b>A Test- und Simulationswerkzeuge</b>	<b>139</b>
<b>B ACC-Studien</b>	<b>143</b>
<b>C Dokumente aus den Fahrstudien</b>	<b>203</b>
<b>D Statistische Auswertung der Fragebögen</b>	<b>219</b>
<b>E Statistische Auswertung der objektiven Messgrößen</b>	<b>225</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>231</b>





# Abbildungsverzeichnis

1.1	Verkehrs- und Unfalldaten . . . . .	2
1.2	Veränderung der Wechselbeziehungen im Mensch-Maschine-Modell . .	3
1.3	Steigende Anzahl von Modellvarianten . . . . .	4
2.1	Erprobungsumgebung für FAS nach Schenk (2007) . . . . .	7
2.2	Struktur des Mensch-Maschine-Systems in Anlehnung an Bubb und Schmidtke (1993) . . . . .	7
2.3	3-Ebenen-Modell nach Donges . . . . .	8
2.4	Funktionsprinzip und möglicher Aufbau der Augmented Reality Tech- nik nach Bock (2008) . . . . .	11
2.5	Steuergerätearchitektur eines Oberklassefahrzeugs . . . . .	14
2.6	Funktionaler Aufbau eines Software in the Loop-Prüfaufbaus . . . . .	16
2.7	Funktionaler Aufbau eines Hardware in the Loop-Prüfaufbaus . . . . .	17
2.8	Funktionaler Aufbau eines Driver in the Loop-Prüfaufbaus . . . . .	19
2.9	Funktionaler Aufbau eines Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus . . . . .	20
2.10	Funktionaler Aufbau eines Realtest-Prüfaufbaus . . . . .	21
2.11	Wasserfallmodell nach Dr. Winston W. Royce aus Schwaiger (2008) . .	22
2.12	Systematischer Systementwurf in Forschung und Vorentwicklung . . . .	23
2.13	V-Modell zur Fahrzeugsystementwicklung . . . . .	24
3.1	Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt mit integriertem Fahrerassistenz- system nach Deutsche (2005) . . . . .	26
3.2	Umfeldsensoren für ACC im Audi A8 . . . . .	29
3.3	Explosionsdarstellung des LRR3 aus Lucas (2009) . . . . .	31
3.4	Blockschaltbild des LRR3 aus Lucas (2009) . . . . .	32
3.5	ACC-Lenkstockhebel . . . . .	33
3.6	ACC-Kombiinstrument . . . . .	34
4.1	Bewertungsprozess für Fahrerassistenzsysteme . . . . .	43
5.1	Ablauf der psychophysischen Untersuchungen . . . . .	47



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

5.2	Potentielle Szenarien mit relativer Häufigkeit (Anteile an Gesamtzeit: 25%) . . . . .	49
5.3	Manöver Stationärfahrt . . . . .	50
5.4	Manöver Auffahren auf Kolonne . . . . .	50
5.5	Manöver Überholvorgang . . . . .	51
5.6	Manöver Reaktion auf Einscherer . . . . .	51
5.7	Manöver Reaktion auf Ausscherer . . . . .	52
5.8	Jahreskilometerleistung und subjektive Selbsteinschätzung des Fahrstils der Probanden . . . . .	54
5.9	Versuchsfahrzeuge Studie I und Studie II . . . . .	54
5.10	INS/DGPS-basierte Referenzgenerierung für Realtests nach Strasser u. a. (2010) . . . . .	59
5.11	Montage der RefBox im Fahrzeug anstelle des Beifahrersitzes aus Strasser u. a. (2010) . . . . .	60
5.12	Datenströme der Referenztoolkette . . . . .	61
5.13	Skalen des Manövers Auffahren auf Kolonne . . . . .	65
5.14	Skalen des Manövers Überholen . . . . .	66
5.15	Skalen des Manövers Reaktion auf Einscherer . . . . .	68
5.16	Skalen des Manövers Reaktion auf Ausscherer . . . . .	69
5.17	Objektive Messgrößen des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinaler Differenzabstand . . . . .	71
5.18	Objektive Messgrößen des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	71
5.19	Objektive Messgrößen des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	72
5.20	Objektive Messgrößen des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	74
5.21	Objektive Messgrößen des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	74
5.22	Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinaler Differenzabstand . . . . .	75
5.23	Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	76
5.24	Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	76
5.25	Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	78



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

5.26	Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	78
5.27	Objektive Bewertung des Manövers Auffahren auf Kolonne . . . . .	83
5.28	Objektive Bewertung des Manövers Überholen . . . . .	84
5.29	Objektive Bewertung des Manövers Reaktion auf Einscherer . . . . .	85
5.30	Objektive Bewertung des Manövers Reaktion auf Ausscherer . . . . .	87
5.31	Objektive Bewertung des Manövers Auffahren auf Kolonne (Validierung)	90
5.32	Objektive Bewertung des Manövers Reaktion auf Ausscherer (Validierung) . . . . .	91
6.1	Funktionaler Aufbau des FAS-Domänen-HILs . . . . .	94
6.2	Technischer Aufbau des FAS-Domänen-HILs . . . . .	95
6.3	Datenströme der Referenztoolkette (vgl. Strasser u. a., 2010) . . . . .	98
6.4	Entwicklungsprozess des Sensormodells . . . . .	101
6.5	Geometrie des Tripelspiegels . . . . .	102
6.6	Eingesetzte Entfernungsmessgeräte (Leica, 2011) . . . . .	103
6.7	Sensorkoordinatensystem . . . . .	104
6.8	Messprinzip: Sichtbereich . . . . .	104
6.9	Messergebnis: Linearisierter Sichtbereich . . . . .	105
6.10	Messprinzip: Blinder Bereich . . . . .	106
6.11	Messergebnis: Laterale Genauigkeit auf dem Heck . . . . .	107
6.12	Messprinzip: Genauigkeit auf der Seite . . . . .	108
6.13	Messergebnis: Genauigkeit auf der Seite . . . . .	109
6.14	Messprinzip: Longitudinale Geschwindigkeit . . . . .	109
6.15	Messprinzip: Laterale Trennfähigkeit . . . . .	111
6.16	Messprinzip: Longitudinale Trennfähigkeit . . . . .	112
6.17	Messprinzip: Latenzzeit (theoretisch) . . . . .	112
6.18	Messergebnis: Abhängigkeit der Zykluszeit von der Anzahl der Objekte	113
6.19	Softwarearchitektur des Sensormodells . . . . .	114
6.20	Kodierung der Lage der Bounding Box im Sichtfeld . . . . .	116
6.21	Beispiel der Analyse der Trennfähigkeit . . . . .	118
6.22	Implementierungsansatz der Zykluszeit und Latenzzeit . . . . .	119
6.23	Beispiel der Analyse der Verdeckung . . . . .	120
6.24	Gemessene und modellierte Existenzwahrscheinlichkeit . . . . .	122
6.25	Validierungsprinzip mit Referenz . . . . .	123
6.26	Genauigkeit des lateralen Differenzabstands des Sensormodells . . . . .	123
6.27	Genauigkeit des longitudinalen Differenzabstands des Sensormodells . . . . .	124





## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

6.28	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Folgefahrt: Longitudinaler Differenzabstand . . . . .	126
6.29	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Folgefahrt: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	126
6.30	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinaler Differenzabstand . . . . .	127
6.31	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	127
6.32	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	128
6.33	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Überholen: Lateraler Differenzabstand . . . . .	128
6.34	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	129
6.35	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	129
6.36	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinaler Differenzabstand . . . . .	130
6.37	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	130
6.38	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	131
6.39	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Lateraler Differenzabstand . . . . .	131
6.40	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung . . . . .	132
6.41	Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit . . . . .	132
D.1	Wie lange haben Sie schon Ihren Führerschein? . . . . .	220
D.2	Seit wie vielen Jahren fahren Sie regelmäßig? . . . . .	220
D.3	Wie viele Kilometer fahren Sie pro Jahr? . . . . .	221
D.4	Wie viele Kilometer sind Sie insgesamt schon gefahren? . . . . .	221
D.5	Wie oft fahren Sie mit dem Auto? . . . . .	222
D.6	Wie oft fahren Sie mit dem Auto auf der Autobahn? . . . . .	222
D.7	Sind Sie schon mit Tempomat gefahren? . . . . .	223
D.8	Wie oft fahren Sie mit Automatik-Fahrzeugen? . . . . .	223



## *ABBILDUNGSVERZEICHNIS*

D.9 Sind Sie schon mit ACC gefahren? . . . . .	224
D.10 Wie bezeichnen Sie Ihre Fahrweise? . . . . .	224





# Tabellenverzeichnis

2.1	Erprobungsumgebung für FAS nach Niedermayr (2005) . . . . .	6
3.1	FAS mit Zuordnung zu den Ebenen der Fahraufgabe . . . . .	27
5.1	Klassifikation der Applikationen . . . . .	53
5.2	Dominanzwahrscheinlichkeiten . . . . .	58
5.3	Zugeordnete $z$ -Werte . . . . .	58
5.4	Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Auffahren auf Kolonne . . . . .	73
5.5	Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Überholen . . . . .	75
5.6	Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Reaktion auf Ein- scherer . . . . .	77
5.7	Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Reaktion auf Aus- scherer . . . . .	79
5.8	Kennwerte der Probanden . . . . .	82
5.9	Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Reaktion auf Aus- scherer (Validierung) . . . . .	88
5.10	Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Auffahren auf Kolonne (Validierung) . . . . .	89
6.1	Messergebnis: Sichtbereich . . . . .	105
6.2	Messergebnis: Blinder Bereich . . . . .	105
6.3	Messergebnis: Longitudinale Genauigkeit auf dem Heck . . . . .	107
6.4	Messergebnis: Laterale Genauigkeit auf dem Heck . . . . .	108
6.5	Messergebnis: Longitudinale Geschwindigkeit . . . . .	110
6.6	Messergebnis: Laterale Trennfähigkeit . . . . .	110
6.7	Messergebnis: Longitudinale Trennfähigkeit . . . . .	111
6.8	Geradengleichungen für die Linearisierung des Sichtbereichs . . . . .	115
6.9	Entscheidungsregeln der Lage des Reflexionspunktes . . . . .	116



## TABELLENVERZEICHNIS

A.1	Übersicht über die Test- und Simulationswerkzeuge . . . . .	140
A.2	Bewertung der Test- und Simulationswerkzeuge I . . . . .	141
A.3	Bewertung der Test- und Simulationswerkzeuge II . . . . .	142
E.1	Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Auffahren auf Kolonne . . . . .	225
E.2	Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Überholen . . . . .	225
E.3	Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Reaktion auf Einscherer . . . . .	225
E.4	Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Reaktion auf Ausscherer . . . . .	226
E.5	Mehrfachvergleich des Manövers Auffahren auf Kolonne nach Bonferroni	227
E.6	Mehrfachvergleich des Manövers Überholen nach Bonferroni . . . . .	228
E.7	Mehrfachvergleich des Manövers Reaktion auf Einscherer nach Bonfer- roni . . . . .	229
E.8	Mehrfachvergleich des Manövers Reaktion auf Ausscherer nach Bon- ferroni . . . . .	230



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Das Fahrzeug hat sich in den letzten Jahrzehnten extrem schnell weiterentwickelt. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in den veränderten Anforderungen, die sich aus den Ansprüchen der Kunden sowie der Gesetzgeber ableiten lassen. Aus Sicht der Legislative sind dies die Forderung nach Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit der Emissionen sowie vor allem die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Zentrale Themen aus Kundensicht sind sowohl die Sicherheit als auch der gesteigerte Wunsch nach Mobilität bei höchstem Komfort, welche durch die Forschung und Entwicklung bearbeitet werden.

Besonders der Wunsch nach Mobilität hat zu einem steten Wachstum des Verkehrsaufkommens auf Autobahnen und Landstraßen geführt. Dies hat zur Folge, dass sich alle Verkehrsteilnehmer zunehmend höheren Anforderungen stellen müssen. So sind vom Fahrer immer mehr unterschiedliche Handlungen in immer kürzeren Abständen oder sogar zeitgleich durchzuführen. Auch in Zukunft ist mit einem Fortschreiten dieses Trends zu rechnen.

Die so entstandene Komplexität führt zum Teil zu einer Überforderung der Verkehrsteilnehmer, wodurch es zu gefährlichen Situationen oder gar Unfällen kommen kann. Abbildung 1.1 verdeutlicht diese Aussagen anhand der prozentualen Veränderung des Kraftfahrzeugbestandes, der Unfälle mit Personenschaden sowie der getöteten Personen im Straßenverkehr auf Basis (100%) des Jahres 1979 (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, 2009a; Destatis, 2009, 2010)<sup>1</sup>. So ist hier ein Anstieg der Zulassungszahlen und auch der Gesamtunfallzahlen wiederzufinden. Die Anzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer ist jedoch seit 1970 kontinuierlich rückläufig. Dieser Trend ist zum größten Teil auf die stetige Verbesserung des Gesamtsystems Fahrzeug, die Optimierung und weite Verbreitung von passiven Systemen sowie die Einführung von aktiven Sicherheitssystemen zurückzuführen.

---

<sup>1</sup> Ab 1. Januar 2008 werden in den Kraftfahrzeugbestand nur noch angemeldete Fahrzeuge ohne vorübergehende Stilllegungen/Außerbetriebsetzungen mit eingerechnet.

## 1 Einleitung

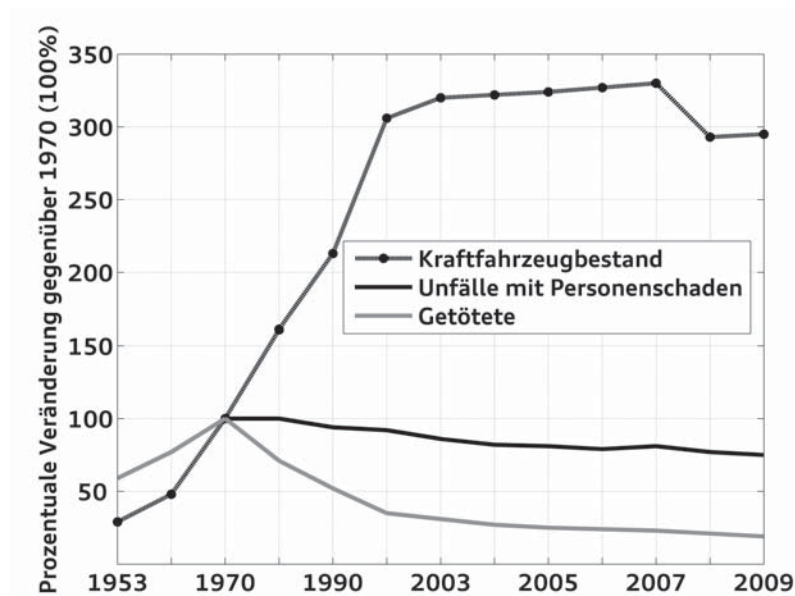


Abbildung 1.1: Verkehrs- und Unfalldaten

Zum einheitlichen Verständnis ist hier eine kurze Erklärung der Systemausprägungen angegeben. So gibt es eine Unterteilung in passive und aktive Systeme der passiven und aktiven Sicherheit. Die passive Sicherheit steht für Unfallschwereminderung (engl.: mitigation) mit z. B. Sicherheitsfahrergastzelle, Airbag oder Sicherheitsgurt, die aktive Sicherheit für Unfallvermeidung (engl.: avoidance) mit z. B. ABS oder ESP. Passive Systeme haben lediglich eine warnende Funktion, wohingegen aktive Systeme in die Fahrdynamik bzw. Fahrzeugführung eingreifen (vgl. Maurer, 2010; Heißing, 2008). Nach Wisselmann (2008) gilt das Potential passiver Sicherheit mittlerweile jedoch größtenteils als ausgeschöpft und so kann eine weitere Reduktion der Unfälle und deren Folgen nur dadurch erzielt werden, dass die in den letzten Jahren stagnierende Anzahl an Unfallereignissen reduziert wird. Bergholz u. a. (2008) geben hierbei mit 85% ein Fehlverhalten der Fahrzeugführer als häufigste Unfallursache an. Dies hat zur Folge, dass moderne Fahrzeugsysteme vor allem die Aufgabe haben, den Fahrer zu unterstützen. Sie sollen also nach Maurer (2010) parallel, redundant in die Fahraufgabe eingreifen, weswegen diese Systeme auch als **Fahrerassistenzsysteme** (FAS) bezeichnet werden. Durch geeignete Sensoren nehmen sie die Fahrsituation wahr und agieren darauf aufbauend in unterschiedlichster Weise, jedoch immer mit dem selben Ziel, den Fahrer zu unterstützen und somit positiv auf die oben angegebenen Forderungen der Kraftstoff- bzw. Emissionsreduzierung, der Verbesserung des Komforts und der Erhöhung der Sicherheit einzuwirken.

## 1.2 Motivation

Diese geforderten Funktionalitäten führen dazu, dass moderne Fahrzeuge hochkomplexe Systeme in einem hochkomplexen Umfeld sind. So genügt es in der heutigen Zeit nicht mehr, das Fahrzeug isoliert zu betrachten, sondern es müssen die Wechselbeziehungen zwischen der Trias Fahrer, Fahrzeug und Umwelt bzw. sogar in einem weiteren Schritt zwischen Fahrer, Fahrzeug, Umwelt und Fahrzeugsystem berücksichtigt werden (vgl. Buld und Krüger, 2002; Ehmanns u. a., 2000). In Abbildung 1.2 wird dieser Zusammenhang anhand des Mensch-Maschine-Modells von Bubb und Schmidtke (1993) stark abstrahiert dargestellt.

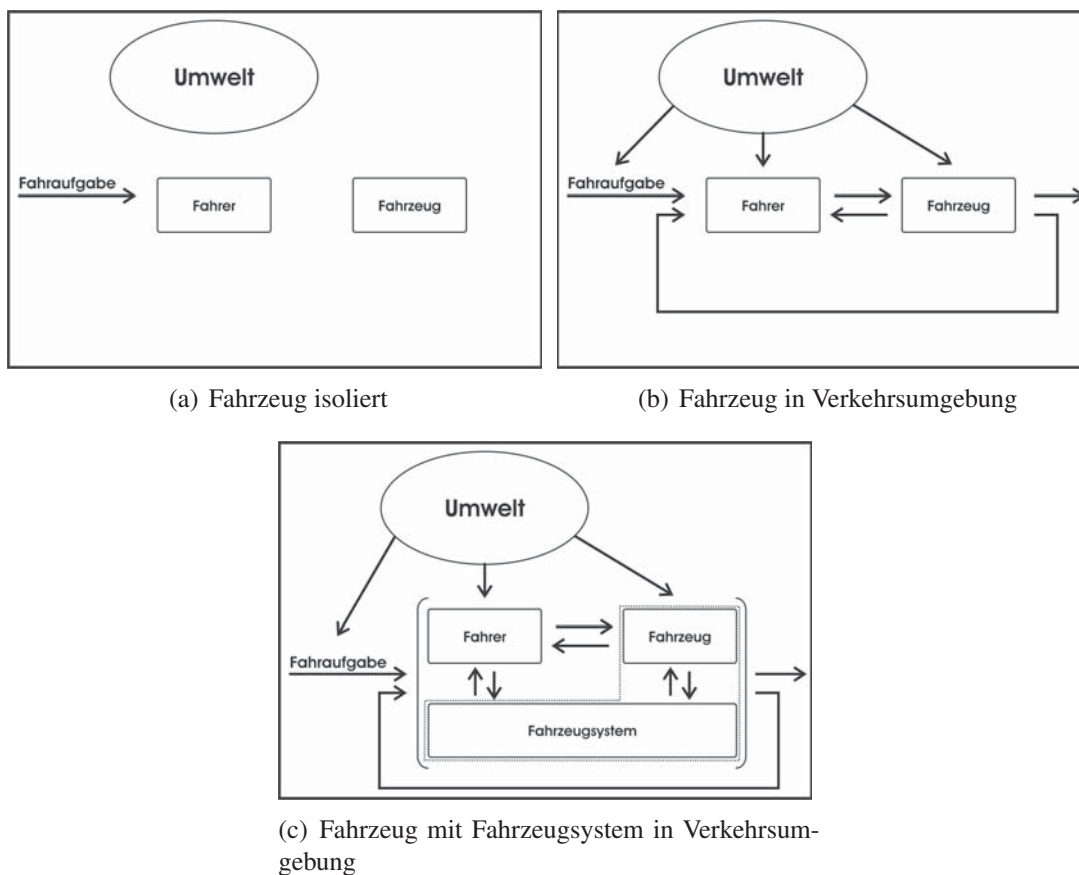


Abbildung 1.2: Veränderung der Wechselbeziehungen im Mensch-Maschine-Modell

Weitere Ursachen, die einen Einfluss auf den Entwicklungsprozess haben werden, sind nach Wildemann (2010) der Kundenwunsch nach größtmöglicher Differenzierung, ein steigender Wettbewerbsdruck durch die Globalisierung der Märkte und eine immer



## 1 Einleitung

größer werdende Dynamik der technischen Entwicklung. Dies zeigt sich in einem drastischen Anstieg der Anzahl von Modellvarianten durch mehr Baureihen (plus ca. 200%) und mehr Fahrzeugtypen (plus ca. 240%) in den letzten 20 Jahren (vgl. Abbildung 1.3), die aus Expertensicht in den nächsten Jahren alle mit den modernen Fahrzeugsystemen ausgestattet werden.

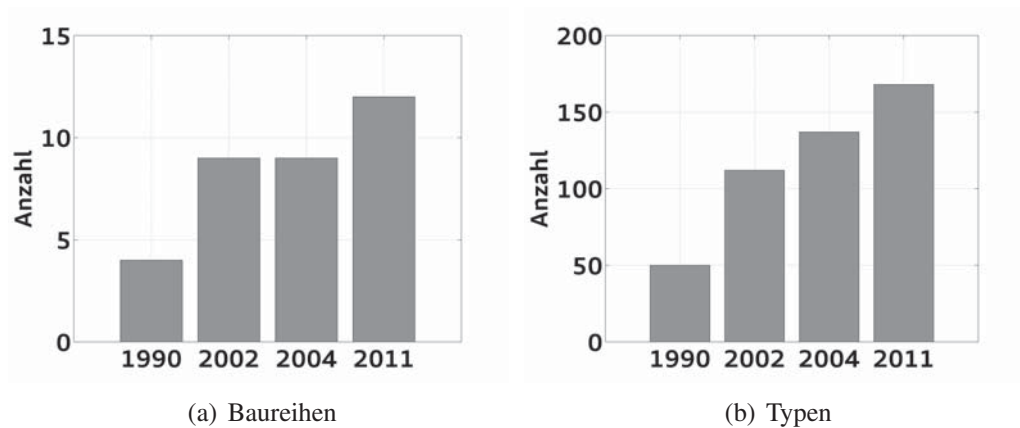


Abbildung 1.3: Steigende Anzahl von Modellvarianten

Diese Komplexitätssteigerung bei immer mehr Fahrzeugprojekten wird in der Fahrzeugentwicklung zusammen mit der wesentlichen Herausforderung der weiteren Verbesserung der Qualität aller Komponenten und somit des Gesamtsystems unter dem erheblichen Druck der Kostenreduktion zu Anpassungen des Produktentstehungsprozesses führen (vgl. Dick, 2007). Nach Bock u. a. (2008) wird zum Beispiel die Verfügbarkeit und Qualität von Simulationsmethoden und deren Prozessintegration zu einer unabdingbaren Voraussetzung und einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor werden.

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit diesen Forderungen. Hierfür wird zunächst der Stand der Technik des Entwicklungsprozesses bestehend aus Werkzeugen und Methoden erarbeitet. Darauf aufbauend wird untersucht, welche Anpassungen an den Werkzeugen und Methoden vorgenommen werden müssen, um die dargestellten Forderungen umsetzen zu können. Den Abschluss bildet die Validierung der erarbeiteten Werkzeuge und Methoden am Beispiel eines aktuellen Fahrzeugprojektes.

Da Fahrerassistenzsysteme besonders stark von den neuen Herausforderungen betroffen sind, werden die Ergebnisse am Beispiel von Adaptive Cruise Control (ACC) exemplarisch umgesetzt.

## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

Im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie hat sich eine Verteilung der Entwicklungstätigkeiten in bauteilorientierte Bereiche etabliert.

So wird das Fahrzeug zum Beispiel in die Subsysteme Fahrwerk, Karosserie, Aggregate oder Multi-Media-Systeme unterteilt. Innerhalb dieser Bereiche kommt es zu weiteren Partitionierungen, um am Ende die Bauteile und Funktionen wieder zum Produkt Fahrzeug zusammenzufassen.

Da es sich, wie eingangs bereits beschrieben, in der Fahrzeugentwicklung um ein hochkomplexes Thema handelt, sind ein effektiver Entwicklungsprozess sowie darin eingesetzte Methoden und Werkzeuge unerlässlich. Im Folgenden werden die bekanntesten und für die Entwicklung von Fahrzeugsystemen relevanten Werkzeuge und Methoden näher betrachtet, wobei im Zuge dieser Arbeit ausschließlich **elektronische Fahrzeugsysteme** berücksichtigt werden. Anschließend werden Fahrerassistenzsysteme als Beispiele moderner elektronischer Fahrzeugsysteme vorgestellt, um darauf aufbauend aktuelle Forschungs- und Entwicklungstrends in der Bewertung dieser diskutieren zu können.

### 2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

Um ein einheitliches Verständnis für den Gebrauch des Begriffs Test- und Simulationswerkzeuge zu erhalten, sei hier zunächst eine Definition angegeben.

Ein Test- und Simulationswerkzeug ist ein rechnergestütztes bzw. -unterstütztes Werkzeug, welches den ((teil-)automatisierten) Test- und Entwicklungsprozess von Systemen und Komponenten (eines Kraftfahrzeugs) unterstützt.

Hierbei könnten eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen dieser Systeme betrachtet werden. Aus Sicht eines Fahrzeugherstellers (Original Equipment Manufacturer oder

## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

OEM) und dessen Produktentstehungsprozesses für Fahrzeugsysteme sind jedoch besonders Software in the Loop (SIL), Hardware in the Loop (HIL), Vehicle in the Loop (VIL), Driver in the Loop (DIL) und Erprobungsfahrzeuge im Realtest sinnvoll einsetzbar. Wie diese Test- und Simulationswerkzeuge aufgebaut sind und klassifiziert werden, wird im Folgenden näher betrachtet.

In der Literatur existieren unterschiedlichste Möglichkeiten der Klassifikation. In Tabelle 2.1 sind die von Niedermayr (2005) angewendeten Kriterien zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Erprobungsumgebung für FAS nach Niedermayr (2005)

		Umwelt	
		simuliert	real
System	Modell	Model in the Loop	Rapide Prototyping
	Code	Software in the Loop	
	Testboard	Prozessor in the Loop	
	Steuergerät	Hardware in the Loop	

So unterscheidet er die Werkzeuge zum einen danach, ob es sich um einen Whitebox-Test<sup>1</sup> (Modell und Code) oder einen Blackbox-Test<sup>2</sup> (Testboard und Steuergerät) handelt und zum anderen, ob die Umwelt, die für ihn das zu entwickelnde Fahrzeug ist, real verwendet werden kann oder simuliert werden muss.

Schenk (2007) verfolgt in seiner Arbeit den Ansatz, dass jeder Prüfstand aus einem Prüfling (Systemcode, Software, Hardware, Kombination aus Hard- und Software oder fertiges Gesamtfahrzeug) besteht, der von einer Simulation stimuliert wird. Die Simulation kann hierbei verschiedenste Umfänge haben. Abschließend benötigt jeder Prüfstand eine Parametervorgabe, die sowohl statisch als auch dynamisch erfolgen kann und rein aus simulierten als auch realen Daten wie auch einer Mischform aus beiden bestehen kann (vgl. Abbildung 2.1). Diese Einteilungen erfüllen jedoch nicht die Anforderungen, die moderne Fahrzeugsysteme stellen. Wie bereits in der Motivation (Kapitel 1.2) angeführt, müssen die vier Elemente Fahrer, Umwelt, Fahrzeug und elektronisches Fahrzeugsystem (Testobjekt) berücksichtigt werden. Durch das Zusammenspiel dieser vier genannten Elemente muss die, im regelungstechnischen Sinn als Eingangsgröße bezeichnete, Fahraufgabe bewältigt werden.

<sup>1</sup>„Bei Whitebox-Verfahren wird von einer inneren Sicht auf das Testobjekt ausgegangen. Der vorliegende Programmtext des Testobjekts dient als Grundlage zur Testfallgenerierung.“ Niedermayr (2005)

<sup>2</sup>„Der Blackbox-Test betrachtet den Testumfang als ein Objekt, von dem nur die Schnittstellen nach außen hin und das definierte Verhalten bekannt sind.“ Reif (2009)

## 2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

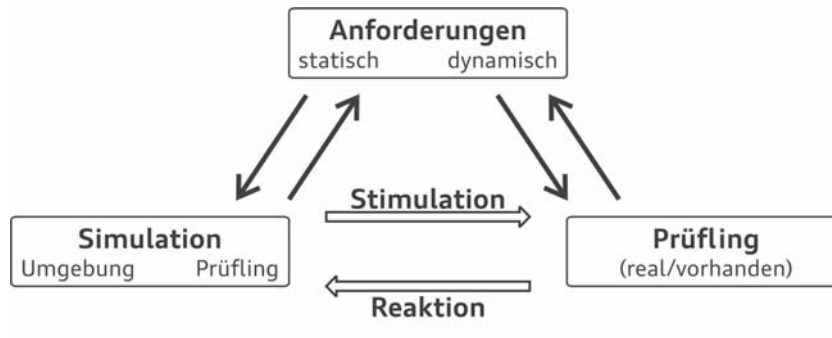


Abbildung 2.1: Erprobungsumgebung für FAS nach Schenk (2007)

Aus diesem Grund wird die bereits in Abbildung 1.2 eingeführte und in Abbildung 2.2 noch einmal erweiterte Struktur des Mensch-Maschine-Systems (MMS) zur systematischen Vorstellung der Konzepte verwendet. Die Ausprägung der vier Elemente

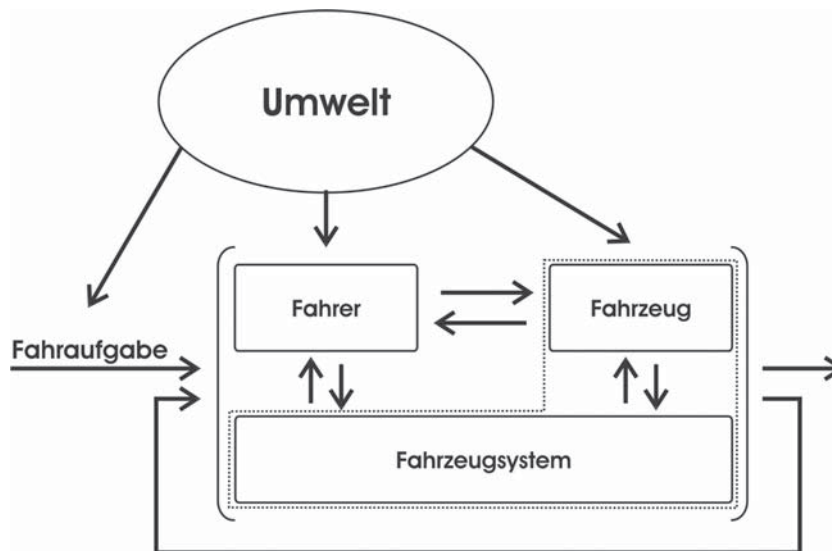


Abbildung 2.2: Struktur des Mensch-Maschine-Systems in Anlehnung an Bubb und Schmidtke (1993)

Fahrer, Umwelt, Fahrzeug und elektronisches Fahrzeugsystem kann jedoch stark variieren. Deshalb werden diese zunächst allgemein vorgestellt, bevor die Werkzeuge konkret und mithilfe einer farblichen Kodierung (grau  $\Rightarrow$  *simuliert*; schwarz  $\Rightarrow$  *real*) erläutert werden. Zusätzlich wird kurz die Fahraufgabe diskutiert, da sie einen erheblichen Einfluss auf die in dieser Arbeit betrachteten elektronischen Fahrzeugsysteme hat.

## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

**Fahraufgabe** Nach Geisler (1985; aus Lange, 2008) kann die Fahraufgabe in die folgenden drei Kategorien unterteilt werden:

- Primäre Fahraufgabe
- Sekundäre Fahraufgabe
- Tertiäre Fahraufgabe

Die primäre Fahraufgabe ist, mit den gegebenen technischen Mitteln, von einem Ausgangspunkt zu einem Zielpunkt zu gelangen. Damit verbundene Aufgaben werden in die Kategorie der sekundären Fahraufgaben eingeteilt. Dies können beispielsweise das Kommunizieren mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Überwachungstätigkeiten technischer Systeme sein. Aufgaben wie das Bedienen des Radios, der Klimaanlage oder das allgemeine Gespräch mit den Fahrzeuginsassen, also Aufgaben, die nichts mit der eigentlichen Fahraufgabe zu tun haben, werden als tertiäre Fahraufgaben bezeichnet. Ein Ansatz, der sich bei der Beschreibung der primären Fahraufgabe durchgesetzt hat, ist die Einteilung nach dem 3-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges (z. B. Donges (2008); siehe Abbildung 2.3).

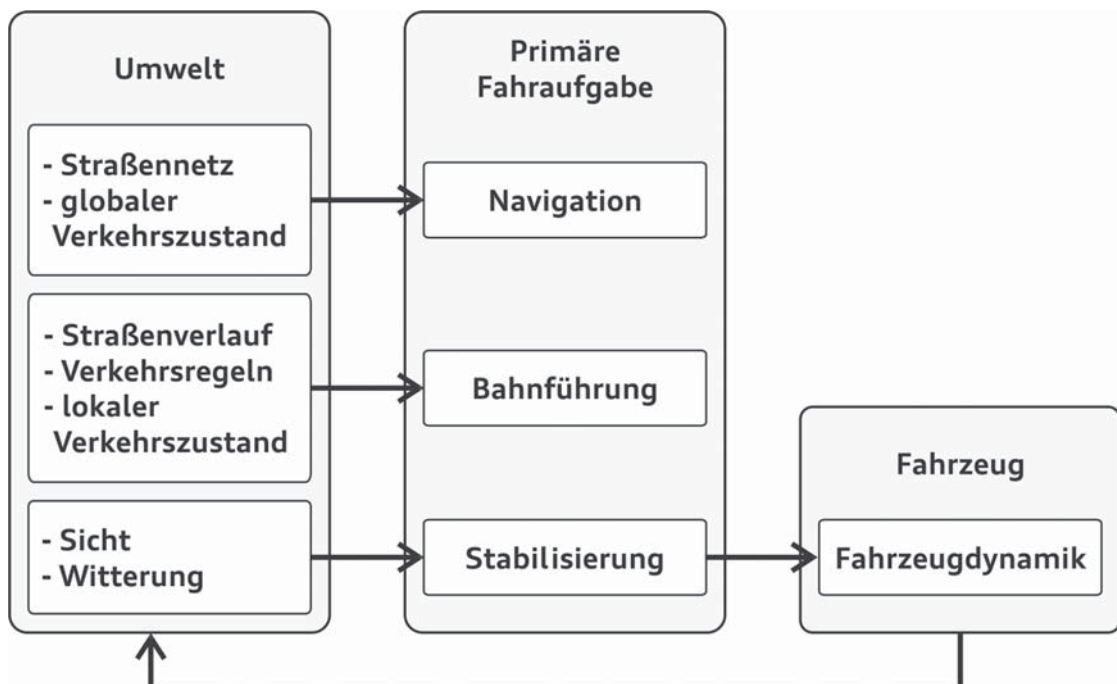


Abbildung 2.3: 3-Ebenen-Modell nach Donges

## 2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

In der höchsten Regulationsebene, der sogenannten Navigationsebene, wird die Entscheidung über die Fahrtroute getroffen. Hierbei handelt es sich um die eigentliche Transportaufgabe, wobei auf dem Weg vom Ausgangspunkt bis zum Ziel einige Einschränkungen, wie beispielsweise die Wahl der Straße (Landstraße, Autobahn, landschaftlich reizvolle Strecke), als Randbedingungen integriert werden können.

Eine Ebene tiefer, in der Bahnführungsebene, sind die Fahraufgaben zu finden, die in Teilaufgaben wie Spurhaltung, Folgefahren, Überholen und Einhaltung der Verkehrsregeln aufgeteilt sind. Auch die Umsetzung der in der Navigationsebene festgelegten Aufgaben, wie das Abfahren an bestimmten Autobahnausfahrten, ist Teil dieser Ebene, wobei die Interaktion mit den anderen Verkehrsteilnehmern mit dem Ziel, Kollisionen oder Gefahren zu vermeiden, die Hauptaufgabe darstellt.

Die unterste Stufe wird als Stabilisierung- oder Handlungsebene bezeichnet. Hierbei müssen für die Quer- und Längsführung des Fahrzeugs geeignete Stellgrößen für Lenkbewegung, Gaspedal und Bremse bestimmt werden. Es müssen so nicht nur mehrere Aufgaben parallel, sondern auch noch Störgrößen, wie z. B. Eis oder starker Seitenwind bewältigt werden.

**Fahrer** Das Element *Fahrer* existiert in zwei Ausprägungen: der reale Fahrer (Entwickler oder Proband), oder ein simulierter Fahrer in Form eines Fahrermodells.

Aus Sicht der Fahrzeugsystem-Entwicklung muss der *Fahrer* entweder ein definiertes Verhalten wie z. B. ein Fahrmanöver oder eine Bedientätigkeit ausführen oder das System eher „alltagsmäßig verwenden“. Nach Bubb (2008) führen die individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten und das Fahrverhalten des *Fahrers* zu unterschiedlichen Fahrkonsequenzen. Heißing (2008) stellt an den *Fahrer* die Anforderungen realitätsnahe Wahrnehmung, realitätsnahe Eingriffsmöglichkeiten und stochastisches Verhalten. Für den realen Fahrer stellen all diese Anforderungen naturgemäß keine Herausforderungen dar, bei der Verwendung eines Fahrermodells muss jedoch das menschliche Verhalten abgebildet werden, wobei je nach Aufgabe der Detaillierungsgrad stark variieren kann. Das Fahrermodell des Verkehrsflusssimulationsprogramms PELOPS (**P**rogramm zur **E**ntwicklung **l**ängsdynamischer, **m**ikroskopischer **P**rozesse in **s**ystemrelevanter **U**mgang; (vgl. Benmimoun, 2006)) besteht nach Hochstädter u. a. (2000) zur Realisierung der Anforderungen aus einem Entscheidungs- und einem Handlungsteil. Im psychophysischen Entscheidungsteil wird auf Basis der Verkehrs- und der Fahrsituation (Folgemodell oder Spurwechselmodell) die Fahrstrategie bestimmt. Der Handlungsteil setzt diese Fahrstrategie dann in fahrzeugseitige Stellgrößen der Bedienelemente um.

Der veDYNA Driver erfüllt die Anforderungen zum einen durch die Möglichkeit der parameterabhängigen Fahrertypisierung eines synthetischen Fahrermodells und zum an-

## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

deren durch die Verwendung eines regelungstechnischen Fahrermodells für eine robuste Bahnfolgeregelung (vgl. TESIS, 2008).

Ein weiteres Fahrermodell ist der IPGDriver als Teil des Simulationsprogramms Car-Maker (vgl. IPG, 2010). Laut Schick (2008) ist auch dieses Fahrermodell voll parametrisierbar, wobei auch ein eventgetriggertes Verhalten ermöglicht wird.

Eine weitere sehr aufwendige und kaum verbreitete Ausprägung ist, wie bei Grünweg (2006) oder Schick u. a. (2007) beschrieben, die Verwendung von Lenk- und Bremsrobotern. Dies ermöglicht es, Fahrmanöver reproduzierbar durchzuführen, ein realer Fahrer muss aber zur Steuerung und Überwachung der Systeme vorhanden sein.

**Umwelt** Nach Käßler und Bernotat (1985; aus Schneider, 2010) steht der Begriff *Umwelt* in diesem Zusammenhang für alles, was auf die restlichen Elemente aber auch auf die Fahraufgabe einwirken kann. Die *Umwelt* bzw. der Verkehrsraum lässt sich dabei in die folgenden drei Klassen einteilen:

- Natürliche Umwelt
- Gestaltete Umwelt
- Soziale Umwelt

Elemente, wie der ursprüngliche Verlauf der Landschaft, die Temperatur, die Lichtverhältnisse oder die Witterung gehören hierbei zur natürlichen Umwelt. Greift der Mensch in die Umwelt ein und erzeugt er künstliche Elemente, wie das Verkehrsnetz, gehören diese zur gestalteten Umwelt. Sämtliche Verkehrsteilnehmer zählen hingegen zur Klasse der sozialen Umwelt.

Die *Umwelt* kann rein real, rein simuliert oder eine Kombination aus beidem sein. Außerdem können Teile der *Umwelt* künstlich erzeugt werden.

Beispiele für die letztgenannte Ausprägung sind der Dynamic Chassis Simulator (DCS) (vgl. TÜV, 2008) zur Entwicklung und Optimierung von Achsen durch reproduzierbare Testreihen. Außerdem existieren Prüfstände, die Umwelteinflüsse wie Sonneneinstrahlung, Nässe und definierte Temperaturprofile erzeugen können.

Der öffentliche Straßenverkehr, aber auch abgesperrte Teststrecken gelten als reale *Umwelt*. Da in der Entwicklung beispielsweise zu jedem Zeitpunkt eine Strecke mit definiertem Reibwert vorhanden sein muss, werden diese Eigenschaften der gestalteten Umwelt über spezielle Bodenbeläge beeinflusst (vgl. fka, 2005). Sollen Fahrzeugsysteme abgetestet werden, die auf Objekte oder Verkehrsteilnehmer reagieren, müssen diese teilweise aufgrund von Gefährdungspotential ersetzt werden. Hierbei gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen, die beispielsweise bei Fecher u. a. (2008) oder Bock (2005) zusammengefasst werden. Ein besonders aufwendiges Konzept ist das

## 2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

bei Hoffmann und Winner (2008) vorgestellte Versuchswerkzeug EVITA (**Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach**).

Eine rein simulierte *Umwelt*, auch Virtual Reality genannt, kann in ihrer Ausprägung, abhängig vom Testziel, sehr stark variieren. Für einige Tests kann es ausreichend sein, ein anderes Element mit nur einem einzigen Eingangssignal einer Umweltklasse, wie z. B. der Temperatur, zu stimulieren und dessen Reaktion zu erfassen. Wird jedoch ein umfangreicheres Modell der natürlichen, gestalteten und sozialen Umwelt benötigt, erfordert dies ein großes Expertenwissen und relativ hohe Rechenleistung. Die Simulation der Verkehrsteilnehmer kann über verschiedene Verhaltensmodelle umgesetzt werden. Daneben existiert auch die Möglichkeit den Fremdverkehr durch ein deterministisches, frei bestimmbares Verhalten zu steuern. Auch die Art und Güte der Sichtsimulation kann laut Bock (2008) sehr stark variieren und ist abhängig vom eingesetzten Test- und Simulationswerkzeug. Moderne Umweltmodelle erlauben eine detaillierte Modellierung wie auch Darstellung sowohl des Straßenverlaufs (horizontale und vertikale Krümmung) als auch der Anzahl und Breite der Fahrspuren. Außerdem können viele weitere Bestandteile wie Bauwerke, Verkehrszeichen oder Lichtanlagen integriert werden. Sogar Umweltbedingungen und die sich daraus ergebenden Auswirkungen wie eingeschränkte Sicht oder veränderte Reibwerte der Straße können definiert werden.

Abbildung 2.4 stellt das Funktionsprinzip der Augmented Reality dar. Bei der Aug-



Abbildung 2.4: Funktionsprinzip und möglicher Aufbau der Augmented Reality Technik nach Bock (2008)

mented Reality handelt es sich nach Milgram (1994; aus Bock u. a., 2008) um eine Mischform in dem Kontinuum zwischen vollständig realer und vollständig simulierter *Umwelt*. Die reale *Umwelt* wird also um virtuelle Objekte erweitert, die direkt in geeigneter Weise in den Verkehrsraum projiziert werden.



## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

**Fahrzeug** Das *Fahrzeug* ist eines der komplexesten und teuersten Konsumgüter in der heutigen modernen Gesellschaft. Laut Schäppi u. a. (2005) besteht es aus ca. 50.000 Teilen, wobei bis 2015 ein Anteil von mindestens 30% des gesamten Fahrzeugwertes auf elektronische Komponenten entfallen wird (vgl. Mercer, 2006). Aktuelle Fahrzeuge des Premiumsegmentes können über 90 Steuergeräte besitzen, die teilweise miteinander vernetzt sind. Je nach Anforderung bezüglich Datenrate und Übertragungssicherheit kommen hierbei verschiedene Bussysteme wie CAN, LIN, MOST und FlexRay zum Einsatz. Die Ausprägung des Elements *Fahrzeug* variiert bei den Test- und Simulationswerkzeugen sehr stark. So kann das gesamte *Fahrzeug* real, simuliert oder eine Kombination aus beidem sein.

Serienfahrzeuge oder modifizierte Fahrzeuge (Versuchsträger, Technikträger, ...) stellen dabei die erste Form dar.

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei einem simulierten *Fahrzeug* um ein Fahrzeugmodell. Ähnlich wie beim *Fahrer* hängt auch hier die Modellkomplexität und damit der Simulationsaufwand wieder stark vom Testziel ab. Ein Fahrzeugmodell kann sehr componentenfein implementiert werden und so beispielsweise jegliche Sensorik oder Aktorik als Submodelle enthalten. Für das Testziel kann es jedoch ausreichen bzw. sogar zielführender sein, ein einfaches Einspurmodell zu verwenden. Je nach Realitätsnähe sprechen Benmimoun (2006) dann hier von „Realfahrzeugen“ oder „synthetischen Fahrzeugen“. Laut Gühmann (2002) muss das implementierte Modell das dynamische Verhalten des modellierten Fahrzeugs unter Berücksichtigung aller Steuergrößen abbilden, dennoch sollten besonders vor dem Hintergrund der Echtzeitfähigkeit<sup>3</sup> die mathematischen Beschreibungen so einfach wie möglich gehalten werden. Im Folgenden wird beispielhaft das Fahrzeugmodell veDYNA vorgestellt, wobei hier wiederum eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle wie PELOPS, VeLoDyn oder CarMaker auf dem Markt sind (vgl. Benmimoun, 2006; Lindemann und Gühmann, 2003; IPG, 2010).

Bei dem von TESIS DYNAware entwickelten Fahrzeugmodell veDYNA handelt es sich um ein nichtlineares, parametrisierbares Fahrzeugmodell, welches aus den Komponenten Chassis, Achsen, Lenkung jeder Achse, Bremsen, Antriebsstrang, Motor, Getriebe und Reifen besteht. Durch dieses Baukastenprinzip lassen sich einzelne Komponenten einfach durch benutzerspezifische Elemente ersetzen (vgl. TESIS, 2006; Bär, 2008).

Das **Chassis** ist als **Mehrkörpersystem (MKS)** modelliert, welches aus den Unterkomponenten Karosserie, Radkörper und einer an der Karosserie montierten variablen Mas-

<sup>3</sup>„Unter der Echtzeitfähigkeit eines Betriebssystems versteht man in erster Linie dessen reale Fähigkeit, in einer gegebenen Betriebsumgebung alle anstehenden Aufgaben und Funktionen unter allen Betriebszuständen immer rechtzeitig und ohne Ausnahme erledigen zu können. ‚Rechtzeitig‘ oder ‚in Echtzeit‘ versteht sich somit nicht als exakte wissenschaftliche Definition, sondern als sehr variable Größe, die sich nach den jeweiligen (Echtzeit-) Anforderungen der spezifischen Anwendungen und deren zeitlichen Rahmenbedingungen orientiert und ausrichtet.“ Scholz (2005)

## 2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

se besteht. So können beispielsweise der Benzinverbrauch oder die Anzahl der Insassen simuliert werden. Auch die Aufhängung kann durch nichtlineare Kennlinien oder Mehrkörpersysteme beschrieben werden. Das Verhalten von Feder, Dämpfer, Feder- und Ausfederungsweg sowie der elastischen Nachgiebigkeit wird durch Kennlinien in Tabellenform beschrieben. Die Anzahl der Freiheitsgrade kann zwischen 11 und bis zu 70 variieren.

Bei den **Achsen** existieren für fast alle verwendeten Achsentypen detaillierte Modelle mit bis zu 30 Freiheitsgraden. Alternativ können die Achsenkinematik und die elastische Nachgiebigkeit abhängig von Radhub und Lenkeingang über Tabellen ermittelt werden.

Die **Lenkung** kann entweder rein kinematisch beschrieben werden oder es können vorhandene Modelle für Zahnstangen-, Spurstangen- oder Kugelumlauf Lenkung verwendet werden. Es können sowohl beide Achsen als auch alle Reifen unabhängig voneinander gelenkt werden.

Der **Antriebsstrang** beinhaltet sowohl Modelle für die mechanischen Teile wie Motor, Zweimassenschwungrad oder Differenziale, aber auch für notwendige Steuergeräte.

Das Drehmoment des **Motors** wird in Abhängigkeit von einer Drehmoment-Tabelle, einem Verzögerungsglied erster Ordnung und einer Schnittstelle für den Drehmomentaufbau und -abbau ermittelt. Alternativ kann ein idealer Geschwindigkeitsregler eingesetzt werden.

Es kann ein manuelles bzw. automatisiertes **Getriebe** mit unterschiedlichsten Gangabstufungen verwendet werden.

Als **Reifenmodell** stehen das semi-empirische Reifenmodell TM-Easy oder das Reifenmodell Pacejka 5.2 zur Verfügung. Außerdem existieren Schnittstellen, um andere externe Modelle anbinden zu können.

Dieser kurze Überblick über ein Fahrzeugmodell zeigt, wie aufwendig die Modellierung ist und wie viel Know-how und Simulationsaufwand hierfür notwendig sind.

Die Kombination der oben beschriebenen zwei Fahrzeugformen ist die dritte Variante. Je nach Prüfaufbau und Aufgabenstellung existieren sehr viele Ausprägungen, bei denen verschiedenste reale Komponenten mit simulierten Komponenten vernetzt werden.

**Fahrzeugsystem** Das *Fahrzeugsystem* ist das eigentlich zu testende Objekt (Testobjekt), wobei es sich in der Entwicklung entweder um eine Komponente (**Device under Test**; DUT) oder um ein System aus mehreren Komponenten (**System under Test**; SUT) handelt. Das *Fahrzeugsystem* kann auf verschiedene Aspekte hin untersucht werden, wie seine Funktionalität oder sein Verhalten im Fehlerfall. Außerdem wird, wie in der

## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

Einleitung dieses Abschnittes bereits erwähnt, zwischen Blackbox- und Whitebox-Tests unterschieden. Da in der hier vorliegenden Arbeit nur mechatronische *Fahrzeugsysteme* berücksichtigt werden, beschränkt sich die Betrachtung für die gesamte Arbeit auf Steuergeräte. Nach Scholz (2005) ist ein „[...] Steuergerät (engl. **E**lectronic **C**ontrol **U**nit, kurz ECU) [...] die physikalische Umsetzung eines eingebetteten Systems. Es stellt damit die Kontrolleinheit eines mechatronischen Systems dar. In mechatronischen Systemen bilden Steuergerät und z. B. die Sensorik oft eine Einheit [auch **S**ensor **C**ontrol **U**nit (SCU) genannt].“ Das *Fahrzeugsystem* kann wieder real oder simuliert vorhanden sein. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Rapid Prototyping Steuergeräten. Abbildung 2.5 zeigt eine mögliche Steuergerätearchitektur, wie sie in einem Oberklassefahrzeug vorkommen kann (vgl. Wältermann u. a., 2004). Wie weiter oben bereits erwähnt, können moderne Fahrzeuge bis zu 90 solcher Steuergeräte besitzen, die über verschiedene Bussysteme wie CAN, LIN, MOST und FlexRay untereinander vernetzt sind.

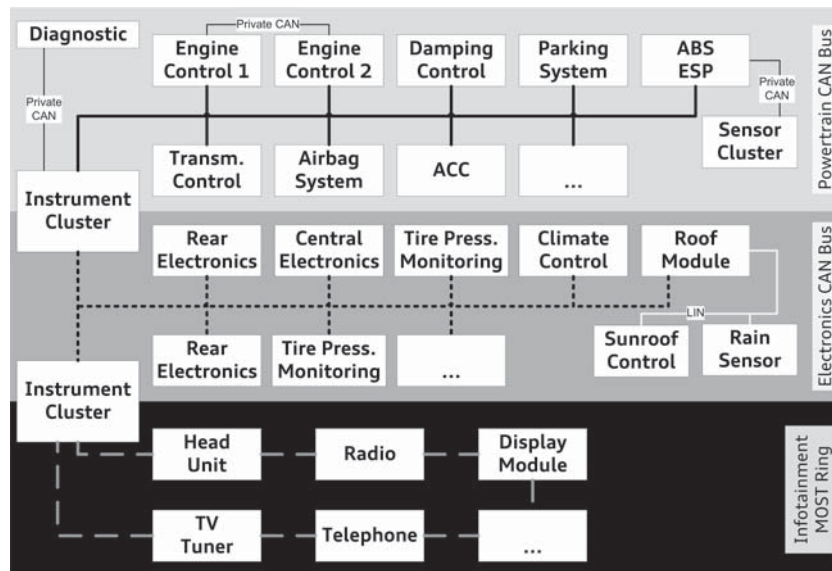


Abbildung 2.5: Steuergerätearchitektur eines Oberklassefahrzeugs

Die Bedeutung „simuliert“ ist beim Element *Fahrzeugsystem* nicht äquivalent zu der Bedeutung bei den vorangegangenen Elementen. Vielmehr ist darunter die Software des eingebetteten Systems bzw. der Quellcode zu verstehen, der nicht auf einer speziellen Hardware integriert, sondern auf einem handelsüblichen PC ausgeführt wird.

Beim Rapid Prototyping wird der zu testende Code auf leistungsfähigen Echtzeitsystemen implementiert, welche durch spezielle I/O mit einer Regelstrecke gekoppelt werden. Eine wesentliche Eigenschaft der Rapid Prototyping Hardware sind kaum vor-

## 2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

handene Ressourcenbeschränkungen in Bezug auf Rechenleistung, verfügbaren Speicher oder Bandbreite der I/O. Beispiele sind die Systeme AutoBox und MicroAutoBox von dSPACE (vgl. dSpace, 2010a,b). Otterbach und Schütte (2004) unterscheiden beim Rapid Prototyping die Varianten Fullpass- und Bypass-Anwendungen. Beim Fullpass-Prototyping ersetzt die Echtzeithardware das Steuergerät vollständig, während beim Bypass-Prototyping nur Teile des Codes ausgelagert und die restlichen Funktionen auf dem Originalsteuergerät zur Ausführung gebracht werden. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit ist die bei Spitzer (2001) beschriebene Aufteilung in konzept-, architektur- und realisierungsorientiertes Rapid Prototyping. Das konzeptorientierte Rapid Prototyping ist von der Realisierung des späteren Systems völlig unabhängig und dient der prinzipiellen Untersuchung eines neu entworfenen Systems vor der Weiterentwicklung. Vor der Erstellung des architekturorientierten Prototypen ist die Zielarchitektur des Systems festzulegen und der Prototyp ist in entsprechende Funktionseinheiten wie Spannungsversorgung und Signalverarbeitung zu unterteilen. Ziel ist es, Aussagen über die Realisierbarkeit der Architektur und die spätere Geschwindigkeit treffen zu können. Realisierungsorientierte Prototypen sind fertig entwickelt sowie hochspezialisiert und enthalten neben einem automatisch generierten Code auch handgeschriebene Programmzeilen. Damit eignen sie sich besonders gut für exakte Leistungstests.

Im Folgenden werden nun die Test- und Simulationswerkzeuge Software in the Loop (SIL), Hardware in the Loop (HIL), Vehicle in the Loop (VIL), Driver in the Loop (DIL) und Erprobungsfahrzeuge im Realtest anhand des gerade erarbeiteten Konzeptes vorgestellt. Bei der Vorstellung der Werkzeuge hängt die Reihenfolge von dem Anteil realer Komponenten ab, wobei dieser immer größer wird. Zu Beginn eines jeden Abschnitts wird dabei die jeweilige Ausprägung anhand des Mensch-Maschine-Systems (vgl. Abbildung 2.2) dargestellt, wobei schwarze Blöcke reale Komponenten, graue Blöcke simulierte Komponenten und schwarz-graue Blöcke den gleichzeitigen Einsatz realer sowie simulierter Komponenten wiedergeben. Um die Beschreibung verständlich zu halten, ist folgende Einschränkung zu beachten: Es wird jeweils nur ein Fahrzeugsystem (Funktion oder Steuergerät) und kein Verbund mehrerer Fahrzeugsysteme betrachtet. Danach werden allgemeine Charakteristika der jeweiligen Werkzeuge in Bezug auf den Aufbau beschrieben. Der Einsatzzeitpunkt des jeweiligen Werkzeugs wird später in Kapitel 2.2 erläutert. Eine allgemeine Übersicht über die Werkzeuge sowie deren Eigenschaften ist im Anhang A zu finden.

### 2.1.1 Software in the Loop

Der funktionale Aufbau eines Software in the Loop-Prüfaufbaus (SIL) wird in der nachstehenden Abbildung 2.6<sup>4</sup> wiedergegeben. Bei einem Software in the Loop-Prüfauf-

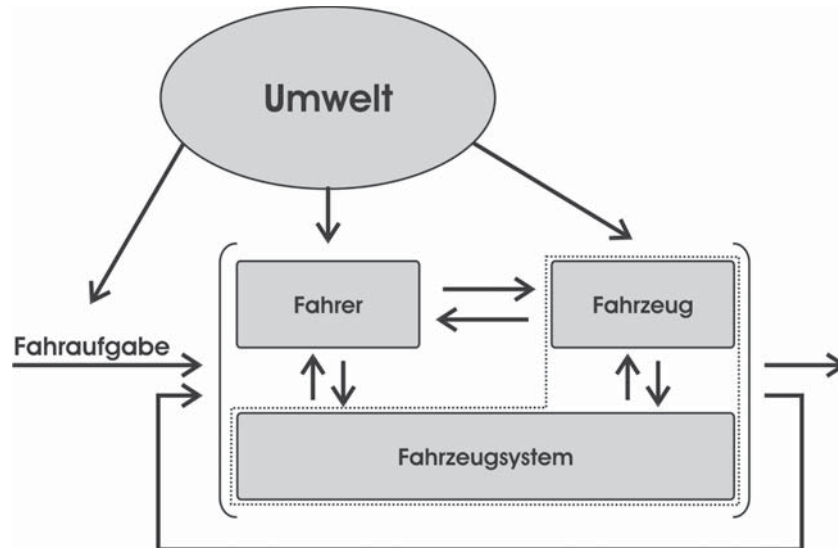


Abbildung 2.6: Funktionaler Aufbau eines Software in the Loop-Prüfaufbaus

bau wird das simulierte *Fahrzeugsystem* auf einem Entwicklungsrechner ausgeführt. Die Ausführung des Codes erfolgt in speziellen Entwicklungsumgebungen wie z. B. ADTF (vgl. Voigtländer, 2008) oder MATLAB/Simulink. Da der gesamte Testprozess im Rechner abgearbeitet wird, müssen auch alle benötigten Module der *Umwelt*, des *Fahrers* und des *Fahrzeugs* in Form von Modellen vorhanden sein. Je nachdem, welches Testziel verfolgt wird, sind so die Umwelt-, Fahrer- und Fahrzeugsimulation mehr oder weniger aufwendig zu gestalten. Für einfache Tests kann es ausreichen, eine Funktion mit nur einem Eingangssignal zu stimulieren und die Reaktion zu erfassen. Wird jedoch ein realitätsnaher Test verlangt, ist dies mit der Erzeugung und Einbindung von sehr vielen und aufwendigen Modellen verbunden. Dies erfordert großes Expertenwissen bei der Erstellung von Software in the Loop-Prüfaufbauten. Die Schnittstellen sind beim Software in the Loop-Prüfaufbau relativ einfach, da der gesamte Testprozess im Rechner abläuft und so alle auszutauschenden Informationen bereits in einheitlicher Form vorliegen.

Da hier keine Forderung nach Echtzeit besteht, kann ein Test zu jedem Zeitpunkt gestoppt und wieder gestartet werden. So ist es auch möglich, aufwendige Testreihen mit

<sup>4</sup>farbliche Kodierung: grau ⇒ *simuliert*; schwarz ⇒ *real*

## 2.1 Test- und Simulationswerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

geringem Testaufwand durchzuführen. Durch die Ausführung im künstlichen Zeitrahmen kann beispielsweise nach jeder Verzweigung im Testablaufbaum ein konsistenter Zustand eingenommen werden und anschließend können die Zweige einzeln durchlaufen werden. Obwohl die Funktionsreife im Vergleich zum Seriensteuergerät oft sehr gering ist, kann so eine hohe Testtiefe erreicht werden. Da noch keinerlei reale Elemente zum Einsatz kommen, kann der SIL bereits in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses eingesetzt werden, wodurch Fehler oder Funktionslücken einfach, schnell und kostengünstig aufgedeckt werden können.

Laut Fey und Stürmer (2007) eignet sich der SIL besonders gut zum Aufspüren von arithmetischen Problemen. Lamberg und Beine (2005) sehen als wichtiges Einsatzgebiet den Code-Überdeckungstest zur Identifizierung noch nicht durchlaufener Programmteile.

### 2.1.2 Hardware in the Loop

Der funktionale Aufbau eines **Hardware in the Loop**-Prüfaufbaus (HIL) wird in der nachstehenden Abbildung 2.7<sup>5</sup> wiedergegeben. Beim Hardware in the Loop Prüfaufbau

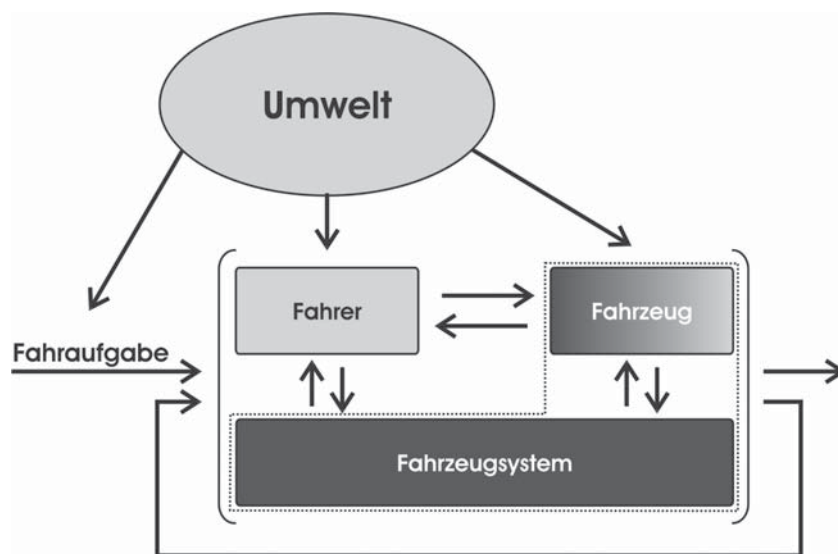


Abbildung 2.7: Funktionaler Aufbau eines Hardware in the Loop-Prüfaufbaus

handelt es sich beim *Fahrzeugsystem* um das reale Steuergerät mit den realen Eingangs- und Ausgangsschnittstellen. Dies bedeutet, dass Interaktionen zwischen simulierten und realen Elementen auftreten. Für die restlichen Elemente *Umwelt*, *Fahrer* und *Fahrzeug*

<sup>5</sup>farbliche Kodierung: grau  $\Rightarrow$  *simuliert*; schwarz  $\Rightarrow$  *real*

## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

bedeutet dies, dass der Modellierungsaufwand im Vergleich zum SIL steigt. Die Elemente müssen so ausgelegt werden, dass sie als realitätsgetreue Nachbildung der Umgebung dienen und alle notwendigen Eingangsgrößen für das *Fahrzeugsystem* in geeigneter Form und in Echtzeit zur Verfügung stellen. Das *Fahrzeug* muss beispielsweise zusätzlich zum eigentlichen Fahrzeugmodell auch die restlichen Steuergeräte, mit denen das *Fahrzeugsystem* vernetzt ist, bzw. zumindest deren Ausgangsgrößen simulieren, damit die Diagnoseroutinen des *Fahrzeugsystems* deren Fehlen nicht erkennen. Hierbei spricht man von Restbussimulation. Das Testziel kann es auch erfordern, dass Teile des *Fahrzeugs*, wie bei Hwang u. a. (2006) die hydraulische Bremsanlage, real verbaut werden.

Die Schnittstellen sind deutlich aufwendiger, da hier, wie gerade erläutert, nicht mehr nur logische, sondern mechatronische Schnittstellen vorkommen können (vgl. Hartmann, 2001).

Bock u. a. (2008) und Eisemann und Beine (2007) geben als Einsatzmöglichkeiten den Komponenten-, Modul- bis hin zum Steuergeräteverbundtest an. Neben Funktionstests werden vor allem das Diagnoseverhalten, das Verhalten im Fehlerfall sowie das Netzwerk- und Kommunikationsverhalten analysiert (vgl. Kochem und Holzmann, 2006).

### 2.1.3 Driver in the Loop

Abbildung 2.8<sup>6</sup> stellt den funktionalen Aufbau eines **Driver in the Loop**-Prüfaufbaus (DIL), auch Fahrsimulator genannt, dar. Driver in the Loop Prüfaufbauten können anhand der Ausprägung ihres Bewegungssystems in drei Kategorien aufgeteilt werden, wobei die Anzahl der Freiheitsgrade zunimmt.

- statisch
- dynamisch ohne Translation
- dynamisch mit Translation

Das *Fahrzeugsystem* kann beim DIL ein reales, simuliertes oder Rapid Prototyping Steuergerät sein. Die simulierte *Umwelt* spielt eine entscheidende Rolle, wobei die Anforderungen mit zunehmender Anzahl an Freiheitsgraden steigt. Da als *Fahrer* eine reale Person eingesetzt wird, muss die *Umwelt* dem Testziel entsprechend exakt modelliert und realitätsgetreu dargestellt werden. Das *Fahrzeug* kann simuliert oder real vorkommen sowie beide Ausprägungen vereinen. Da der *Fahrer* jedoch mit dem *Fahrzeugsystem* und dem *Fahrzeug* interagiert, muss mindestens eine (vereinfachte) Mensch-Maschine-Schnittstelle real vorhanden sein. Abhängig von der eingesetzten Kategorie

<sup>6</sup>farbliche Kodierung: grau  $\Rightarrow$  *simuliert*; schwarz  $\Rightarrow$  *real*

## 2.1 Test- und Simulationwerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

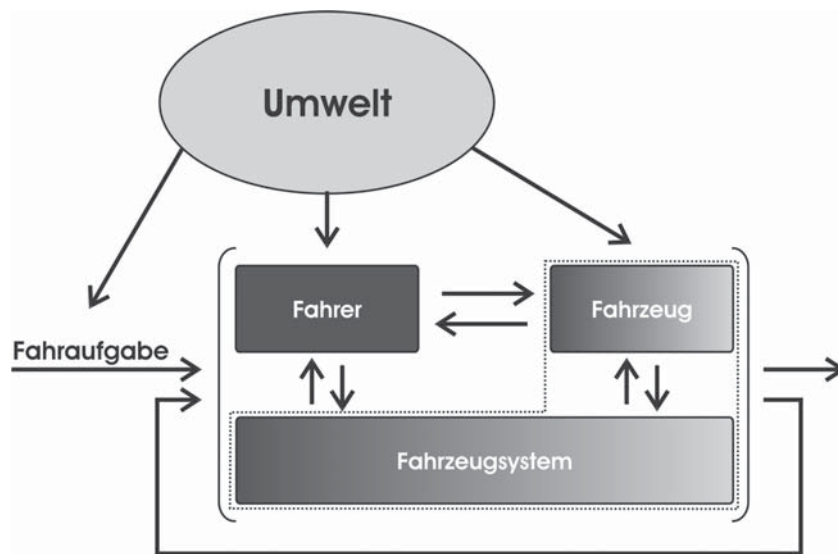


Abbildung 2.8: Funktionaler Aufbau eines Driver in the Loop-Prüfaufbaus

und der Ausprägung des *Fahrzeugsystems* kann es sich beim *Fahrzeug* um ein für Computerspiele entwickeltes Lenkrad und Pedalsystem, ein nachgebildetes Fahrzeugcockpit oder auch ein integriertes Serienfahrzeug handeln. Die Anforderungen an die Schnittstellen und die Restbussimulation hängen ebenfalls vom *Fahrzeugsystem* ab und entsprechen so entweder denen des Software in the Loop-Prüfaufbaus oder des Hardware in the Loop-Prüfaufbaus.

Haupt Einsatzgebiet des DIL ist die Absicherung der Kundenakzeptanz und die Bewertung ergonomischer Maße wie Beanspruchung und Belastung. Im Gegensatz zur SIL- und HIL-Simulation liegt der Fokus nicht auf der technischen Erprobung von Softwarefunktionen oder Steuergeräten, sondern auf der Untersuchung des Fahrerverhaltens, der subjektiven Bewertung des *Fahrzeugsystems* oder neuer Bedienkonzepte durch die Probanden.

### 2.1.4 Vehicle in the Loop

Anders als bei der SIL-, HIL- und DIL-Prüfung zur Entwicklung und Erprobung neuer Fahrzeugsysteme befindet man sich beim **Vehicle in the Loop (VIL)** direkt im Versuchsfahrzeug. Wie Abbildung 2.9<sup>7</sup> zu entnehmen ist, wird lediglich der für die Fahrzeugsysteme relevante Fremdverkehr simuliert. Das *Fahrzeugsystem* ist wie in Kapitel

<sup>7</sup>farbliche Kodierung: grau ⇒ *simuliert*; schwarz ⇒ *real*



## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

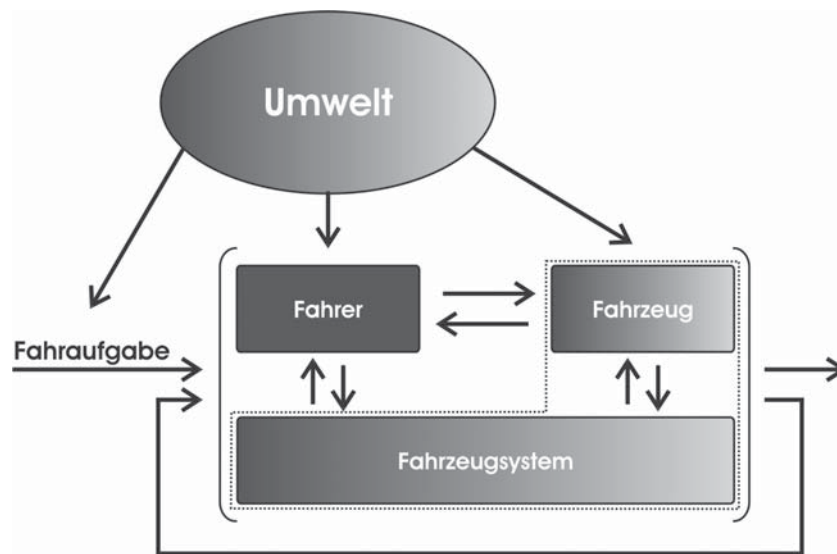


Abbildung 2.9: Funktionaler Aufbau eines Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus

2.1.3 entweder real oder simuliert oder in Form einer Rapid Prototyping Hardware vorhanden. Die Verkehrsteilnehmer wie Fremdverkehr oder Fußgänger müssen simuliert und durch ein „Optical see through Head Mounted Display“ während der Fahrt realitätsnah und kontaktanalog für den Fahrer eingeblendet werden. Alle restlichen Bestandteile der *Umwelt* bleiben durch die Anwendung der Augmented Reality Technologie für den Fahrer voll sichtbar. Abgesehen davon ist auch eine Virtual Reality Lösung möglich. Hierbei wird dann die gesamte *Umwelt* simuliert. Beim *Fahrer* handelt es sich um eine reale Testperson. Das Element *Fahrzeug* kann in unterschiedlichsten Ausprägungen vorhanden sein. Es kann genauso ein Serienfahrzeug wie auch ein Versuchsfahrzeug sein, bei dem noch nicht existierende oder notwendige Systeme simuliert werden. Davon abhängig handelt es sich bei den Schnittstellen um die reale Fahrzeugvernetzung oder um proprietäre Entwicklungsschnittstellen.

Mit der VIL-Simulation hat Bock (2008) ein Test- und Simulationswerkzeug entwickelt, welches die Vorzüge eines realen Versuchsfahrzeugs mit der Sicherheit und Reproduzierbarkeit von Fahrsimulatoren kombiniert. Der Vehicle in the Loop-Prüfaufbau ermöglicht somit eine Funktionserprobung von Systemen direkt in einem Fahrzeug, welches sich allerdings nicht im realen Verkehr, sondern auf Freiflächen oder abgesperrten Straßen, wie z. B. auf einem Prüfgelände, bewegt. Besonders für die Erprobung aktiver Sicherheitssysteme eröffnen sich durch das Konzept des virtuellen Fremdverkehrs bzw. Fußgängers im realen Versuchsfahrzeug neue Möglichkeiten.

### 2.1.5 Realtest

Der funktionale Aufbau eines Realtest-Prüfaufbaus (REAL) ist Abbildung 2.10<sup>8</sup> zu entnehmen. Beim Realtest können in Bezug auf das *Fahrzeugsystem* zwei Untergruppen

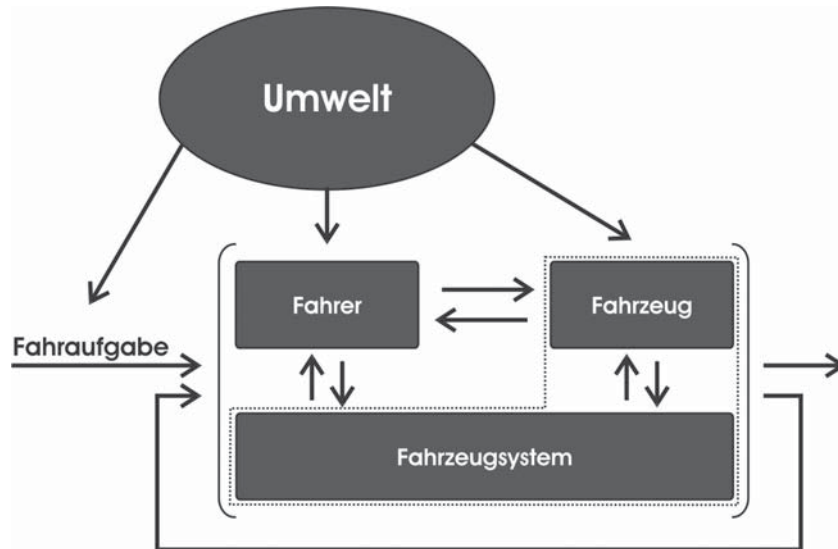


Abbildung 2.10: Funktionaler Aufbau eines Realtest-Prüfaufbaus

unterschieden werden. Dies sind zum einen Onboard Tests, bei denen das Steuergerät verbaut ist, und zum anderen ist es das Rapid Prototyping. Da hier allerdings ein reales Sicherheitsbedürfnis existiert, kann ein Code nur abgetestet werden, falls dieser bereits eine gewisse Reife erlangt hat. Bei Realtests ist keine Simulation der *Umwelt* nötig. So muss hier die Regelung immer auf reale Verkehrsteilnehmer oder auf Ersatzobjekte, wie Schaumstoffwürfel, erfolgen. Der *Fahrer* ist im Allgemeinen real vorhanden. Eine Ausnahme ist die noch wenig verbreitete Verwendung von Lenk- und Bremsrobotern. Das *Fahrzeug* ist beim Realtest real vorhanden, was zur Folge hat, dass es sich bei den Schnittstellen naturgemäß um die echte Vernetzung handelt. Einzig die direkte Verbindung zur Rapid Prototyping Hardware kann davon abweichen.

Die Testmöglichkeiten beim Onboard Fahrversuch sind vielfältig. Es können verschiedene Streckentypen wie Autobahn oder Handlingkurse genutzt werden. Außerdem ist es möglich, dass diverse Witterungsbedingungen analysiert werden. Es sind sowohl Tests mit standardisierten Fahrmanövern als auch Erprobungen des Systems im realen Verkehr möglich. Beim Rapid Prototyping ist das Ziel eine frühzeitige Überprüfung des Reglerkonzepts unter Echtzeit und realitätsnahen Bedingungen.

<sup>8</sup>farbliche Kodierung: grau  $\Rightarrow$  *simuliert*; schwarz  $\Rightarrow$  *real*

## 2.2 Methoden der Fahrzeugsystem-Entwicklung

Nach Reif (2009) wird in der Entwicklung aktueller Fahrzeugsysteme der Fokus zur Beherrschung der Komplexität auf verbesserte Entwicklungsprozesse gelegt. Dazu gehören unter anderem Normen wie die ISO-Vorschriften oder Checklisten wie der Code of Practice (vgl. Schwarz, 2006). Abgesehen davon kommen unterschiedlichste Entwicklungsmodelle zum Einsatz, um den Entwicklungsprozess in sinnvoll strukturierte Phasen aufzuteilen. Schäuffele und Zurawka (2006) nennen hier Capability Maturity Model Integration (CMMI) oder Software-Prozess-Improvement-and-Capability-Determination (SPICE). Die beiden wohl bekanntesten Prozessmodelle sind das Wasserfallmodell sowie das V-Modell. Eine weitere Möglichkeit ist der von Maurer (2010) publizierte systematische Systementwurf mit Schwerpunkt auf Forschung und Vorentwicklung. Im Folgenden werden die drei letztgenannten Modelle näher betrachtet.

In seiner ursprünglichen Form war beim flussorientierten Wasserfallmodell keinerlei Rückkopplung zu vorangegangenen Phasen vorgesehen. Ausgehend von den Anforderungen wird das Problem analysiert, das Design des Systems erstellt und der Code implementiert. Im Anschluss an den Testschritt kommt es zur Inbetriebnahme beim Kunden. Jeder Schritt endet mit einem fertigen „Produkt“. Dieses zu statische Vorgehen konnte aber in Realität nicht eingehalten werden, was zu einer Weiterentwicklung und somit zum iterativen Wasserfallmodell, wie es in Abbildung 2.11 dargestellt ist, führte (vgl. Spitzer, 2001). Sollen jedoch Lücken durch Modifikationen in früheren Phasen ausgebessert werden, müssen die darauf folgenden Phasen erneut durchlaufen werden.

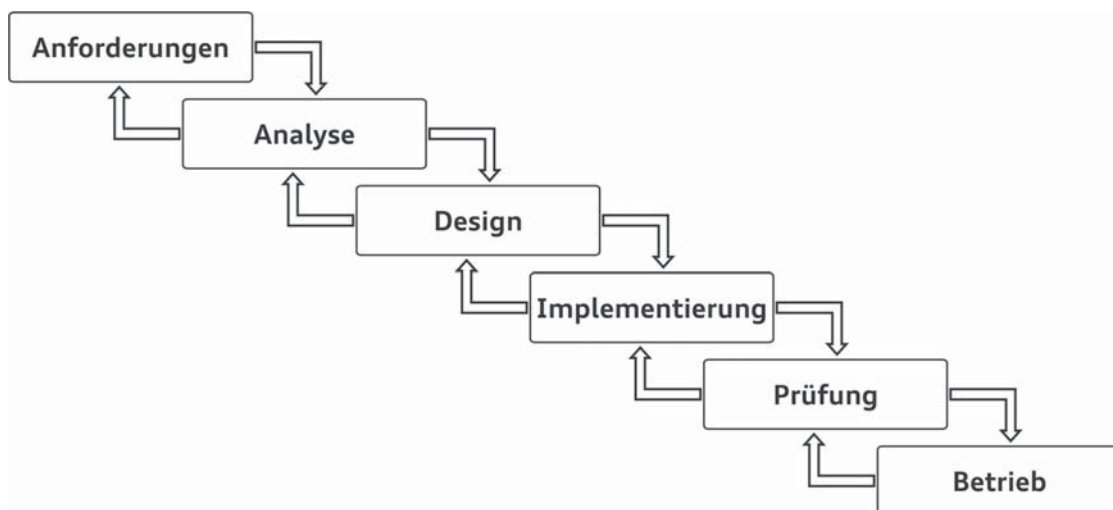


Abbildung 2.11: Wasserfallmodell nach Dr. Winston W. Royce aus Schwaiger (2008)

## 2.2 Methoden der Fahrzeugsystem-Entwicklung

Der Systematische Systementwurf, der in Abbildung 2.12 dargestellt ist, geht dagegen von einem geschlossenen Entwicklungszyklus aus, was einer kompletten Iteration gleichzusetzen ist. Zusätzlich existiert auch die Möglichkeit, bereits nach dem Zwischenergebnis eine Iterationsschleife durchzuführen. Die bis dahin durchlaufenen Prozessschritte sind rein theoretischer Natur, was zwar großes Expertenwissen erfordert, aber auch dazu führt, dass dieser Zyklus mit relativ geringen Kosten in überschaubarer Zeit durchlaufen werden kann. Als Zwischenergebnis gibt Maurer (2009) die Identifi-

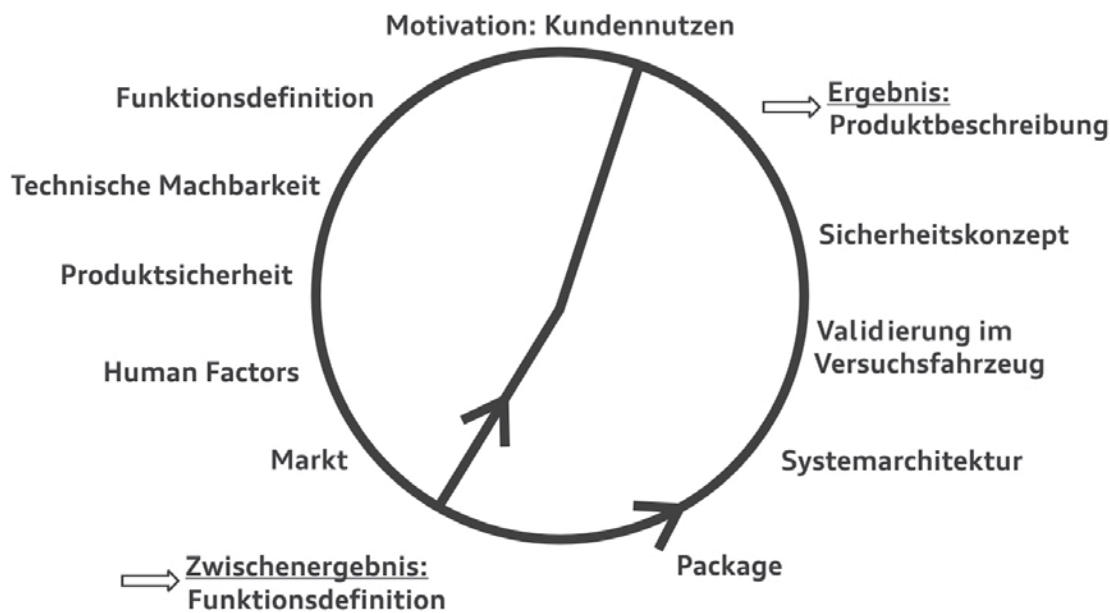


Abbildung 2.12: Systematischer Systementwurf in Forschung und Vorentwicklung

kation der zentralen Auslegungskonflikte und damit die Definition einer realisierbaren Funktion an. Das zentrale Thema sollte hierbei eine sinnvolle, den Fahrer unterstützende Funktionsdefinition sein. Hierfür eignet sich besonders gut die Response-Checkliste (vgl. ACEA, 2009), da hier konkrete Fragestellungen systematisch abgearbeitet werden: Wer sind die Nutzer des Systems? Welche Nutzerbedürfnisse gibt es? Welche Fahraufgabe wird durch das System unterstützt? Diese erste Schleife kann mehrmals theoretisch durchlaufen werden, bis ein zufrieden stellendes Zwischenergebnis gefunden wurde. Darauf aufbauend folgt die prototypische technische Umsetzung. Die notwendigen Bauteile sowie deren Vernetzung müssen in der Fahrzeugkonstruktion berücksichtigt werden. Nach der Definition der Architektur und der Umsetzung des Systems muss es mithilfe geeigneter Testkonzepte unter anderem in Versuchsfahrzeugen validiert werden,

## 2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

bevor die Produktsicherheit analysiert und umgesetzt wird. Am Ende steht eine konkrete Produktbeschreibung in Form eines Lastenheftes. In einem Resümee folgt abschließend der Vergleich des Ergebnisses mit den in der Motivation gesetzten Zielen. Gibt es hier zu große Abweichungen, kann der Prozess erneut durchlaufen werden.

Eine besonders weit verbreitete und plakative Beschreibung ist das in Abbildung 2.13 dargestellte V-Modell, das entsprechend der hierarchischen Unterteilung des Systems Fahrzeug in seine Subsysteme aufgebaut ist (vgl. iABG, 2009). Außerdem lassen sich damit die in Kapitel 2.1 vorgestellten Werkzeuge zu den einzelnen Teilprozessen zuordnen. In der Literatur sind unterschiedliche Ausprägungen in Abhängigkeit der konkreten Anwendung zu finden, die jedoch alle nach dem im Folgenden beschriebenen Prinzip erstellt wurden (vgl. Lamberg, 2003; Holzmann, 2005; Schenk, 2007; Mayer u. a., 2007; Reif, 2009, etc.). Das V-Modell lässt sich in zwei Phasen aufteilen. Der auf

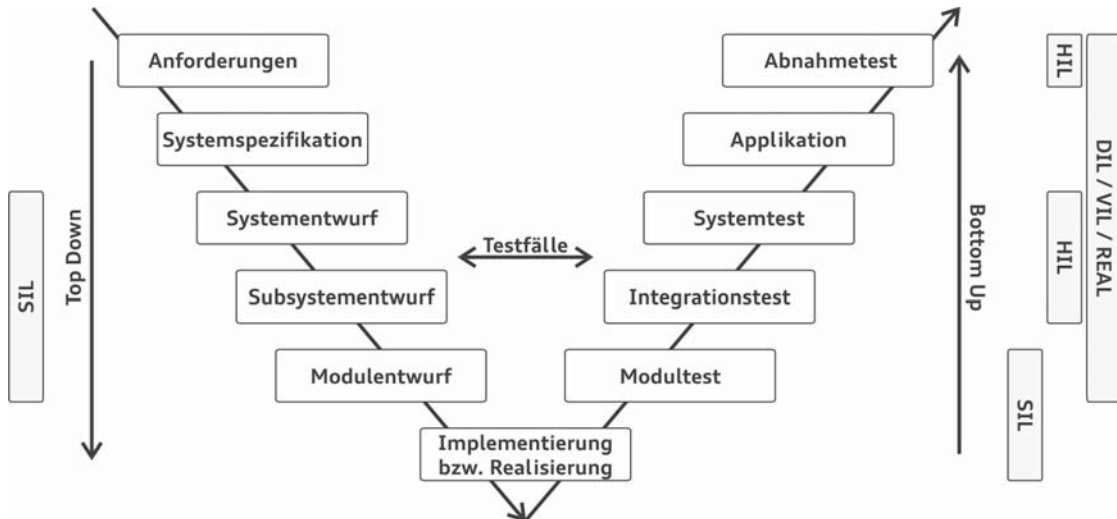


Abbildung 2.13: V-Modell zur Fahrzeugsystementwicklung

der linken Seite dargestellte Top Down-Prozess beginnt mit der Sammlung der Anforderungen und endet nach den dargestellten Zwischenstufen und der Dekomposition des Systems mit der Implementierung bzw. Realisierung der einzelnen Module. Der rechte Ast stellt einen entsprechenden Bottom Up-Prozess dar. Die hier dargestellten Schritte bzw. Testfälle müssen anhand der Prozessschritte definiert werden, die auf gleicher Ebene im linken Ast stehen. Die so ermittelten Ergebnisse können dadurch wieder auf den linken Ast zurückgeführt werden. Am Ende steht die Abnahme des Endproduktes.

# 3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme

## 3.1 Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen

Neben der Entwicklung von Fahrwerk, Antrieb und Karosserie wird seit der Erfindung des Automobils die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) mit umgesetzt. So können der Tachometer oder der elektrische Starter als dem Fahrer assistierende Systeme bezeichnet werden, die in heutigen Fahrzeugen selbstverständlich sind.

Eine Einteilung kann nach Maurer (2010) z. B. nach Bauteilen, Messwerterfassung oder Kundenbedürfnissen erfolgen.

Ein weiteres Klassifizierungsmerkmal ist der Grad der Automatisierung und damit die Art des Eingriffs in die Fahrzeugführung. Hierbei unterscheidet man informierende Systeme (ohne Aktuatorik), partiell eingreifende Systeme (mit Aktuatorik) und autonome Systeme (mit Aktuatorik).

Für diese Arbeit am zielführendsten ist die Klassifizierung der Fahrerassistenzsysteme anhand der in Kapitel 2.1 eingeführten drei Ebenen der primären Fahraufgabe Navigation, Bahnführung und Stabilisierung (vgl. Abbildung 2.3). Grundsätzlich sollen Fahrerassistenzsysteme die Belastung des Fahrers verringern und damit den Komfort und die Sicherheit erhöhen. So unterstützen Fahrerassistenzsysteme den Fahrer in seiner Fahraufgabe dadurch, dass sie Teile dieser übernehmen. Ergebnis dieser Entwicklung ist ein steigender Grad der Automatisierung des Fahrzeugs. Die Verantwortung der Fahrzeugführung und damit die Überwachungsaufgabe bleibt jedoch weiterhin beim Fahrer, bzw. nimmt mit der Anzahl an Systemen sogar zu (vgl. Winner, 2002; Gründl, 2005). Abbildung 3.1 verdeutlicht noch einmal in einer etwas anderen Art und Weise der Darstellung des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umwelt, dass Fahrerassistenzsysteme parallel, redundant zum Fahrer angeordnet sind und so ursprüngliche Tätigkeiten des Fahrers übernehmen.

### 3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme

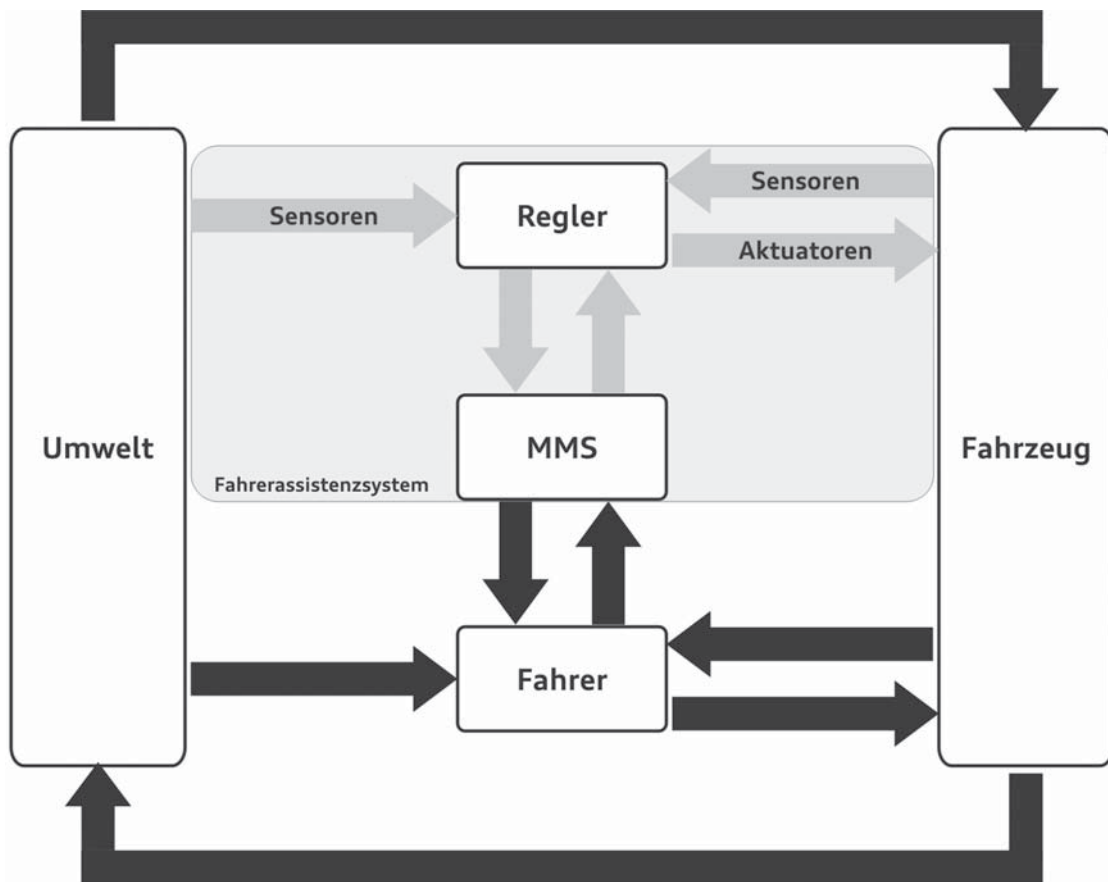


Abbildung 3.1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt mit integriertem Fahrerassistenzsystem nach Deutsche (2005)

Navigationssysteme werden schon seit längerer Zeit angeboten und unterstützen den Fahrer bei der Wahl der Fahrtroute. Fahrerassistenzsysteme, die für die Bahnführung entwickelt wurden, erfordern eine Umfeldwahrnehmung. Systeme wie Adaptive Cruise Control (Geschwindigkeits- und Abstandsregelung), der Spurwechselassistent oder der Spurhalteassistent werden bereits angeboten. Da die Stabilisierungsebene ein großes Gefahrenpotential besitzt, wurden hierfür bereits früh Assistenzsysteme entwickelt. So gehören z. B. das Antiblockiersystem und das Elektronische Stabilitätsprogramm schon fast zur Serienausstattung. Auf Grund der Tatsache, dass sie weder Informationen über andere Verkehrsteilnehmer, ihre Absichten und ihren Zustand benötigen noch etwas über die Situation des Fahrers wissen müssen, funktionieren sie aus Sicht des Nutzers äußerst zuverlässig. Somit müssen die Fahrerassistenzsysteme in zwei Klassen unterteilt werden. Gemeinsam ist allen das Ziel, den Fahrer zu unterstützen, der Unterschied liegt jedoch in der veränderten Anforderung an die Sensorik und Modellierung.

### 3.1 Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über ausgewählte Fahrerassistenzsysteme zugeordnet zu den Ebenen der Fahrzeugführung.

Tabelle 3.1: FAS mit Zuordnung zu den Ebenen der Fahraufgabe

<b>Navigation:</b>	Navigationssystem Radiodienste (RDS-TMC)
<b>Bahnführung:</b>	Adaptive Cruise Control (ACC) Automatische Notbremsung (ANB) Lane Departure Warning (LDW) Lane Keeping Assist (LKA) Lane Change Assist (LCA)
<b>Stabilisierung:</b>	Antiblockiersystem (ABS) Antriebsschlupfregelung (ASR) Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) Cruise Control (CC)



## 3.2 Adaptive Cruise Control als Beispiel eines aktuellen Fahrerassistenzsystems und als Untersuchungsbeispiel

Adaptive Cruise Control (ACC) ist ein automatisch agierendes Fahrerassistenzsystem, welches auf der Bahnführungsebene die längsdynamischen Fahraufgaben in Abhängigkeit von den eingestellten Systemparametern übernimmt.

Befindet sich kein vorausfahrendes Fahrzeug mit geringerer Fahrgeschwindigkeit als das ACC-Fahrzeug in der gleichen Fahrspur, funktioniert ACC wie ein konventioneller Tempomat, auch Geschwindigkeitsregelanlage (GRA) genannt, welcher die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers umsetzt. Werden vorausfahrende Fahrzeuge erkannt, regelt das System durch eigenständiges Beschleunigen und Bremsen einen geschwindigkeitsabhängigen, vom Fahrer eingestellten Abstand ein. Als Einsatzbereich von ACC sind hauptsächlich Autobahnen, aber auch gut ausgebaute Fern- und Landstraßen gedacht. Aktuellste Systemausprägungen, so genannte Full Speed Range Systeme (ACC FSR), decken einen Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 250 km/h ab.

### 3.2.1 Technische Daten

Die Detektion der Vorderfahrzeuge bis zu einer geschwindigkeitsabhängigen Entfernung von ca. 250 m erfolgt mit geeigneten Sensoren. Durch die Erweiterung des ACC zu einem ACC FSR mussten weitere Sensoren, beispielsweise zur Überwachung des Nahbereichs beim automatischen, fahrergetriggerten Anfahren, integriert werden. Bei Limbacher und Färber (2010) werden, wie in Abbildung 3.2 gezeigt, die Informationen der Ultraschallsensoren und der Videokamera verwendet, wohingegen bei Henle u. a. (2009) zusätzlich zwei 24 GHz Nahbereichssensoren (Radar<sup>1</sup>) genutzt werden. Als „Primärsensoren“ kommen bei aktuellen Fahrzeugen Radar- oder Lidar<sup>2</sup>-Sensoren zum Einsatz. Aufgrund der geringen Verbreitung der Lidar-Technologie und der Verwendung von radarbasierten Systemen im Zuge dieser Arbeit (Kapitel 5 und Kapitel 6) wird im Folgenden nur der Long-Range-Radar (LRR) betrachtet. Hierfür werden zunächst die Grundlagen für automotive-taugliche Radarsensoren erläutert.

---

<sup>1</sup>Radio Detection and Ranging

<sup>2</sup>Light Detection and Ranging

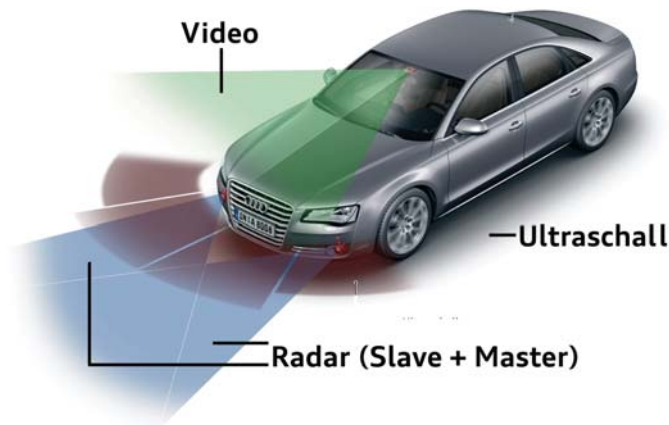


Abbildung 3.2: Umfeldsensoren für ACC im Audi A8

### Radargrundlagen

Die Erfassung relevanter Objekte erfolgt mithilfe von elektromagnetischen Wellen. Skolnik (2007) unterteilt den Messablauf in die folgenden fünf Schritte:

1. Die Antenne oder Anordnung mehrerer Antennen strahlt eine elektromagnetische Welle aus.
2. Ein Objekt, das sich im Erfassungsbereich der Welle befindet, empfängt einen Teil der ausgestrahlten Leistung.
3. Das Objekt reflektiert die empfangene Leistung in viele Richtungen.
4. Ein Teil dieser reflektierten Leistung wird von den Antennen des Radars empfangen  $\implies$  Echo.
5. Die Signalverarbeitung „entscheidet“, ob es sich bei dem Objekt um ein relevantes Objekt, auch als Target(-Fahrzeug) bezeichnet, handelt.

Laut Rohling (2007) sollen dabei folgende Informationen ermittelt werden:

- Entfernung (Laufzeit)
- Relativgeschwindigkeit (Dopplereffekt)
- Winkel (Richtwirkung der Antenne)
- Form und Größe



### 3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme

#### Radargleichungen

Die Radargleichungen beschreiben die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Antenne, der Umgebung und der Objekte (vgl. Skolnik, 2007).

Die Leistungsdichte  $S_{Tisotr}$  einer isotropen Antenne ist abhängig von der gleichmäßig in alle Richtungen ausgestrahlten Leistung  $P_T$  und der Entfernung  $R$ :

$$S_{Tisotr} = \frac{P_T}{4\pi \cdot R^2} \quad (3.1)$$

Da Radarsysteme direktive Antennen verwenden, um die ausgestrahlte Leistung zu fokussieren, ergibt sich die Leistungsdichte  $S_T$  aus dem Produkt des Antennengewinns  $G$  und der Leistungsdichte  $S_{Tisotr}$ :

$$S_T = S_{Tisotr} \cdot G = \frac{P_T}{4\pi \cdot R^2} \cdot G, \quad (3.2)$$

mit

$$G = \frac{\text{Maximale Leistungsdichte einer direktiven Antenne}}{\text{Leistungsdichte einer verlustlosen isotropen Antenne}} \quad (3.3)$$

Abhängig von der Rückstrahlfläche  $\sigma$ , auch Radarquerschnitt (engl.: **R**adar **C**ross **S**ection; RCS) genannt, ergibt sich für das Echo des reflektierenden Objektes die reflektierte Leistung  $P_R$ :

$$P_R = S_T \cdot \sigma = \frac{P_T}{4\pi \cdot R^2} \cdot G \cdot \sigma \quad (3.4)$$

Da auf dem Rückweg die gleichen Zusammenhänge wie auf dem Hinweg gelten, ergibt sich für die Leistungsdichte  $S_R$ :

$$S_R = \frac{P_R}{4\pi \cdot R^2} = \frac{P_T}{(4\pi \cdot R^2)^2} \cdot G \cdot \sigma \quad (3.5)$$

Abhängig von der effektiven Antennenfläche  $A_e$  ergibt sich die Empfangsleistung  $P_E$ :

$$P_E = S_R \cdot A_e = \frac{P_T}{(4\pi \cdot R^2)^2} \cdot G \cdot \sigma \cdot A_e \quad (3.6)$$

Wird ein und dieselbe Antenne als Sender und Empfänger verwendet, gilt:

$$G = \frac{4\pi \cdot A_e}{\lambda^2}, \quad (3.7)$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der elektromagnetischen Wellen bezeichnet.

Aus Gleichung 3.6 und Gleichung 3.7 folgt somit für die gemessene Entfernung  $R$  eines detektierten Objektes die Radargleichung:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_E \cdot (4\pi)^3}} \quad (3.8)$$

Interessiert die theoretisch maximale Reichweite  $R_{max}$ , muss das kleinste noch wahrnehmbare Echosignal  $P_{Emin}$  in die Radargleichung 3.8 eingesetzt werden.

#### 3.2.2 Eingesetzte Hardware

Abbildung 3.3 stellt den Aufbau des FMCW Long Range Radars der dritten Generation von Bosch (LRR3) dar. Hierbei handelt es sich um eine sogenannte Sensor Control Unit (SCU). Diese integriert die Antennenanordnung, die Signalverarbeitung und das Steuergerät in einem einzigen Modul.



Abbildung 3.3: Explosionsdarstellung des LRR3 aus Lucas (2009)

### 3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme

Die Architektur der SCU besteht, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, aus den zwei funktionalen Einheiten Hochfrequenzmodul (links) und Steuergerät (rechts). Ersteres besteht wiederum aus der Antennenanordnung und der Signalverarbeitung (Radar ASIC). Das Steuergerätmodul enthält einen Mikrocontroller, der die Funktion sowie die Schnittstellen zum Fahrzeug (CAN, FlexRay und Versorgung) umsetzt.

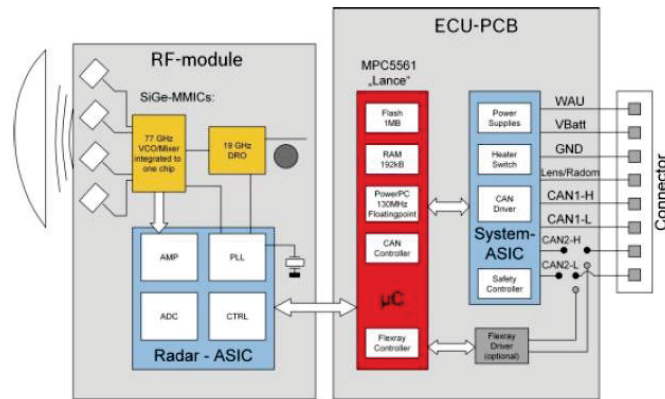


Abbildung 3.4: Blockschaltbild des LRR3 aus Lucas (2009)

#### 3.2.3 Bedienung und Anzeige

Der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug wird in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit über die sogenannte Zeitlücke eingeregelt. Die Zeitlücke  $T_n$  zu einem vorausfahrenden Fahrzeug ist nach Formel 3.9 definiert als Quotient aus dem Abstand  $dx$  und der Istgeschwindigkeit  $v_{ego}$  des eigenen Fahrzeugs.

$$T_n = \frac{dx}{v_{ego}} \quad (3.9)$$

Der Fahrer kann hier zwischen verschiedenen Zeitlücken auswählen, die das ACC-System zur Verfügung stellt.

Die Zeitlücke sowie die Wunschgeschwindigkeit kann der Fahrer über eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) einstellen. Abbildung 3.5 zeigt einen Lenkstockhebel, wie er auch bei den Fahrzeugen der Studien (Kapitel 5) verbaut war. Eine andere Möglichkeit ist die Interaktion über Bedientasten auf der Vorderseite des Lenkrads. Das Kombiinstrument (siehe Abbildung 3.6) visualisiert dem Fahrer jederzeit alle notwendigen ACC-Systeminformationen. So ist auf dem Display zu erkennen, ob das System ein Zielobjekt erkannt hat und den Abstand darauf regelt. ACC hat eine begrenzte Beschleunigungs- und Bremsanforderung. Wünscht der Fahrer eine höhere



Abbildung 3.5: ACC-Lenkstockhebel

Beschleunigung, kann er das System mit dem Gaspedal übertreten. Es bleibt weiterhin aktiv, wechselt aber in den override-mode. Bei einem manuellen Bremsengriff des Fahrers schaltet sich das System ab. Erkennt das System, dass die maximale Bremsverzögerung nicht ausreicht, um den Mindestabstand zum Vorderfahrzeug innerhalb der Systemgrenzen einzuhalten, wird der Fahrer durch akustische und optische Signale zur Übernahme aller Systemfunktionen aufgefordert („Takeoverrequest“). Hier zeigt sich, dass ACC ein Komfortsystem mit warnenden Teilfunktionen jedoch kein Sicherheitssystem ist und der Fahrer für seine Entscheidungen jederzeit selbst verantwortlich ist.

### 3.2.4 Systemgrenzen

Aufgrund des Öffnungswinkels des Radarsensors hat ACC einen eingeschränkten Sichtbereich bei kleinen Kurvenradien und im Nahbereich vor dem Fahrzeug. Einschernerer im Nahbereich werden so mitunter spät erkannt und das System kann innerhalb seiner Dynamikgrenzen die Situation nicht mehr selbst regeln, was eine Übernahmeaufforderung zur Folge hat. Eine Verbesserung hat hierbei das ACC Full Speed Range (FSR) durch die Verwendung der Informationen aus weiteren Sensoren, wie einer Videokamera, gebracht.

Aus Sicherheits- und Komfortgründen reagiert ACC nicht auf stehende Objekte. Zu viele Einflussfaktoren, vor allem neben der Straße, würden Fehldetektionen auslösen.

Das Bremsen bis in den Stillstand ist nur hinter einem ebenfalls bis in den Stillstand verzögerndes Fahrzeug möglich. Eine Reaktion auf Hindernisse, die bereits stehen, wenn der Sensor sie das erste Mal detektiert (z. B. Stauende), findet nicht statt.

### 3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme



Abbildung 3.6: ACC-Kombiinstrument

Darüber hinaus wird ACC auch von Umwelteinflüssen beeinträchtigt. Regen, Gicht oder Schneematsch verringern die Radarwirkung. Zur teilweisen Minderung dieser Witterungseinflüsse wird eine Radomheizung<sup>3</sup> eingesetzt.

---

<sup>3</sup>Radom ist die radartransparente Abdeckung des Radarsensors.

## 3.3 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen in Forschung und Entwicklung

In diesem Kapitel soll eine Übersicht der Studien zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von ACC erarbeitet werden. ACC ist das am weitesten verbreitete und in umfangreichen und internationalen Studien am besten untersuchte Assistenzsystem, weshalb diese Einschränkung keine negativen Auswirkungen auf die später gezogenen Schlüsse und einen somit abgeleiteten Forschungsbedarf hat.

In dieser Arbeit sollen die Ergebnisse der Studien anhand der Elemente *Fahrzeug* (Bedienelemente), Auswirkungen auf die *Umwelt*, *Fahrerverhalten* und *Fahrzeugsystem* analysiert werden. Eine ausführliche Übersicht über die Rahmenbedingungen der zitierten Studien ist im Anhang B zusammengestellt. Hierbei werden für jede genannte Studie Informationen wie die eingesetzte Testmethode, die Spezifikation des ACC-Systems, die Zahl der Probanden und die Testdauer tabellarisch zusammengefasst.

### 3.3.1 Fahrzeug bzw. Bedienelemente

Da der Fahrer ununterbrochen mit dem Assistenzsystem interagiert, ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle für eine sichere Bedienung, aber auch für die Kundenakzeptanz des Systems von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund sind Untersuchungen zur Überprüfung bzw. Analyse dieser Anforderungen in Form von Probandenversuchen unerlässlich. Allgemeine Anforderungen sind beispielsweise bei Ehmanns u. a. (2000) aufgeführt.

Thompson u. a. (2006a) und Thompson u. a. (2006b) untersuchten in einer Fahrstudie die ergonomische Bedienbarkeit von ACC. Über Fahrerbefragungen, Fragebögen sowie eine genaue Betrachtung der Blickrichtung wurden Empfehlungen zur Positionierung der Bedienelemente im Fahrzeug gegeben. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung ist die Forderung nach einer haptischen Rückmeldung bezüglich der Eingriffe des Systems. Eine Kundenbefragung bezüglich des eigenen ACCs ergab bei Jenness u. a. (2008), dass die verwendeten Bedienelemente sehr gut verstanden werden. Die von Sacher und Bubb (2006b) durchgeführte Feldstudie sollte unter anderem analysieren, welche Bedieninteraktionen während der Fahrt stattfinden. Dabei wurde zwischen ACC-Novizen und ACC-Experten unterschieden. Es stellte sich beispielsweise heraus, dass mit steigender Erfahrung auch die Häufigkeit der Interaktion mit dem System und damit die Nutzung der Bedienelemente steigt.



## 3.3.2 Auswirkungen auf die Umwelt

### Verkehrsfluss

Obwohl ACC nicht zur Verbesserung des Verkehrsflusses entwickelt wurde (vgl. Wüst, 2004), wird in diversen Untersuchungen das Potential der Staureduktion bzw. der Erhöhung der Verkehrsdichte untersucht. Bereits Ioannou und Chien (1993) sowie Cremer u. a. (1998) konnten durch Simulationen eine Verbesserung des Verkehrsdurchflusses und eine Reduzierung kritischer Situationen nachweisen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Ioannou und Stefanovic (2005), die durch die weniger sprunghaften Beschleunigungsänderungen des ACCs eine glättende Wirkung nachweisen konnten. Zu gegensätzlichen Ergebnissen kommen Marsden u. a. (2001) bei der Untersuchung von Alltagsfahrten. Versuche von Werf u. a. (2002), Bruin u. a. (2007) oder Davis (2007) belegen eine weitere Verbesserung durch eine Kommunikation der Fahrzeuge untereinander. Dadurch könnten noch schnellere Reaktionszeiten der Fahrzeuge und so eine Reduzierung des „Ziehharmonikaeffektes“<sup>4</sup> erreicht werden. Abhängig von der Geschwindigkeit könnte sich bei einer Marktdurchdringung von nur 20% der Durchfluss im Vergleich zu rein manuellem Fahren um bis zu 20% erhöhen (vgl. Davis, 2004). Einschränkend muss jedoch für diese Ergebnisse angemerkt werden, dass eine Validierung der Aussagen in Realfahrversuchen nicht stattgefunden hat. Nach Fancher u. a. (2001) könnten nur so die sehr wechselhaften Umgebungseinflüsse vollständig untersucht werden und nur so abschließende Empfehlungen ausgesprochen werden.

### Kraftstoffverbrauch und Emissionen

Die Homogenisierung der Geschwindigkeit durch ACC wirkt sich auch auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen aus. Diese These konnte durch diverse Studien belegt werden. Sowohl die Rechnersimulationen von Hochstädter und Ludmann (1999), Neunzig und Breuer (2000), Bose und Ioannou (2000) oder Bose und Ioannou (2001) wie auch die Realfahrten von Marsden u. a. (2001), Ioannou und Stefanovic (2005), Alkim u. a. (2007) und Viti u. a. (2007) kommen zu Kraftstoffeinsparungen von 3% bis 28,5%. Beim Schadstoffausstoß können Reduzierungen zwischen 10% und 20% erreicht werden. Diese Verbesserungen werden jedoch hauptsächlich auf Landstraßen und

---

<sup>4</sup>Fahren mehrere Fahrzeuge in einer dichten Kolonne kann die Verzögerung eines Fahrzeugs zu folgender Reaktion und somit zum sogenannten „Ziehharmonikaeffekt“ führen: Der direkt folgende Fahrer fährt zunächst noch eine gewisse Zeit ohne Reaktion weiter, reduziert somit den Abstand zum Vorfahrenden und muss letztendlich stärker bremsen, um eine gefährliche Situation zu vermeiden. Dieser Effekt pflanzt sich in der Kolonne fort und kann dazu führen, dass ab einer bestimmten Position die Fahrzeuge (fast) zum Stehen kommen, was abschließend einen Stau zur Folge haben kann.

### 3.3 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen in Forschung und Entwicklung

Autobahnen erzielt. Bei dichtem Stadtverkehr konnten kaum Einsparpotentiale im Hinblick auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch ermittelt werden.

#### 3.3.3 Fahrerverhalten

Durch die Unterstützung und Übernahme von Teilaufgaben der Fahrzeugführung durch das ACC ändert sich gewollt und ungewollt das Fahrerverhalten. Dies kann sich entweder auf globaler Ebene (z. B. Durchschnittsgeschwindigkeit) oder in bestimmten Situationen zeigen. Geeignete Indikatoren sind hierbei die Geschwindigkeit, der Abstand, das Bremsverhalten, das Verhalten bei plötzlichem Einscheren, das Spurwechselverhalten, aber auch die Aufmerksamkeit und Belastung des Fahrers. Um hierbei Änderungen nachzuweisen, werden häufig Fahrten mit und ohne ACC durchgeführt und verglichen.

#### Geschwindigkeitsänderung

Hoedemaeker und Brookhuis (1998), Dragutinovic u. a. (2005), Freyer (2008) und Lange u. a. (2008) ermittelten in ihren Studien eine Bereitschaft der Probanden, mit ACC schneller als ohne zu fahren. Andere Studien widersprechen diesen Aussagen und ermittelten keine Geschwindigkeitsänderung (vgl. Stanton u. a., 1997; Filzek, 2002). Die Untersuchungen von Tricot u. a. (2004), Kovordányi (2005) und Ojeda und Nathan (2006) kamen sogar zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit. Die häufig gemessene Reduzierung der Geschwindigkeitsschwankung wurde bereits in Kapitel 3.3.2 thematisiert. Die bisher aufgeführten Ergebnisse gelten nur außerorts. Oei und Polak (2002) und Acarman u. a. (2006) führten aus diesem Grund Fahrten in der Stadt durch und auch hier zeigte sich, dass es zu einer signifikanten Reduktion der Geschwindigkeit kommt.

#### Abstand

Neben der Verwendung des absolut gemessenen Abstandes zwischen zwei Fahrzeugen kommen an dieser Stelle häufig zwei weitere Indikatoren zu dessen Bewertung zum Einsatz: Die Zeitlücke bzw. Time Headway (vgl.: Formel 3.9) und die Time-To-Collision<sup>5</sup> (TTC).

Fancher u. a. (1998), Rakha u. a. (2001), Ma und Kaber (2005) und Viti u. a. (2007) gelangten zu der Erkenntnis, dass die Verwendung von ACC dazu führt, dass sich ein

---

<sup>5</sup>Die Berücksichtigung der Kollisionszeit als Kriterium im Straßenverkehr hat sich bei unterschiedlichen Untersuchungen bewährt (vgl. Ehmans u. a., 2000). Die TTC ist die Zeit, welche vergeht, bis es zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen zur Berührung kommt bzw. bis der Abstand in x-Richtung gleich Null ist. Die TTC berechnet sich aus dem Abstand der beiden Fahrzeuge dividiert durch die Relativgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Abstandes.

### 3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme

konstanterer Abstand zwischen den Fahrzeugen ergibt (vgl. Kapitel 3.3.2). Hoedemaeker und Brookhuis (1998), Dragutinovic u. a. (2005), Eick und Debus (2005), Lee und Nam (2007), Popiv u. a. (2008) und Lange u. a. (2008) kamen zu dem Ergebnis, dass die gefahrenen Abstände geringer werden. Eine häufigere Nutzung der kleinsten Zeitlücken konnte auch bei Sacher und Bubb (2006b) aufgedeckt werden. Die Arbeiten von Sayer u. a. (1997), Ohno (2001), Kovordányi (2005) und Seppelt u. a. (2005) führten zu einer konträren Aussage. So wurde in diesen Untersuchungen festgestellt, dass durch die Verwendung von ACC die mittlere Zeitlücke erhöht wird. Ojeda und Nathan (2006) und Lee u. a. (2008) erkannten auch eine Erhöhung der minimalen Werte für TTC und Lee u. a. (2008) zusätzlich deren Harmonisierung.

#### **Spurwechselverhalten**

ACC als System zur Unterstützung der längsdynamischen Vorgänge im Straßenverkehr verändert das Verhalten des Fahrers auch in seinen querdynamischen Aktionen. So stellte sich bei Tricot u. a. (2004), Freyer (2008) und Jenness u. a. (2008) heraus, dass die Tendenz zum Wechseln der Fahrspur sinkt und auf Autobahnen mehr auf der linken bzw. mittleren Fahrspur gefahren wird. Diese Aussage wird bei Ma und Kaber (2005) noch etwas detailliert. So zeigt sich dieser Effekt vor allem auf kurvigen Strecken und weniger auf geraden Autobahnen. Muss doch die Spur gewechselt werden, hat ACC auch auf diese Aktion Einfluss. So leiten die Nutzer das Überholmanöver nach Alkim u. a. (2007) und Freyer (2008) mit ACC früher als ohne ein, um einen störenden Eingriff des Systems zu vermeiden.

#### **Reaktionsvermögen**

Zur Überprüfung des Reaktionsvermögens, also der Zeit, die vergeht, bis der Fahrer die Fahraufgabe wieder vollständig übernommen hat, werden häufig unvorhersehbar (kritische) Verkehrssituationen erzwungen, so dass ein Eingreifen des Fahrers notwendig wird. Hierfür werden meist Simulatoruntersuchungen oder Versuche auf abgesperrten Strecken eingesetzt, so dass keine Gefahr für die Probanden besteht.

Rudin-Brown und Parker (2004), Park u. a. (2006) und Lee und Nam (2007) konnten so eine merkliche Erhöhung der Reaktionszeit mit ACC ermitteln, was beispielsweise bei Park u. a. (2006) bei 30% der Fahrer zu einer Kollision führte. Seppelt u. a. (2005) kommen zwar auch zu einer erhöhten Reaktionszeit, ein vollständiger Ausfall des Systems hat aber keine negativen Auswirkungen auf das Bremsverhalten. Jedoch gibt es auch eine Vielzahl an Untersuchungen, die diese Aussagen widerlegen (vgl. Weinberger, 2001; Neukum u. a., 2008), wobei zunächst eine Lernphase durch eine gewisse An-

### 3.3 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen in Forschung und Entwicklung

zahl an solchen Situationen durchlaufen werden muss, bevor keinerlei Auswirkungen mehr auftreten. Werden relativ normale Fahrsituationen, wie beispielsweise ein knappes Einschermanöver dargestellt, kommt es ebenfalls zu keinen kritischen Veränderungen im Reaktionsverhalten (vgl. Filzek, 2002; Rajaonah u. a., 2006).

#### **Aufmerksamkeit und Belastung des Fahrers**

Zur Analyse der Aufmerksamkeit und Belastung des Fahrers werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Eine Möglichkeit ist das subjektive Urteil, welches durch diverse Fragebögen ermittelt werden kann. Auch die Erfassung anderer Größen der Fahrzeugführung wie das Spurhaltevermögen kann als Indikator verwendet werden. Häufig wird auch zur Analyse der Belastung des Fahrers durch die Primäraufgabe eine Sekundäraufgabe gestellt und die Leistung in diesem Secondary Task analysiert. Hierfür werden z. B. die Blickzuwendungszeiten zur Sekundäraufgabe erfasst und ausgewertet. Takada und Shimoyama (2001), Ma und Kaber (2005) und Dragutinovic u. a. (2005) konnten so eine physische Entlastung beobachten, wodurch sich die Fahrer beispielsweise besser auf weitere Aufgaben der Fahrzeugführung wie der Auswahl einer sicheren Solltrajektorie konzentrieren können (vgl. Stanton u. a., 1997; Rudin-Brown und Parker, 2004). Weinberger (2001) und Ojeda und Nathan (2006) zeigten zusätzlich ein hohes Aktivitätsniveau des Fahrers auf, was Aufmerksamkeits- oder Vigilanzprobleme ausschließen sollte. Ein Teilausfall des Systems wirkt sich jedoch negativ auf den Entlastungseffekt aus und zusätzlich traten bei Buld und Krüger (2002) mit steigender Automation Vigilanzprobleme auf. Zwar sank die subjektive Beanspruchung des Fahrers mit zunehmender Automation, doch je weniger Eingriffe notwendig waren, desto unaufmerksamer und müder wurden die Fahrer (vgl. auch Lee und Nam, 2007). Die Untersuchungen von Young und Stanton (1997) und später Young und Stanton (2007) konnten eine solche Entlastung nur durch eine Kombination aus ACC und einem entsprechenden Assistenzsystem zur Querführung nachweisen. Buld und Krüger (2003) stellten in diesem Zusammenhang sogar fest, dass beim Übergang in das Überwachen nur noch Hinweisreize ausgewählt werden, die direkt mit der unterstützten Aufgabe zu tun haben. Dies kann in kritischen Situationen wie z. B. einem zu schnellen Einfahren des Führungsfahrzeugs in eine Kurve zu einem Mitzieheffekt führen, was nur durch eine Kombination aus Quer- und Längsunterstützung kompensiert werden. Alkim u. a. (2007) kommen sogar zu dem Schluss, dass ACC das Ausführen von Nebentätigkeiten fördert und so zu einer gewissen Ablenkung des Fahrzeuglenkers führt.

### 3 Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner Fahrzeugsysteme

Ein weiterer Effekt, der hier aufzuführen ist, ist die Risikohomöostase<sup>6</sup>, welche Hoedemaeker (2000) in seiner Studie auf Landstraßen belegen und auf Autobahnen widerlegen kann.

#### 3.3.4 Fahrzeugsystem

Im Vergleich zu den bisher aufgeführten Bewertungen unterscheiden sich das Testziel aber auch die angewendeten Kriterien bei der konkreten Untersuchung des *Fahrzeugsystems* deutlich. So können hier auch keine Studien zitiert werden.

Entin (2010) definiert als Untersuchungsergebnis das Aufdecken von Software-Fehlern, aber auch die Prüfung der verwendeten Bauteile (Hardware) findet hier statt. Kriterien, die hierbei Anwendung finden, sind nach Fey und Stürmer (2007) beispielsweise die Überprüfung der syntaktischen Richtigkeit des Codes oder dessen Effektivität. Lamberg und Beine (2005) geben als Testergebnis die Identifizierung von Codeteilen an, welche bei keinem Testfall durchlaufen wurden. Aber auch die Überprüfung des Fehler- oder Diagnoseverhaltens des *Fahrzeugsystems* kann im Fokus der Bewertung liegen (vgl. Rothmund, 2004). Außerdem finden sehr viele Untersuchungen bzw. Testfahrten mit dem Ziel der Absicherung des *Fahrzeugsystems* statt. Hierbei werden hauptsächlich objektive Messgrößen von den Entwicklern betrachtet und analysiert. Die Applikation, d. h. die finale Abstimmung des Verhaltens des *Fahrzeugsystems*, erfolgt ebenfalls über Realfahrten und beruht fast ausschließlich auf den subjektiven Urteilen der Entwickler, die zum Teil durch definierte Fahrmanöver unterstützt werden. Einige wichtige Testthemen sind bereits in Form von ISO-Vorschriften zu Anforderungen zusammengefasst (vgl. ISO, 2002, 2004, 2006, 2007).

#### 3.3.5 Zusammenfassung

Die hier erstellte Übersicht an ACC-Studien, systematisch dargestellt anhand der Elemente des Mensch-Maschine-Systems, zeigt zwar teilweise große Unterschiede in den Ergebnissen, die Ziele der Untersuchungen können jedoch anhand der wenigen aufgeführten Punkte zusammengefasst werden.

Als weitere Gemeinsamkeit kann die Ermittlung sowohl subjektiver als auch objektiver Urteile der Testpersonen zur Bewertung festgestellt werden, wobei eine Vielzahl unterschiedlicher Bewertungskriterien verwendet werden.

---

<sup>6</sup>„Befürchtung, dass vom Operateur die Verbesserung des objektiven Risikos erkannt wird und durch eine Erhöhung des subjektiv eingegangenen Risikos kompensiert wird.“ Bubb (2008)

## 4 Ziele und Ansatz dieser Arbeit

In den vorangegangenen Kapiteln wurden bekannte Werkzeuge und Methoden der Fahrzeugsystem-Entwicklung vorgestellt. Anschließend wurden Fahrerassistenzsysteme als Beispiel moderner und hochkomplexer elektronischer Fahrzeugsysteme eingeführt und klassifiziert. Eine weitere Fokussierung auf Adaptive Cruise Control als konkretes Beispiel eines Fahrerassistenzsystems sowie eine Zusammenfassung der Bewertungsmodelle für dieses System bilden den Abschluss des Stands der Technik. Hiermit soll gezeigt werden, dass nicht nur die Fahrzeugsysteme selbst, sondern auch der Entwicklungsprozess dieser Systeme in Forschung und Entwicklung betrachtet werden.

Es wird deutlich, dass es eine Vielzahl an Tools für die Entwicklung von FAS gibt, deren Anwendungsmöglichkeiten aber noch bei weitem nicht ausgereizt sind. Außerdem sind sie bisher kaum aufeinander abgestimmt. So muss in der Praxis ein erheblicher Aufwand betrieben werden, um sie anwenden zu können. Um die Komplexität in der Entwicklung von Fahrerassistenzfunktionen beherrschbar zu halten, sollten die Test- und Simulationswerkzeuge erweitert und besser auf den Produktentstehungsprozess abgestimmt werden. Daher ist es wichtig, eine möglichst durchgängige Toolkette zur Verfügung zu stellen, deren Einzelkomponenten aufeinander abgestimmt, deren Einsatzspektren aber auch klar von einander abgegrenzt sind.

Der zweite betrachtete sehr wichtige Aspekt, die Anwendung von Bewertungskriterien, zeigt, dass unter anderem die Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf das Fahrerverhalten oder die Umwelt genauso wie die Interaktion mit den Systemen über die Mensch-Maschine-Schnittstelle bereits sehr genau betrachtet werden. So können die wichtigsten Anliegen der Studien wie folgt zusammengefasst werden (vgl. auch Stanton und Marsden, 1996; Saad u. a., 2005; Gelau u. a., 2006):

- Analyse der Mensch-Maschine-Schnittstelle
- Auswirkungen der Systeme auf die Umwelt
- Auswirkungen der Systeme auf den Fahrer
- Analyse des Workloads
- Untersuchung der Kompatibilität mit der primären Fahraufgabe
- Nutzertransparenz

#### 4 Ziele und Ansatz dieser Arbeit

- Kontrollierbarkeit der Systemgrenzen
- Akzeptanzanalysen
- Bewertung der Effizienz der eingesetzten Systeme
- Erlernbarkeit des Assistenzsystems
- Überprüfung des Fehler- oder Diagnoseverhaltens des Fahrzeugsystems

Aber auch hier werden klare Lücken deutlich. Alle Untersuchungen haben das Ziel, objektiv zu sein und, obwohl sich die Ergebnisse zum Teil komplett widersprechen, kann die Objektivität keinesfalls abgesprochen werden. Die Komplexität moderner Fahrerassistenzsysteme spiegelt sich auch in der großen Schwierigkeit der Test- und Bewertbarkeit dieser wider. So existieren hier kaum standardisierte Prozesse wie beispielsweise die Euro NCAP-Crashtests (Euro NCAP, 2010) oder der ISO-Spurwechsel (ISO, 1999). Der Stand der Technik bei der Analyse der Eigenschaften eines Fahrzeuges ist das menschliche Empfinden. Auch die Bewertung der meisten Fahrerassistenzsysteme kann nur subjektiv durch den Entwickler oder Probanden erfolgen. Ziel eines innovativen und durchgängigen Entwicklungsprozesses muss jedoch eine einheitliche und vor allem objektive Bewertung der Systemeigenschaften und so der Fahrzeugeigenschaften sein (vgl. Maurer, 2009).

Abbildung 4.1 zeigt auf, wie der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz zur Objektivierung der Bewertung von Fahrerassistenzsysteme ablaufen soll. Das Vorgehen orientiert sich dabei gewollt sehr stark am Bewertungsprozess zur klassischen Fahrdynamik (vgl. Heißing und Brandl, 2002). In der Literatur existieren sehr wenige Veröffentlichungen zu dieser Thematik. Beispielhaft können hier Buld u. a. (2003), Didier (2006) und Schick u. a. (2007) bzw. Schick u. a. (2008) (vgl. Anhang B) betrachtet werden, die vergleichbare Ziele verfolgen. Buld u. a. (2003) ließen in einer Simulatorstudie die Probanden mit verschieden appliziertem ACC definierte Annäherungsmanöver mit Differenzgeschwindigkeiten von 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 und 80 km/h fahren. Die Probanden waren in der Lage, die unterschiedlichen Verhalten zu erkennen und ihren Favoriten zu wählen. Selbst nach vier bis sechs Wochen Pause wurden dieselben Bremsverläufe zu 80 - 90% erneut präferiert. Die Komfortuntersuchung von Didier (2006) wurde als Realtest konzipiert. Die Probanden fuhren dieselbe 127 km lange Autobahn oder autobahnähnliche Teststrecke mit zwei vergleichbaren Oberklassefahrzeugen, deren ACC-Systeme sich in ihrem dynamischen Verhalten unterscheiden. Zur Analyse wurden subjektive Daten mittels Fragebögen und objektive Daten eines Fahrzeuges ermittelt. Auch hier zeigen die Ergebnisse, dass die Probanden die Systeme trotz gleicher Funktionalität unterscheiden können. Die Interpretation der objektiven Daten wie beispielsweise die Fahrereingriffe zeigen jedoch keine Komfortunterschiede. Schick u. a. (2007) bzw. Schick u. a. (2008)

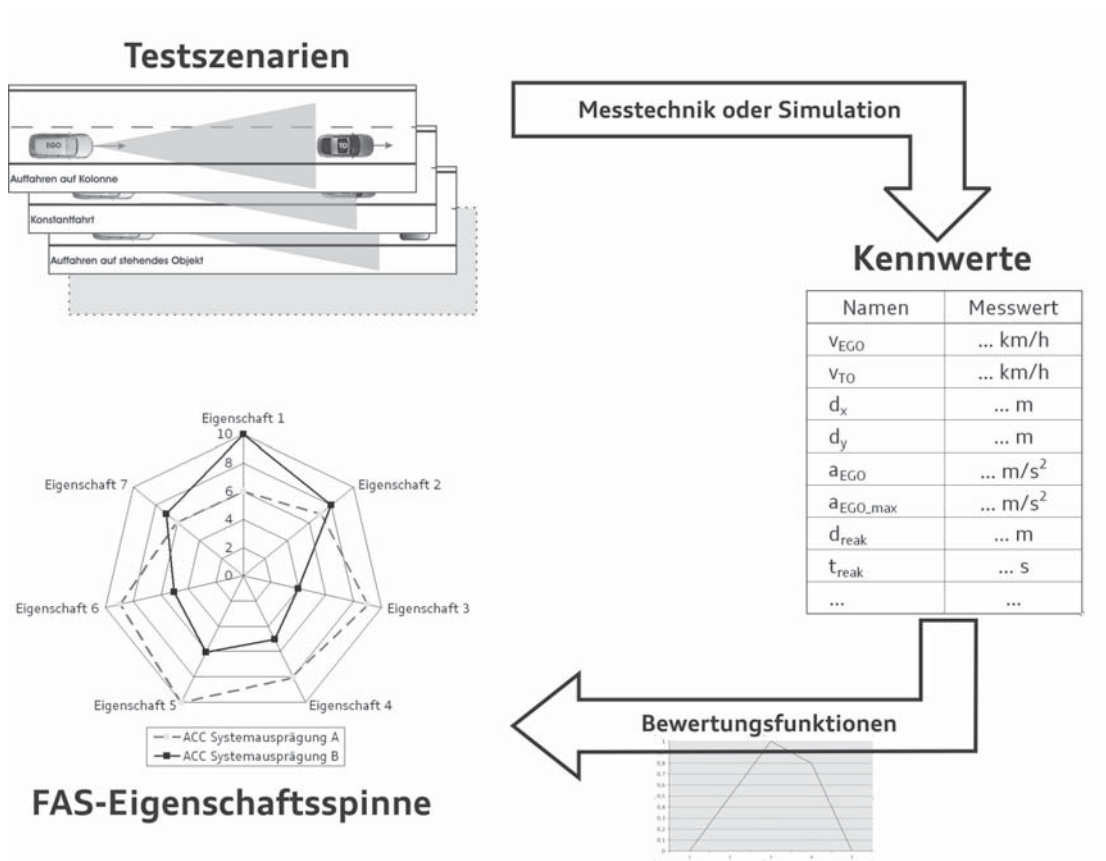


Abbildung 4.1: Bewertungsprozess für Fahrerassistenzsysteme

versuchen die Thematik bereits mehr vor dem Hintergrund des Produktentstehungsprozesses zu betrachten. So werden hier Methoden zur Bewertung der Funktion und Systemsicherheit von Assistenzsystemen vorgestellt. Ein Messsystem für den Realtest und eine virtuelle Simulationsplattform ermöglichen die Erfassung relevanter (fahr-) physikalischer Größen und mittels einer Fehlerbaumanalyse wird ein Versuchskatalog erstellt. Durch die kombinierte Erfassung subjektiver und objektiver Daten im Realtest sowie objektiver Daten in der Simulation können so unterschiedliche Systeme in unterschiedlichen Fahrzeugen verglichen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es bereits Ansätze gibt, die mit dem oben vorgestellten Bewertungsprozess vergleichbar sind. Jedoch werden bislang nur Teilbereiche betrachtet.



#### 4 Ziele und Ansatz dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es nun, den gesamten Prozess zu betrachten, um die in Kapitel 1 angesprochenen Herausforderungen meistern zu können. Hierfür müssen zunächst relevante Testszenarien identifiziert werden. Für diese Szenarien sind Kennwerte zu definieren, mit deren Hilfe über zu entwickelnde Bewertungsfunktionen Systemeigenschaften und somit Fahrzeugeigenschaften gewonnen werden können. Außerdem müssen geeignete Tools zur Ermittlung der Kennwerte für die in Kapitel 2.1 vorgestellten Test- und Simulationswerkzeuge aufgebaut werden.

Dies würde neben einer neutralen Vergleichbarkeit von Systemausprägungen auch die Möglichkeit schaffen, die Simulation stärker in die Entwicklung einzubeziehen. Das Ergebnis virtueller Fahrten im SIL oder HIL sind ausschließlich Messgrößen, die jedoch so auf Eigenschaften übertragen werden können. Dies bedeutet, dass eine Funktionsbewertung anhand der Fahrerassistenzsystem-Eigenschaften bereits zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt erfolgen kann. Für die Entwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme bedeutet dies, dass eventuelle Funktionslücken frühzeitig durch Simulationen im Labor identifiziert werden können. Somit kann der zeitaufwendige Erprobungs- und Applikationsaufwand und damit die teure Prototypennutzung reduziert werden. Ferner erleichtert ein definiertes Soll-Systemverhalten die Systemübernahme bereits existierender Funktionen in neue Fahrzeugprojekte. Abschließend bietet dieser innovative und durchgängige Entwicklungsprozess auch Vorteile, die die Kundenakzeptanz betreffen, da so eine einheitliche, systemübergreifende Ausprägung der Einzelsysteme ermöglicht wird.

In den folgenden Kapiteln werden nun zunächst die Prozessschritte definiert, notwendige Werkzeuge aufgebaut und abschließend die Ergebnisse anhand eines aktuellen Fahrzeugprojektes (Audi A8; Modelljahr 2010) validiert. Da konkrete Ergebnisse dargestellt werden sollen, wird das Ganze an dem in Kapitel 3.2 vorgestellten Fahrerassistenzsystem ACC erläutert.

# 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

In den Kapiteln 2, 3 und 4 wurden der Stand der Technik der Fahrzeugsystem-Entwicklung erarbeitet, Schwachstellen aufgezeigt und eine Methodik zur weiteren Verbesserung des Produktentstehungsprozesses abgeleitet. Im Folgenden wird nun diese eigenschaftsabhängige Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von ACC mit Wissen gefüllt.

## 5.1 Untersuchungshypothesen

Die zentralen Fragen, welche hierbei untersucht und beantwortet werden sollen, werden zunächst in Form von Hypothesen formuliert.

**Hypothese I** Für Fahrerassistenzsysteme können Eigenschaften definiert werden, anhand derer die Nutzer das System bewerten können.

In Abhängigkeit des Anwendungsgebiets gibt es eine Vielzahl an Eigenschaften, mit denen ein Fahrzeug bzw. dessen Verhalten klassifiziert werden kann. Potentiell interessante Fahrzeug- bzw. Systemeigenschaften, die auch in der Presse und im allgemeinen Sprachgebrauch Verwendung finden, sind:

- Sicherheit
- Effizienz/Wirtschaftlichkeit
- Komfort
- Dynamik
- Sportlichkeit
- Geländetauglichkeit



## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

- Qualität
- Design
- Alltagstauglichkeit
- ...

**Hypothese II** Die Bewertung nach Hypothese I ist abhängig von der Fahrzeugklasse bzw. dem Fahrzeugsegment.

Eine offizielle Definition der Begriffe Fahrzeugklasse bzw. Fahrzeugsegment existiert zwar nicht, für die Statistiken des **Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA)** hat sich allerdings eine Nomenklatur durchgesetzt. Hierbei erfolgt eine Zuordnung anhand optischer, technischer und marktorientierter Merkmale (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, 2009b). Da die Eigenschaften aus Sicht der Nutzer bzw. Kunden bewertet werden sollen, wird an dieser Stelle keine abweichende Einteilung verwendet und auch hier wie bei den Eigenschaften die „öffentliche Meinung“ vertreten. Es erfolgt somit eine Unterscheidung anhand der folgenden zwölf Segmente:

- Minis
- Kleinwagen
- Untere Mittelklasse
- Mittelklasse
- Obere Mittelklasse
- Oberklasse
- Geländewagen
- Sportwagen
- Vans (klein)
- Vans (groß)
- Utilities
- Wohnmobile

## 5.2 Versuchskonzept

Abbildung 5.1 zeigt das im Weiteren betrachtete Vorgehen zur Überprüfung der Hypothesen.

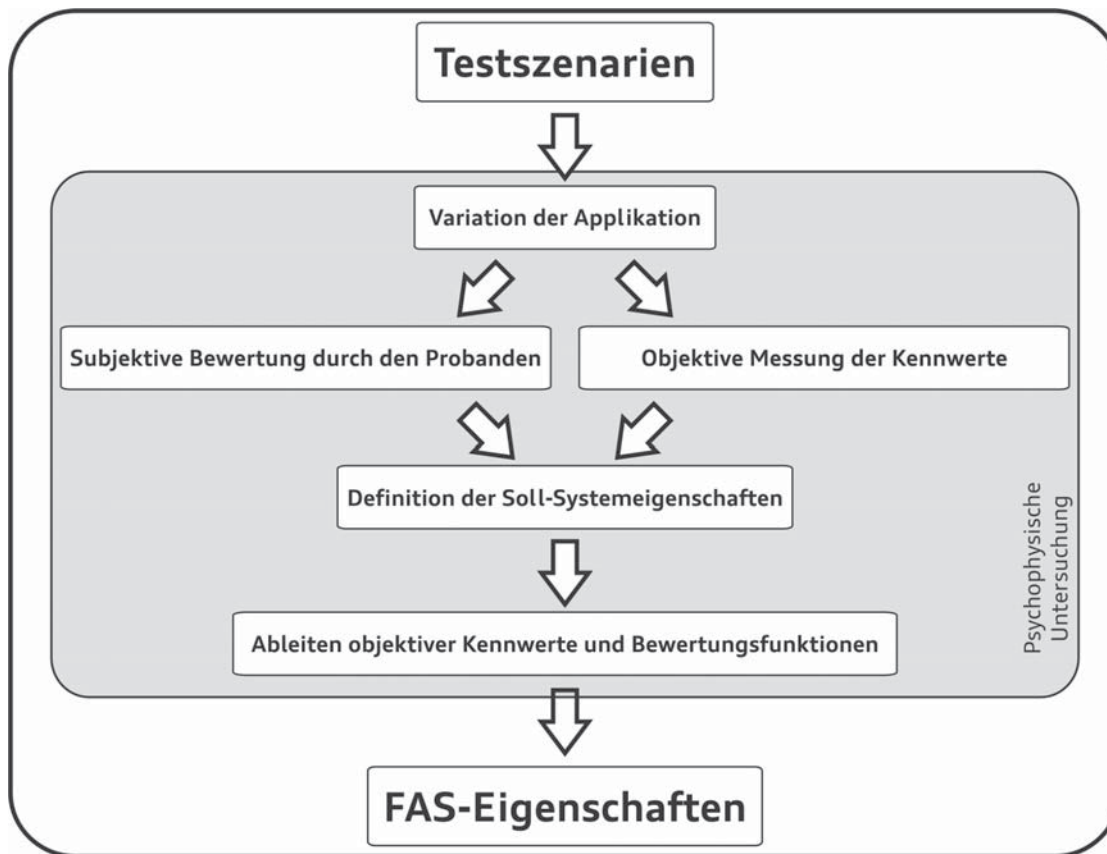


Abbildung 5.1: Ablauf der psychophysischen Untersuchungen

Über definierte Testszenarien sollen am Ende FAS-Eigenschaften ermittelt werden. Hierbei wird durch psychophysische Untersuchungen, durch den Vergleich unterschiedlicher Applikationen eines jeden Testszenarios sowie einer subjektiven Bewertung des jeweiligen System-Verhaltens und einer objektiven Messung von Kennwerten, ein Sollverhalten definiert (vgl. Gundlach, 1993). Dies stellt der grau hinterlegte Bereich dar. Abschließend muss das eigenschaftsabhängige Sollverhalten anhand möglichst weniger Kennwerte und zugehöriger Bewertungsfunktionen abgebildet werden können. Dieses Vorgehen wird zur Überprüfung der Hypothese II in zwei getrennten Studien mit zwei Fahrzeugen aus je einem der oben angegebenen Segmente wiederholt.

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Im Folgenden werden nun jeder Schritt dieses Prozesses sowie die durchgeführten Studien detailliert betrachtet und die Ergebnisse vorgestellt.

### 5.2.1 Testszzenarien

#### Testszzenarienauswahl und -klassifikation

Die Auswahl geeigneter Testszzenarien (Fahrmanöver) ist für die Güte der Bewertung von entscheidender Bedeutung. Um die relevanten Fahrmanöver aus der Vielzahl möglicher Situationen im Straßenverkehr herausfiltern zu können, wurden die Messfahrten einer Studie von Freyer (52 Probanden fahren ca. eine Stunde ohne Fahrerassistenzsysteme auf Autobahnen; Freyer (2008)) neu analysiert. Ziel war es herauszufinden, welche für ACC relevanten Situationen überhaupt und in welcher Häufigkeit auf Autobahnen vorkommen.

Zunächst muss jedoch definiert werden, was eine Verkehrssituation, welche die Beziehung der Verkehrsteilnehmer untereinander beschreibt, klassifiziert und welche Situationen prinzipiell zu untersuchen sind. Fastenmeier (1995) unterscheidet diese Situationen anhand des jeweiligen Fahrerverhaltens und unterteilt in die beiden Zustände frei und gebunden. Die Grenze gibt er dabei anhand einer Zeitlücke von 2 s an. Innerhalb dieser Zustände werden die Situationen als Freifahrt bzw. Folgefahrt bezeichnet, sofern die Geschwindigkeit und der Abstand relativ konstant bleiben. Die dynamischen Übergänge zwischen den beiden Situationen definiert Filzek (2002) anhand des Abstandes zwischen den Fahrzeugen und bezeichnet sie bei stetiger Änderung als Annäherung und Zurückfallen. Bei unstetigen Änderungen handelt es sich demnach um Spurwechsel des EGO-Fahrzeugs<sup>1</sup> oder um aus- bzw. einscherende Target-Fahrzeuge<sup>2</sup>. Eine weitere besonders wichtige Größe ist die Grenze zwischen unbeeinflusstem und beeinflusstem Fahren (vgl. Wiedemann, 1974). Zum einen wird dadurch die Grenze zwischen Auffahren auf Kolonne und Einscheren in Kolonne definiert, da vor dem Auffahren auf eine Kolonne ein unbeeinflusster Zustand und vor dem Einscheren in eine Kolonne ein beeinflusster Zustand vorhanden sein muss. Zum anderen wird dadurch festgelegt, ob eine Reaktion des Fahrers durch Bremsen oder Beschleunigen in Abhängigkeit vom vorausfahrenden Verkehr oder nicht durchgeführt wurde. Für die hier durchgeführte Untersuchung wurde die von Filzek (2002) herausgefundene Grenze von 60 m verwendet. Abbildung 5.2 gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

<sup>1</sup>Das EGO-Fahrzeug ist entweder das Fahrzeug, in dem sich der Proband befindet, oder das zu untersuchende bzw. bewertende Fahrzeug.

<sup>2</sup>Als Target-Fahrzeug werden die Verkehrsteilnehmer bezeichnet, die Einfluss auf das zu untersuchende System des EGO-Fahrzeugs haben.

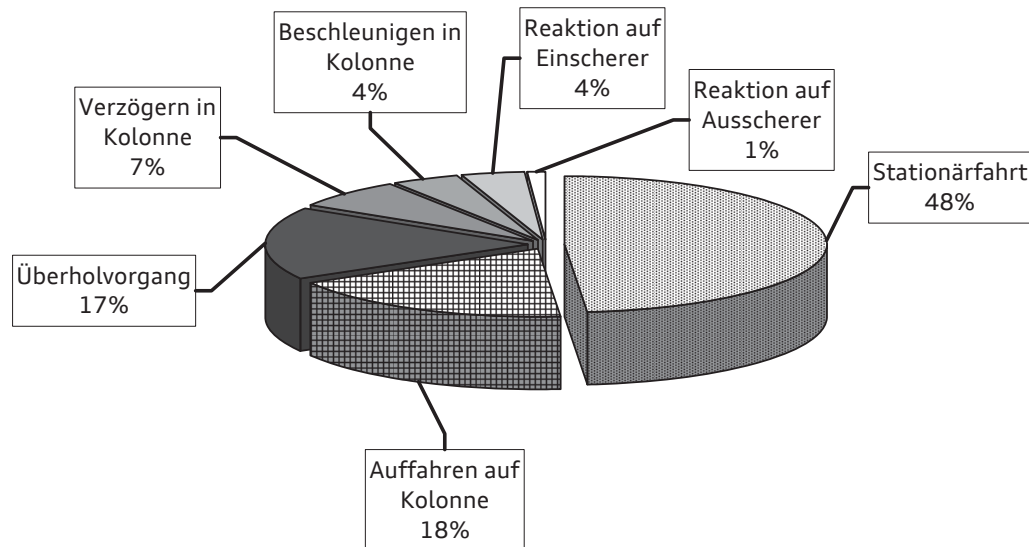


Abbildung 5.2: Potentielle Szenarien mit relativer Häufigkeit (Anteile an Gesamtzeit: 25%)

Die gewonnenen Erkenntnisse können durch andere Untersuchungen bestätigt werden. So gibt Nirschl (1995) für dynamische Vorgänge einen Zeitanteil von 10 % bis 20 % an (hier: 13 %). Für die weitere Betrachtung werden aufgrund dieser Untersuchung sowie der Diskussion mit einer Expertenrunde die folgenden fünf Manöver für die Bewertung von ACC verwendet:

- Stationärfahrt (48%)
- Auffahren auf Kolonne (18%)
- Überholvorgang (17%)
- Reaktion auf Einscherer (4%)
- Reaktion auf Ausscherer (1%)

Das Manöver Stationärfahrt wird, obwohl es mit 48% eine sehr häufig vorkommende Situation ist, nicht in der psychophysischen Untersuchung betrachtet. In eine Bewertung eines Systems muss die Situation jedoch eingehen. Da ACC diese Situation jedoch perfekt beherrschen muss, kann das hier angestrebte Sollverhalten durch eine maximal erlaubte Streuung um die einzuhaltenden Sollgrößen Geschwindigkeit des Target-Fahrzeugs und eingestellter Abstand sein.

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Die beiden Manöver Verzögern bzw. Beschleunigen in Kolonne wurden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Zum einen sollte die Versuchszeit für die Probanden, um diese nicht zu überfordern, nicht zu groß werden, zum anderen sind für Manöver, bei denen das Target-Fahrzeug ein dynamisches Verhalten reproduzierbar durchführen soll, der Versuchsaufwand noch einmal erheblich höher. So müsste das Target-Fahrzeug beispielsweise zusätzlich mit einem Brems- und Lenkroboter ausgestattet werden.

### Stationärfahrt

Die Stationärfahrt (vgl. Abbildung 5.3), die in der Literatur häufig auch als Folgefahrt bezeichnet wird, ist dadurch gekennzeichnet, dass das EGO-Fahrzeug dem Target-Fahrzeug, das im selben Fahrstreifen fährt, folgt, indem es Geschwindigkeit und Abstand an dieses anpasst.

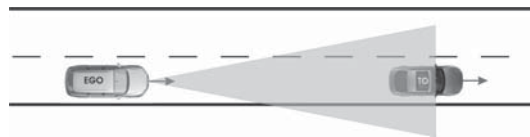


Abbildung 5.3: Manöver Stationärfahrt

### Auffahren auf Kolonne

Zu Beginn des Manövers Auffahren auf Kolonne (vgl. Abbildung 5.4) befindet sich das EGO-Fahrzeug in unbeeinflusster Fahrt und fährt mit konstanter Geschwindigkeit. Im weiteren Verlauf wird ein Target-Fahrzeug, das ebenfalls mit konstanter, aber geringerer Geschwindigkeit im selben Fahrstreifen wie das EGO-Fahrzeug fährt, detektiert. Durch den Geschwindigkeitsunterschied nähert sich das EGO-Fahrzeug an das Target-Fahrzeug an, wobei im Verlauf der Annäherung das EGO-Fahrzeug seine Geschwindigkeit auf die Geschwindigkeit des Target-Fahrzeugs reduziert. Das Manöver ist beendet, sobald sich die Verkehrsteilnehmer in einer Stationärfahrt befinden.

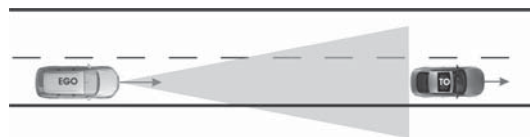


Abbildung 5.4: Manöver Auffahren auf Kolonne

### Überholvorgang

Ausgangspunkt des in Abbildung 5.5 dargestellten Manövers Überholvorgang ist eine Stationärfahrt in einem Fahrstreifen, wobei mindestens ein weiterer befahrbarer Fahrstreifen links des EGO-Fahrzeugs vorhanden ist. Während des Manövers verändert sich der Zustand des EGO-Fahrzeugs durch einen Spurwechsel in den benachbarten linken Fahrstreifen in unbeeinflusst. Währenddessen erhöht das EGO-Fahrzeug seine Geschwindigkeit auf eine neue, konstante Wunschgeschwindigkeit.

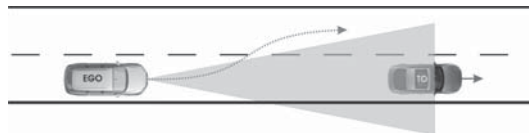


Abbildung 5.5: Manöver Überholvorgang

### Reaktion auf Einscherer

Abbildung 5.6 stellt das Manöver Reaktion auf Einscherer dar. An diesem Fahrmanöver sind zusätzlich zum EGO-Fahrzeug zwei weitere Fahrzeuge beteiligt. Das EGO-Fahrzeug fährt zunächst in Stationärfahrt hinter einem Target-Fahrzeug. In die Abstandslücke dieser Kolonne schert dann das dritte Fahrzeug, das in einem benachbarten Fahrstreifen fährt, ein und wird zum Target-Fahrzeug. Das Manöver ist hier beendet, sobald wieder von einer Stationärfahrt gesprochen werden kann.

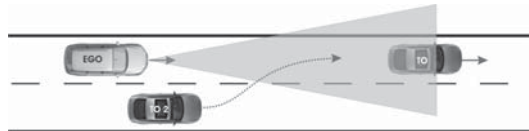


Abbildung 5.6: Manöver Reaktion auf Einscherer

### Reaktion auf Ausscherer

Auch beim letzten Manöver, der Reaktion auf einen Ausscherer (vgl. Abbildung 5.7), ist der Ausgangspunkt eine Stationärfahrt, in einem Fahrstreifen, wobei rechts noch mindestens ein weiterer befahrbarer Fahrstreifen ist. Anschließend wechselt das Target-Fahrzeug den Fahrstreifen durch einen Spurwechsel nach rechts und das EGO-Fahrzeug geht in die Freifahrt über. Wie beim Überholvorgang kommt es hier wieder zu einer Beschleunigung.



## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

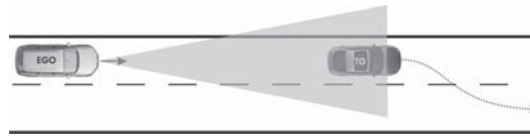


Abbildung 5.7: Manöver Reaktion auf Ausscherer

### Szenarienapplikation

Für jedes der vier für die Studie ausgewählten Manöver Auffahren auf Kolonne, Überholen, Reaktion auf Einscherer und Reaktion auf Ausscherer wurden anhand der Einflussfaktoren Expertenwissen und ACC-Benchmark, also der Analyse der sich am Markt befindenden Systeme, drei unterschiedliche Ausprägungen bzw. Applikationen in ein und demselben Fahrzeug umgesetzt. Zwischen den beiden Studien wurde ein möglichst identisches Verhalten der beiden Studienfahrzeuge angestrebt. Tabelle 5.1 gibt einen qualitativen Überblick über das Systemverhalten. Die Spalte Reaktion soll hierbei einen Aufschluss darüber geben, wann (steigende Reaktionszeit von früh über moderat bis spät) das System auf die sich ändernde Situation (z. B. Übergang von Freifahrt in Fahrgelände bei Auffahren auf Kolonne) reagiert. Die Spalte Dynamik soll die Art der Reaktion (steigende Beschleunigung von schwach über moderat bis stark) verdeutlichen. Was diese qualitative Einteilung in physikalischen Werten bedeutet, wird in Kapitel 5.3 Objektive Messgrößen herausgearbeitet.

### 5.2.2 Probanden

An den beiden psychophysischen Untersuchungen zur Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC nahmen jeweils 36 Probanden (18 Frauen und 18 Männer) teil. Da in naher Zukunft Fahrerassistenzsysteme in alle Fahrzeugklassen Einzug halten werden, sollte bei der Studie ein möglichst weites Spektrum an potentiellen Nutzern abgedeckt werden. Deshalb wurden die drei Altersgruppen *jünger* (18 bis 29 Jahre), *mittel* (30 bis 49 Jahre) und *älter* (ab 50 Jahre) gebildet. Innerhalb dieser Gruppen wurden die beiden geschlechterabhängigen Gruppen gleichmäßig verteilt. Die Probanden wurden über eine Rundmail angesprochen und über ein Telefoninterview vorselektiert, wobei hier Kandidaten mit mehr Fahrerfahrung vorgezogen wurden.

Ziel war es, bei den beiden Studien die identische Stichprobe zu verwenden, um Störeffekte möglichst gering zu halten. Zehn der ursprünglichen Probanden mussten bei der Studie II leider ersetzt werden, was jedoch immer noch eine gute Quote von 72 % Übereinstimmung bedeutet. Bei den zehn zu ersetzenden Personen wurden möglichst „Zwillinge“ rekrutiert.

Tabelle 5.1: Klassifikation der Applikationen

<b>Auffahren auf Kolonne</b>	Reaktion	Dynamik
Applikation „moderat“	moderat	moderat
Applikation „vorausschauend“	früh	moderat
Applikation „dynamisch“	spät	stark

<b>Überholen</b>	Reaktion	Dynamik
Applikation „moderat“	moderat	moderat
Applikation „träge“	spät	moderat
Applikation „dynamisch“	früh	stark

<b>Reaktion auf Einscherer</b>	Reaktion	Dynamik
Applikation „moderat“	moderat	moderat
Applikation „sicherheitsbetont“	früh	stark
Applikation „dynamisch“	spät	moderat

<b>Reaktion auf Ausscherer</b>	Reaktion	Dynamik
Applikation „träge“	spät	moderat
Applikation „dynamisch“	früh	stark
Applikation „vorausschauend“	früh	moderat

Der Altersdurchschnitt lag insgesamt jeweils bei 40 Jahren (Standardabweichung: 13 Jahre bzw. 14 Jahre). In der Altersgruppe *jünger* bei 24 Jahren (Standardabweichung: 2 Jahre bzw. 2 Jahre), in *mittel* bei 40 Jahren (Standardabweichung: 7 Jahre bzw. 8 Jahre) und bei *älter* bei 55 Jahren (Standardabweichung: 4 Jahre bzw. 4 Jahre).

Auch bei den Fahrgewohnheiten konnte eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden, was unter anderem die beiden Balkendiagramme in Abbildungen 5.8 wiedergeben.

### 5.2.3 Versuchsstrecke

Die Untersuchung sowie die Einweisung in das Versuchsfahrzeug und das ACC fanden auf dem Versuchsgelände der Universität der Bundeswehr in Neubiberg bei München statt. Hierbei handelt es sich um eine ca. 1600 m lange Gerade mit zwei Fahrstreifen und einem Seitenstreifen. Am Ende der Geraden konnte auf beiden Seiten gewendet werden. Die Eingewöhnungsfahrt wurde im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt. Die Stre-

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

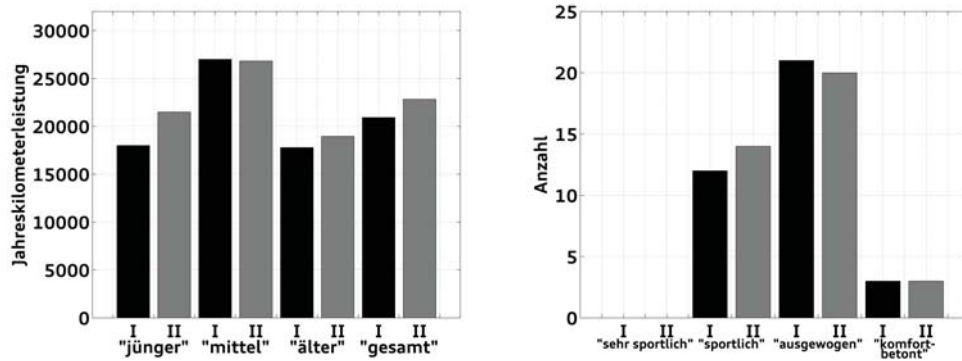


Abbildung 5.8: Jahreskilometerleistung und subjektive Selbsteinschätzung des Fahrstils der Probanden

cke verlief über die Anschlussstelle 92b Neubiberg auf die BAB 8 in Richtung Salzburg bis zur Anschlussstelle 97 Holzkirchen. Dort fuhren die Probanden von der Autobahn ab, wendeten und fuhren denselben Weg wieder zurück. Die Strecke hat eine Länge von ca. 55 km und konnte je nach Verkehrslage in 50 bis 60 Minuten bewältigt werden.

### 5.2.4 Versuchsfahrzeuge Studie I und Studie II

Wie in der Hypothese II angegeben, soll durch die beiden Studien zusätzlich zur Überprüfung und Bestätigung der Hypothese I untersucht werden, ob der Fahrzeugtyp einen Einfluss auf die subjektive Wahrnehmung und damit auf die Bewertung durch die Probanden hat.



Abbildung 5.9: Versuchsfahrzeuge Studie I und Studie II

Aus diesem Grund wurden aus den angegebenen Segmenten zwei Fahrzeuge mit einer möglichst großen Spreizung ausgesucht. Eine weitere Voraussetzung war selbstverständlich, dass ACC in den beiden Fahrzeugen angeboten wird. Aus diesen Gründen wurden aus dem Segment der Geländewagen ein Audi Q7 3.0 TDI quattro und aus dem Segment der Mittelklasse ein sehr sportlicher Vertreter, das Audi S5 Cabriolet, ausgewählt (vgl. Abbildung 5.9).

### 5.2.5 Messmethoden

Die Messmethoden müssen auf die angestrebten Ziele hin angepasst werden. Für die subjektiven Urteile durch die Probanden bedeutet dies, dass eine Methode eingesetzt werden muss, die psychologisches Messen erlaubt. Es müssen folglich empirische (psychische) Zusammenhänge aufgedeckt und numerisch abgebildet werden (vgl. Hargutt, 23.1.2001). Eine weitere zu erfüllende Rahmenbedingung ist, dass - wie von Buld u. a. (2003) veröffentlicht - Probanden zwar relativ exakt das gewünschte Zielverhalten definieren und wiederfinden können, es - wie bei Didier (2006) angegeben - jedoch nur durch den direkten Vergleich unterschiedlicher Applikationen zu einer Auswahl kommen kann. Um diese subjektive Bewertung auch mit Messgrößen kombinieren zu können, müssen die Zustandsgrößen des EGO-Fahrzeugs und der Objekte in dessen Umfeld objektiv und präzise vermessen werden.

Diese Anforderungen können am besten, wie in den folgenden Kapiteln erläutert, durch die Durchführung eines Paarvergleiches und die Auswertung nach dem Law of Comparative Judgement sowie dem Einsatz des bei Strasser u. a. (2010) vorgestellten Referenzsystems erfüllt werden.

#### Paarvergleich und Auswertung nach dem Law of Comparative Judgement

Das Law of Comparative Judgement (LoCJ) ist eine Methode zur Skalierung von Objekten mittels Paarvergleichsurteilen und wurde 1927 von Louis Leon Thurstone entwickelt. Nach Hargutt (23.1.2001) handelt es sich hierbei um eine indirekte Methode zur Urteilsfindung, was bedeutet, dass sich das gesuchte numerische Abbild der psychischen Zusammenhänge erst durch die Anwendung bestimmter mathematischer Verfahren ermitteln lässt. Ziel ist es, das Datenniveau von einer Ordinalskala auf eine Intervallskala zu erhöhen, um Informationen über den Abstand der zu bewertenden Objekte zu generieren. Dabei geht das LoCJ von den folgenden drei Annahmen aus:

- Der Urteiler bewertet die Objekte anhand einer internen eindimensionalen Skala.
- Die Werte vieler Urteiler ergeben stets eine Normalverteilung mit derselben Varianz.

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

- Die Differenz der Objekte definiert Richtung und Ausmaß.

Meinhardt und Persike (2005) definieren den Zusammenhang zwischen einer außer-subjektiven Größe (Objekt)  $I$  und der zugehörigen subjektiven Größe  $X$  mithilfe einer unscharfen Abbildung.

$$I \rightarrow X \quad (5.1)$$

$$X \equiv N[\mu(X); \sigma(X)] \quad (5.2)$$

Für zwei Objekte  $I_1$  und  $I_2$  existieren somit zwei Normalverteilungen  $N(\mu_1; \sigma_1)$  und  $N(\mu_2; \sigma_2)$ , wobei sich nur die Erwartungswerte  $\mu_1$  und  $\mu_2$  und nicht die Standardabweichungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  unterscheiden.

Alle Urteiler betrachten somit ihre persönlichen Werte für  $X_1$  und  $X_2$  und bilden zur Urteilsfindung deren Differenz.

$$\Delta X = X_2 - X_1 \quad (5.3)$$

Ein positiver Wert bedeutet für den Urteiler, dass  $I_2$  in der zu bewertenden Eigenschaft besser als  $I_1$  ist und dementsprechend ein negativer Wert, dass  $I_1$  besser als  $I_2$  ist. Aus der Normalverteilung der unkorrelierten subjektiven Größen  $X_1$  und  $X_2$  folgt die Normalverteilung der Differenzen und somit gelten für den Erwartungswert und seine Varianz die folgenden Zusammenhänge.

$$\mu_\Delta = \mu_2 - \mu_1; \sigma_\Delta^2 = 2\sigma^2 \quad (5.4)$$

Aus  $\Delta X = X_2 - X_1$  folgt an der Stelle  $\Delta X = 0$ ,  $X_1 = X_2$ . Der Wert der Verteilungsfunktion der Differenzenverteilung an dieser Stelle ( $F_{\Delta X}(0)$ ) gibt dementsprechend die Wahrscheinlichkeit  $P(X_2 \leq X_1)$  an. Da diese Verteilungsfunktion der Differenzenverteilung nicht in Form von Tabellen existiert, wird im nächsten Schritt die Differenzenverteilung zur Standardnormalverteilung  $z$ -transformiert.

Aus

$$z = \frac{\Delta X - \mu_\Delta}{\sqrt{2}\sigma} \quad (5.5)$$

folgt an der Stelle  $\Delta X = 0$

$$z_{12} = \frac{0 - \mu_{\Delta}}{\sqrt{2}\sigma} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{2}\sigma} \quad (5.6)$$

Dieser  $z$ -Wert entspricht somit der standardisierten Differenz der Erwartungswerte der subjektiven Größen  $I_1$  und  $I_2$ . Wird nun dieses ordinale Vergleichsurteil aller Personen zu den beiden Objekten  $I_1$  und  $I_2$  eingeholt, ergibt sich die relative Häufigkeit  $p_{12}$ , auch Dominanzwahrscheinlichkeit genannt, mit der  $I_1 > I_2$  geurteilt wurde. Diese Dominanzwahrscheinlichkeit kann einer Schätzung für die Wahrscheinlichkeit  $P(X_2 > X_1)$  gleichgesetzt werden.

Aus diesen Vorüberlegungen kann mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung

$$P(X_2 > X_1) = p_{12} = 1 - F(z_{12}) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{12}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (5.7)$$

durch Anwendung der inversen Zuordnung

$$z_{12} = F^{-1}(1 - p_{12}) \quad (5.8)$$

der gesuchte  $z$ -Wert ermittelt werden und es gilt aus Gleichung 5.6

$$z_{12} = F^{-1}(1 - p_{12}) = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{2}\sigma} \quad (5.9)$$

$z_{12}$  ist somit proportional zur Differenz  $\mu_1 - \mu_2$  mit der Proportionalitätskonstanten  $\alpha = (\sqrt{2}\sigma)^{-1}$ .

Um nun die Methode nach dem Law of Comparative Judgement anwenden zu können, müssen Ergebnisse aus einem Experiment mit mehreren Dominanzwahrscheinlichkeiten für die Objekte  $I_1, \dots, I_k$  vorliegen und in eine  $k \times k$ -Matrix eingetragen werden (vgl. Tabelle 5.2).

Über die inverse Zuordnung kann den Dominanzwahrscheinlichkeiten jeweils der entsprechende  $z$ -Wert zugeordnet werden (vgl. Tabelle 5.3). Für das weitere Vorgehen der Datenauswertung ist es unerheblich, ob die Zeilenmittelwerte der  $i$ -ten Zeile oder die Spaltenmittelwerte der  $i$ -ten Spalte der  $z$ -Wert-Tabelle betrachtet werden, da sie sich nur im Vorzeichen, nicht im Betrag unterscheiden. Somit gilt für die Zeilenmittelwerte:

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Tabelle 5.2: Dominanzwahrscheinlichkeiten

	$I_1$	$I_2$	...	$I_k$
$I_1$	0,5	$p_{12}$	...	$p_{1k}$
$I_2$	$1 - p_{12}$	0,5	...	$p_{2k}$
...	...	...	...	...
$I_k$	$1 - p_{1k}$	$1 - p_{2k}$	...	0,5

Tabelle 5.3: Zugeordnete  $z$ -Werte

	$I_1$	$I_2$	...	$I_k$
$I_1$	0,0	$z_{12}$	...	$z_{1k}$
$I_2$	$-z_{12}$	0,0	...	$z_{2k}$
...	...	...	...	...
$I_k$	$-z_{1k}$	$-z_{2k}$	...	0,0

$$\bar{z}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k z_j = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \alpha(\mu_i - \mu_j) = \alpha \cdot \mu_i - \frac{\alpha}{k} \sum_{j=1}^k \mu_j \quad (5.10)$$

Durch Ersetzen des konstanten Wertes  $-\frac{\alpha}{k} \sum_{j=1}^k \mu_j$  mit  $\beta$  ergibt sich der abschließende Zusammenhang:

$$\bar{z}_i = \alpha \cdot \mu_i - \beta \quad (5.11)$$

Diese Beziehung besagt folglich, dass die Mittelwerte (der Zeilen bzw. Spalten) der  $z$ -Wert-Tabelle eine lineare Transformation der Erwartungswerte  $\mu_i$  sind und somit eine Intervallskala darstellen. Nach dem Law of Comparative Judgement lässt sich demnach für ein Merkmal  $X$ , das für alle Objekte  $I$  mit derselben Varianz  $\sigma$  normalverteilt ist und sich auf einer latenten kontinuierlichen Skala abbilden lässt, mittels ordinaler Paarvergleichsurteile eine Intervallskala konstruieren.

### Referenztoolbox bzw. -kette

Das Referenzmesssystem muss alle Größen, welche von den Umfeld- und Fahrzeugsensoren der FAS-Funktionen ermittelt werden, erfassen. Um jedoch für eine Bewertung verwendet werden zu können, müssen die Referenzdaten deutlich genauer und zuverlässiger als die Größen der Fahrzeugsysteme sein. Für das EGO-Fahrzeug interes-

## 5.2 Versuchskonzept

sieren dabei vor allem die fahrdynamischen Zustandsgrößen wie die Geschwindigkeit ( $v_{EGO}$ ) oder die Beschleunigung ( $a_{EGO}$ ). Gleiches gilt natürlich auch für die Target-Fahrzeuge, wobei hier zusätzlich relative Größen zum EGO-Fahrzeug wie Position (longitudinaler Abstand  $\Rightarrow x_{REL}$  und lateraler Versatz  $\Rightarrow y_{REL}$ ) sowie die Geschwindigkeit ( $v_{REL}$ ) und Beschleunigung ( $a_{REL}$ ) zu nennen sind.

Diese Anforderungen werden am besten von Inertialplattformen (**I**nertial Navigation System; INS) mit Satellitennavigationsstützung (**D**ifferential-**G**PS-Systeme; DGPS) erfüllt (vgl. iMAR, 2009; Genesys, 2009; Oxford, 2009). Durch diese Kopplung können mit sehr hoher Verfügbarkeit, hoher Genauigkeit im cm-Bereich und hoher Messrate die Position, Geschwindigkeit und Lage eines Objektes bestimmt werden. Die Ausstattung eines jeden in einem Versuch beteiligten Fahrzeuges mit einem solchen System ermöglicht neben der Bestimmung der absoluten Zustandsgrößen auch die Berechnung der relativen Größen der Objekte durch eine Koordinatentransformation in ein beliebiges Koordinatensystem (z. B. EGO-Fahrzeug-Koordinatensystem) (vgl. Abbildung 5.10).

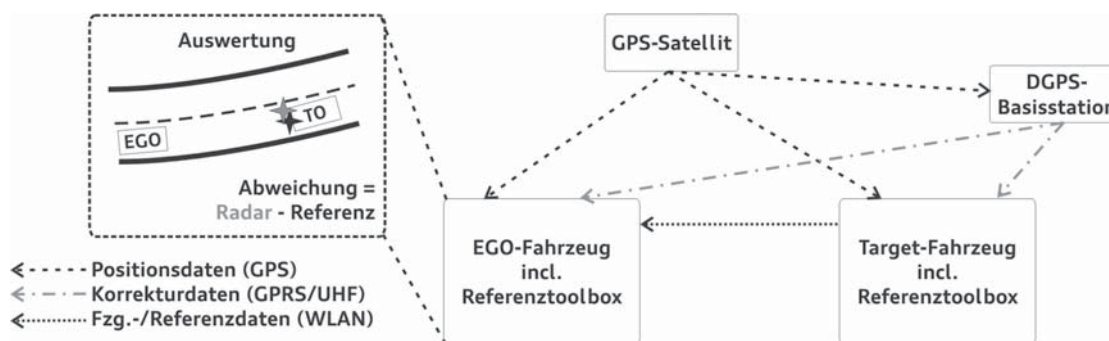


Abbildung 5.10: INS/DGPS-basierte Referenzgenerierung für Realtests nach Strasser u. a. (2010)

Die Position von statischen Objekten kann zuvor eingemessen und mit der gleichen Transformation umgerechnet werden. Zusätzlich ist aufgrund des a priori-Wissens über die Objekte deren Länge, Breite und Höhe vorhanden. Durch den Einsatz einer WLAN-Verbindung (Reichweite ca. 200m bis 500m) können die Daten der einzelnen Referenzsysteme in ein „Master“-Fahrzeug übertragen werden, was eine Online-Betrachtung sowie zentrale Speicherung der Daten ermöglicht. Die Offline-Auswertung bietet jedoch auch die Möglichkeit der Synchronisierung der Daten der einzelnen Referenzsysteme mittels des aufgezeichneten hochgenauen GPS-Zeitstempels und ist somit auch für einen reichweitenunabhängigen Einsatz konzipiert. Um diese Funktionalitäten um-



## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

setzen zu können, sind neben der INS/DGPS-Referenzsensorik weitere Hardwarekomponenten nötig:

- Mini-PC mit Monitor und Tastatur
- Modems für DGPS-Korrekturdaten (UHF für die lokale Basisstation und GPRS für den ASCOS-Dienst)
- WLAN-Router zur Kommunikation zwischen mehreren Referenzsystemen
- Energieversorgung (Fahrzeugbatterie, Zigarettenanzünder- und 230V-Ladegeräte)
- Kabel, Stecker und Antennen

Die Integration aller Komponenten in einer kompakten, stabilen und tragbaren Box (RefBox) ermöglicht eine relativ einfache Handhabung und schnelle Installation in dem jeweiligen Fahrzeug. Eine Montage anstelle des Beifahrersitzes, wie in Abbildung 5.11 zu sehen, bietet hierbei einige Vorteile. So kann über eine Adapterplatte eine feste Verbindung zum Fahrzeug hergestellt werden und außerdem ist so eine exakte und leicht wiederzufindende Position gewährleistet. Das Wissen über die Einbauposition ist für eine exakte Transformation aller Daten in ein Koordinatensystem von entscheidender Bedeutung.



Abbildung 5.11: Montage der RefBox im Fahrzeug anstelle des Beifahrersitzes aus Strasser u. a. (2010)

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil dieser Messmethode ist die Verarbeitung aller Daten in der so genannten Referenztoolkette, welche aus zwei Komponenten besteht. Der mit ADTF (vgl. Voigtländer, 2008) umgesetzte Online-Teil sowie die in MATLAB implementierte Offline-Auswertung und -Aufbereitung. Abbildung 5.12 stellt von links nach rechts den Ablauf der Datenströme sowie die verwendeten Softwaremodule bei der Verwendung von zwei Referenzsystemen (EGO- und Target-Fahrzeug) dar. Zunächst

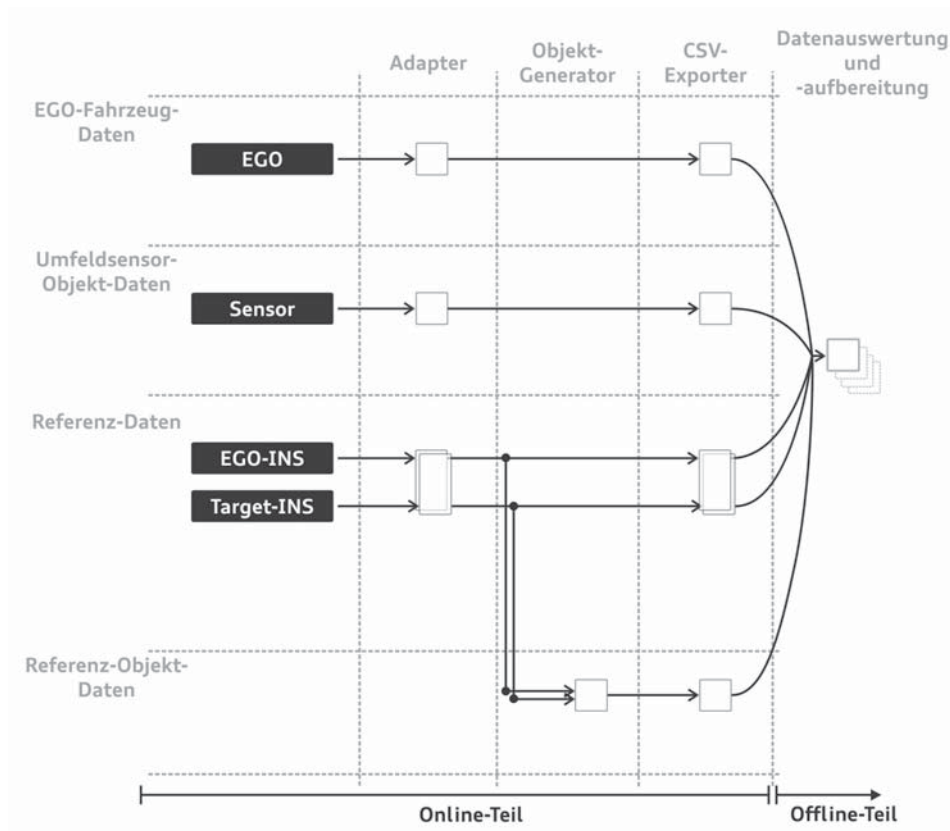


Abbildung 5.12: Datenströme der Referenztoolkette

werden die Daten unterschiedlicher Herkunft mittels eines Adapters auf eine generische Datenstruktur umgesetzt. Dies stellt sicher, dass der restliche Teil der Toolbox auf standardisierte Schnittstellen zugreifen kann, was eine durchgängigere Verwendung gleicher Softwaremodule ermöglicht. Der Objekt-Generator dient der bereits angesprochenen Transformation der Objektpositionen und der Zustandsgrößen der Objekte in das gewählte Koordinatensystem. Das ausgegebene Datenformat der Referenzobjekte entspricht hierbei dem standardisierten Datenformat der Umfeldsensor-Objekte, so dass diese einfach verglichen werden können. Die Qualität dieser Daten kann permanent online über Statusanzeigen überprüft werden. Zusätzlich können die Referenzdaten zusammen mit den Umfeldsensor-Daten online visualisiert und direkt verglichen werden (vgl. Abbildung 5.10).

Um die Daten nach einem Versuch auswerten zu können, werden die EGO-Fahrzeug-, Umfeldsensor-Objekt-, Referenz- und Referenz-Objekt-Daten in je eine CSV-Datei exportiert. Die MATLAB-Auswertungs- und -Aufbereitungsumgebung dient zur Offline-

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Auswertung der im Versuch gewonnenen Daten. Die eigentliche Auswertung der Mess- und Referenzdaten erfolgt mit Funktionen, die zusammen mit den Mess- und/oder Referenzdaten in die GUI geladen werden. Diese als Plugin bezeichneten Module sind relativ kleine, parametrisierbare und wieder verwendbare MATLAB-Skripte. Abschließend können die so berechneten Ergebnisse (Text, Tabellen und Plots) in Form eines PDF-Reportes, der die kompletten MATLAB-Figure-Dateien beinhaltet, gespeichert und weiter analysiert werden.

### 5.2.6 Versuchsplan

Der Versuch war in sechs Phasen gegliedert, wobei der Proband ständig von einem Versuchsleiter begleitet bzw. betreut wurde.

Nach einer kurzen Begrüßung wurde den Probanden ein einführender Text vorgelegt und es musste ein erster allgemeiner Fragebogen ausgefüllt werden. Außerdem wurden Informationen wie Führerscheinjahre, Jahreskilometerleistung sowie Fahrgewohnheiten abgefragt, um potentielle Zusammenhänge zwischen den Studienergebnissen und den Probanden statistisch auswerten zu können (vgl. Anhang D). Anschließend folgte eine Einweisung in das jeweilige Versuchsfahrzeug und eine Gewöhnung an dieses auf dem Versuchsgelände.

Die dritte Phase beinhaltete ein ACC-Intensivtraining nach den Erkenntnissen von Kopf und Simon (2001). Zunächst wurden den Probanden die Bedienelemente des ACC erläutert, bevor unterschiedliche vom Versuchsleiter vorgegebene Bedientätigkeiten auszuführen waren. Darauf aufbauend wurden einige typische Situationen, wie sie auch im realen Verkehr vorkommen, gestellt, damit das Regelverhalten erlebt werden konnte. Anschließend wurde die in Kapitel 5.2.3 vorgestellte Route abgefahren, um ACC in möglichst vielen realen Verkehrssituationen zu erleben. Durch mögliche Anweisungen des Versuchsleiters wie das Durchführen eines Spurwechsels oder das Verändern der Wunschgeschwindigkeit konnte sichergestellt werden, dass alle notwendigen Situationen zustande kamen. Dadurch konnten die Probanden trotz der begrenzten zur Verfügung stehenden Zeit eine ausreichende Lernphase durchlaufen und ein sehr gutes Systemverständnis erwerben.

Wie in Kapitel 5.2.5 vorgestellt und begründet, wurde die Studie in Form von Paarvergleichen der jeweils drei Applikationen durchgeführt. Um Reihenfolge- oder Sequenzeffekte zu vermeiden, wurde der Ablauf der Manöver und der Applikationen variiert. So gab es zwei Hauptformen (Variante {A}: Überholen (A), Einscheren (B), Auffahren auf Kolonne (C) und Ausscheren (D); Variante {D}: Ausscheren (D), Auffahren auf Kolonne (C), Einscheren (B) und Überholen (A)) mit jeweils zwei unterschiedlichen Reihenfolgen der Applikationen (Varianten {A1} und {A2} sowie Varianten {D1} und



## 5.2 Versuchskonzept

{D2}). Da in vier Szenarien jeweils drei Applikationen bewertet werden mussten, gab es somit 24 Einzelfahrten und dementsprechend zwölf auszufüllende Fragebögen. Durch eine abschließende Frage, die Kategorisierung des Probanden durch den Versuchsleiter und ein Feedbackgespräch wurde der Versuch nach ca. zwei Stunden beendet. Alle angesprochenen Dokumente können im Anhang C eingesehen werden.

## 5.3 Messergebnisse

### 5.3.1 Subjektive Bewertung

Wie in Kapitel 5.1 angesprochen sollten die Probanden das Fahrerassistenzsystem ACC anhand von Systemeigenschaften bewerten. Aus der Vielzahl möglicher Kriterien wurden die vier Eigenschaften

- Sicherheit,
- Komfort,
- Dynamik und
- Sportlichkeit

ausgewählt sowie zusätzlich die folgenden zwei Fragen gestellt:

- Entspricht das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt mehr Ihrem eigenen Fahrstil?
- Welche ACC-Version hat Ihnen insgesamt besser gefallen, die von der 1. oder der 2. Fahrt?

Da es sich bei der Frage nach dem Fahrstil nicht wirklich um eine Eigenschaft handelt, werden diese Ergebnisse für die Entwicklung eines eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens nicht weiter betrachtet. Für die Definition des Sollverhaltens in Kapitel 5.4 werden die Antworten jedoch noch Verwendung finden.

Um eine übergreifende Bewertung durchführen zu können, müssen zunächst die nach Kapitel 5.2.5 berechneten Skalenwerte aller Applikationen normiert werden. Hierfür wurde die am schlechtesten bewertete Kombination aus Manöver, Applikation und Eigenschaft als Ursprung (Skalenwert = 0) definiert. Dies war die Bewertung der Applikation „träge“ im Manöver Überholen bei der Eigenschaft Sportlichkeit der Studie I (Geländewagen Audi Q7; vgl. Abbildung 5.14). Auch aus Expertensicht wird diese Ausprägung als vollständig unsportlich bewertet, weshalb dieses Vorgehen sinnvoll ist. Folglich entspricht die jeweilige Applikation mit steigendem Skalenwert immer mehr der untersuchten Eigenschaft.

#### Auffahren auf Kolonne

Die exakten Werte für das Manöver Auffahren auf Kolonne können der Abbildung 5.13 entnommen werden. Die Abbildung zeigt in der Eigenschaft Sportlichkeit eine Abstufung zwischen der Applikation „dynamisch“ und den Applikationen „moderat“ und „vorausschauend“. Diese werden als gleichwertig eingestuft und bekommen noch ein

### 5.3 Messergebnisse

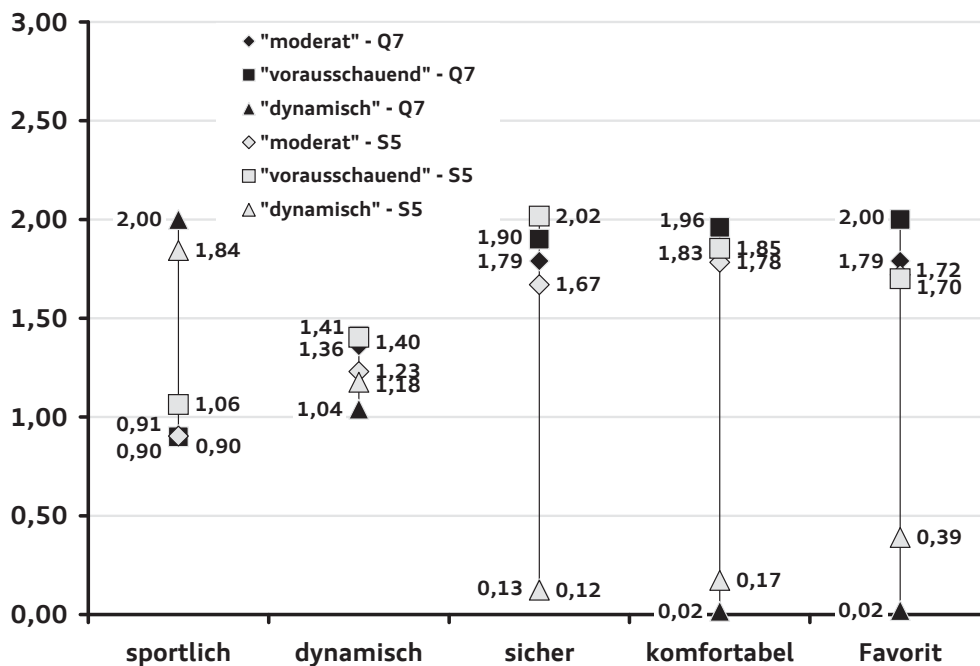


Abbildung 5.13: Skalen des Manövers Auffahren auf Kolonne

gewisses Maß an Sportlichkeit zugesprochen. Die Applikation „dynamisch“ wird am besten eingestuft. Für die beiden Studien können keine Unterschiede erkannt werden.

Für die Eigenschaft Dynamik kann weder zwischen den Applikationen noch zwischen den Studien eine differenzierte Bewertung erkannt werden.

Beim Kriterium Sicherheit zeigt sich wiederum eine sehr deutliche Tendenz. Die Applikation „dynamisch“ wird als völlig unsicher bewertet und die beiden Applikationen „moderat“ und „vorausschauend“ als sehr sicher und gleich. Auch hier gibt es keinen Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Urteile der Probanden.

Ein identisches Verhalten kann bei den Kriterien Komfort und Favorit festgestellt werden. So bekommt die Applikation „dynamisch“ beides Mal ein Urteil nahe der Null und die Applikationen „moderat“ und „vorausschauend“ identische, optimale Wertungen. Die Fahrzeugklasse hat wiederum keinen Einfluss.

Zusammenfassend lässt sich beim Manöver Auffahren auf Kolonne festhalten, dass die Applikationen „moderat“ und „vorausschauend“ klar bevorzugt werden und die Applikation „dynamisch“ nur in der Eigenschaft Sportlichkeit die höchste Bewertung bekommt.

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

### Überholen

Abbildung 5.14 zeigt wieder die ermittelten Skalenwerte einer jeden Applikation in den fünf ausgewählten Kriterien. Zunächst sei hier nochmal kurz darauf hingewiesen, dass die Bewertung des Manövers Überholen beim Kriterium Sportlichkeit der Applikation „dynamisch“ als Ursprung der Auswertungen definiert wurde. Der Graph macht deut-

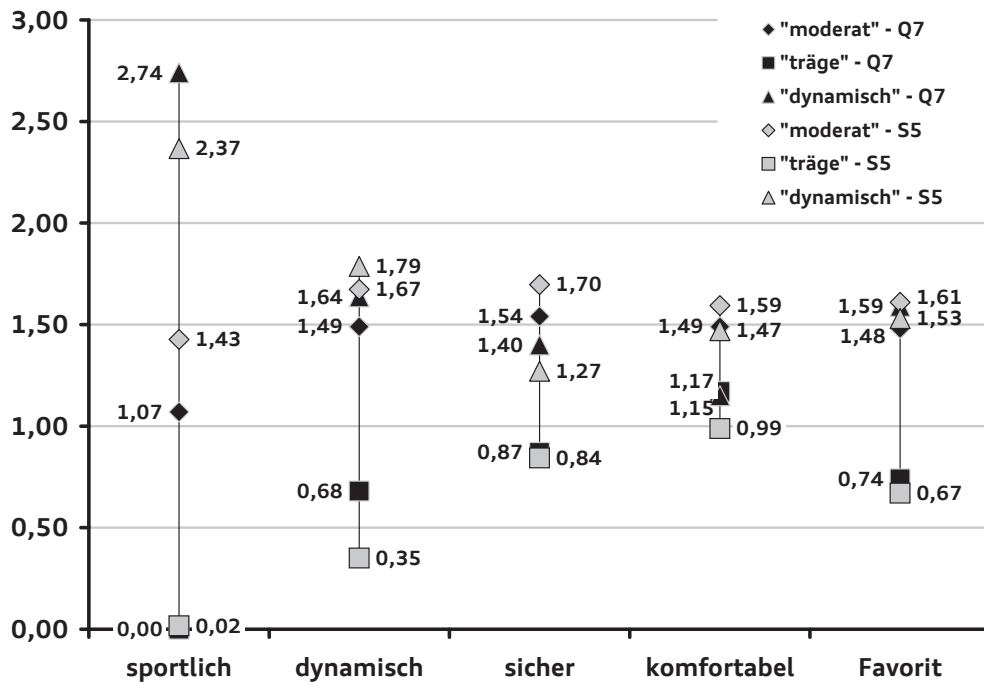


Abbildung 5.14: Skalen des Manövers Überholen

lich, dass es in der Eigenschaft Sportlichkeit eine sehr klare Abstufung zwischen den drei Applikationen gibt und die Fahrzeugklasse praktisch keinen Einfluss auf die Bewertung hat. So wird die Applikation „dynamisch“ als sehr sportlich, die Applikation „moderat“ als mäßig sportlich und die Applikation „träge“ also völlig unsportlich eingestuft.

In der Eigenschaft Dynamik werden die Applikationen „dynamisch“ und „moderat“ gleichwertig eingestuft und erfüllen dieses Kriterium recht gut. Die Applikation „träge“ bekommt in dem Kriterium Dynamik eine noch vorhandene, aber geringe Zustimmung. Für die beiden Studien können keine Unterschiede erkannt werden.

Im Kriterium Sicherheit kann eine geringe Abstufung von sicher bis mäßig sicher über die Reihenfolge „moderat“, „dynamisch“ und „träge“ festgestellt werden, wobei eine Unterscheidung zwischen den beiden Erstgenannten nicht zwingend erfolgen muss. Die Fahrzeugklasse hat wiederum keinerlei Einfluss auf das Urteil der Probanden.

Bei der Eigenschaft Komfort gibt es praktisch keine Unterscheidung zwischen den drei Applikationen und zwischen den beiden Fahrzeugklassen. Dies lässt darauf schließen, dass der Bereich, in dem das Systemverhalten für das Manöver Überholen als komfortabel empfunden wird, relativ groß ist.

Ein vergleichbares Verhalten wie beim Kriterium Dynamik kann auch beim Kriterium Favorit festgestellt werden. So bekommt die Applikation „träge“ die geringste Zustimmung und die Applikationen „moderat“ und „dynamisch“ eine identisch, hohe Wertung ohne jeweiligen Einfluss der Fahrzeugklasse.

Zusammenfassend lässt sich beim Manöver Überholen feststellen, dass die „sportliche“ und die „moderate“ Applikation bei drei von vier Eigenschaften vor der Applikation „träge“ liegen, sich nur in der Sportlichkeit unterscheiden und auch als Favoriten gewählt wurden.

### **Reaktion auf Einscherer**

Die Abbildung 5.15 zeigt die Skalenwerte des Manövers Reaktion auf Einscherer. Aufgrund technischer Probleme variierte das Verhalten des Systems und damit das zu bewertende Verhalten bei Studie II (S5) bei diesem Manöver sehr stark. Um jedoch auch hier ein Sollverhalten zu definieren, werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur die Daten der Studie I (Q7) betrachtet. Es wird dementsprechend angenommen, dass die Bewertungen nicht von der Fahrzeugklasse abhängen.

Bei der Eigenschaft Sportlichkeit ist eine Abstufung von der Applikation „moderat“ zu den gleichwertigen und auch noch als sportlich empfundenen Applikationen „sicherheitsbetont“ und „dynamisch“ festzustellen.

Bei sehr exakter Unterscheidung der Skalen können beim Kriterium Dynamik die beiden Applikationen „sicherheitsbetont“ und „dynamisch“ gleichwertig und geringfügig besser als die Applikation „moderat“ eingestuft werden.

Die Frage nach dem Sicherheitsempfinden der Probanden führte wieder zu einem sehr eindeutigen Ergebnis. So wird die Applikation „dynamisch“ vor die Applikation „sicherheitsbetont“ und diese wiederum sehr deutlich vor die Applikation „moderat“ gewählt. Bei der Eigenschaft Komfort lässt sich dieses Phänomen noch deutlicher feststellen. Hier gibt es eine Rangfolge mit ziemlich gleichmäßigen Abständen von gar nicht komfortabel bei der Applikation „moderat“ über mäßig komfortabel bei der Applikation „sicherheitsbetont“ bis zum Optimum durch die Applikation „dynamisch“.

Ein ähnliches Ergebnis, jedoch mit geringeren Maximalwerten, zeigt sich beim Kriterium Favorit. So bekommt hier die Applikation „moderat“ eine noch vorhandene, aber



## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

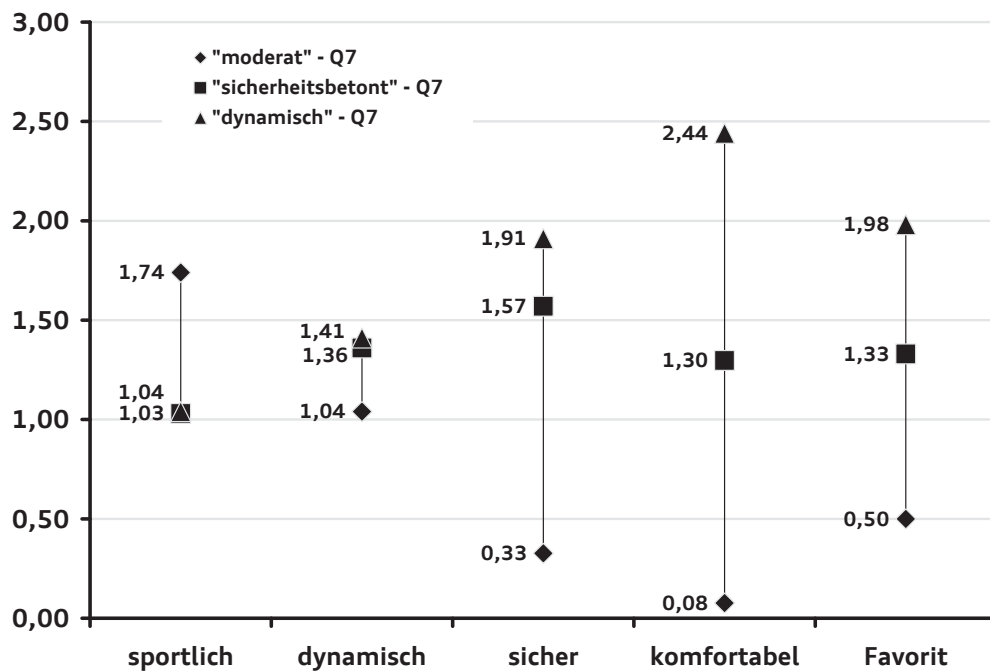


Abbildung 5.15: Skalen des Manövers Reaktion auf Einscherer

recht geringe Zustimmung. Die Applikation „sicherheitsbetont“ bekommt eine mäßige und die Applikation „dynamisch“ die höchste Bewertung.

Beim Manöver Reaktion auf Einscherer lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Applikation „moderat“ außer im Kriterium Sportlichkeit praktisch gar nicht den Wünschen der Probanden entspricht. Außerdem kommt die Applikation „dynamisch“ immer vor die Applikation „sicherheitsbetont“.

### Reaktion auf Ausscherer

Zunächst werden wieder alle Skalenwerte in Abbildung 5.16 anschaulich zusammengefasst.

Die Graphik zeigt, dass es im Kriterium Sportlichkeit eine deutliche, relativ gleichmäßig verteilte Abstufung zwischen den drei Applikationen gibt. Hierbei zeigt die Applikation „dynamisch“ anscheinend ein optimales Verhalten. Die Applikation „vorausschauend“ erhält eine mäßige Bewertung und die Applikation „träge“ wird als kaum sportlich wahrgenommen. Ein Zusammenhang der Bewertung zur Fahrzeugklasse kann nicht nachgewiesen werden.

### 5.3 Messergebnisse

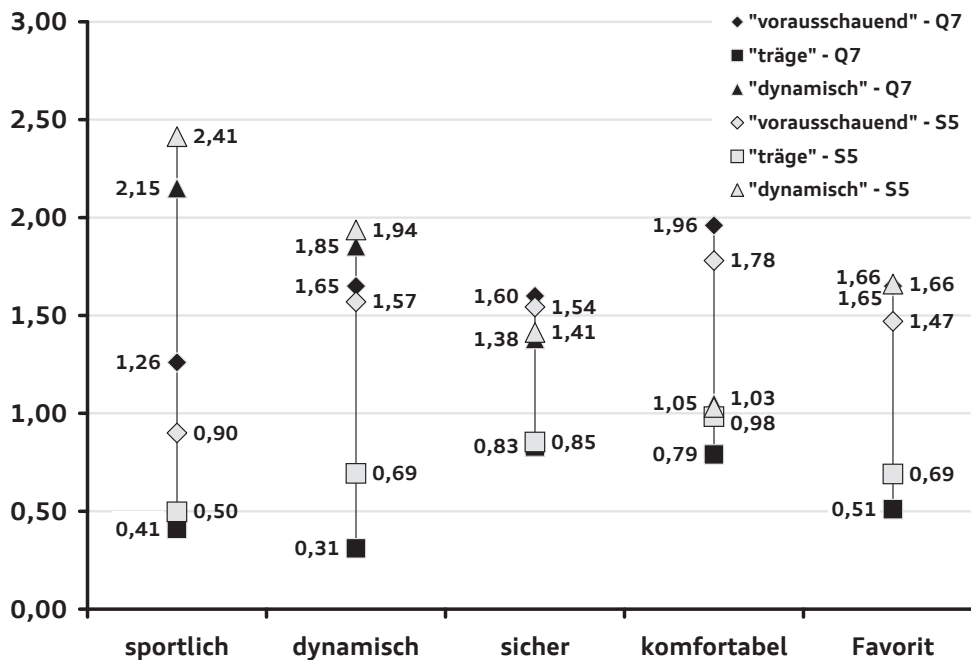


Abbildung 5.16: Skalen des Manövers Reaktion auf Ausscherer

In der Eigenschaft Dynamik kann eine ähnliche Bewertung wie beim Manöver Überholen beobachtet werden. Die Applikationen „dynamisch“ und „vorausschauend“ werden gleichwertig eingestuft und erfüllen dieses Kriterium recht gut. Die Applikation „träge“ bekommt wieder eine noch vorhandene, aber geringe Zustimmung. Für die beiden Studien können keine Unterschiede erkannt werden.

Was das Kriterium Sicherheit betrifft, existiert hier keine Applikation, welche sehr stark befürwortet oder abgelehnt wird. Die beiden Applikationen „vorausschauend“ und „dynamisch“ erhalten jedoch eine etwas bessere Bewertung als die Applikation „träge“. Für die beiden Studien ist kein Unterschied erkennbar.

Im Kriterium Komfort gibt es praktisch keine Unterscheidung zwischen den Applikationen „dynamisch“ und „träge“. Beide werden als mäßig komfortabel empfunden. Die Applikation „vorausschauend“ wird hingegen als sehr komfortabel bewertet. Auch hier gibt es keine Abhängigkeit zur Fahrzeugklasse.

Zusammenfassend werden beim Manöver Reaktion auf Ausscherer die beiden Applikationen, „dynamisch“ und „vorausschauend“ als Favoriten gesehen und auch so in den einzelnen Eigenschaften bewertet. Beim Kriterium Sportlichkeit gibt es jedoch zusätzlich noch eine Abstufung zwischen diesen beiden Applikationen. Die Applikation „träge“ wird durchwegs schlecht bewertet.

### 5.3.2 Objektive Messgrößen

Die objektiven Messgrößen bzw. Kennwerte werden mit dem in Kapitel 5.2.5 vorgestellten Referenzmesssystem gemessen und mit der Referenztoolkette ermittelt. Es werden wieder die vier Manöver separat betrachtet, wobei zum Einen der zeitliche Verlauf ausgewählter Messgrößen dargestellt und zum Anderen auf markante Punkte hingewiesen wird und diese diskutiert werden. Für jedes Manöver wurde ein Startpunkt für  $t=0$  s definiert, welcher ebenfalls erläutert wird. Den Tabellen 5.4, 5.5, 5.6 und 5.7 können die exakten Messwerte, deren Standardabweichungen sowie die Anzahl auswertbarer Messfahrten entnommen werden. Die Werte werden zunächst für die zwei Studien mit dem Geländewagen (Audi Q7; Studie I) und dem sportlichen Mittelklassefahrzeug (Audi S5 Cabriolet; Studie II) jeweils nach Kennwert und dann nach Applikation sortiert. Außerdem wird durch eine statistische Analyse bewiesen, wie bzw. in welchen Kennwerten sich die unterschiedlichen Applikationen signifikant unterscheiden. Die dazu gehörenden Tabellen E.1 bis E.8 mit den exakten Werten der Prüfgröße, des Freiheitsgrads und des Signifikanzniveaus sowie des Mehrfachvergleichs nach Bonferroni sind im Anhang E zusammengefasst. Als Signifikanzniveau wird bei der Analyse ein lokales  $\alpha$ -Niveau (einzelne Hypothese) gleich 0,05 angenommen. Bei dem Mehrfachvergleich nach Bonferroni ergibt sich das angepasste globale  $\alpha$ -Niveau (gesamte Hypothesenfamilie) nach der Formel  $\alpha_{global} = \alpha_{lokal}/n$ . Aus  $\alpha_{lokal} = 0,05$  und  $n = 3$  folgt somit  $\alpha_{global} = 0,017$ . Da diese Anpassung jedoch durch die automatisierte Auswertung mit dem Statistikprogramm SPSS bereits berücksichtigt wird, können auch hier die in den Tabellen angegebenen Werte mit fünf Prozent verglichen werden (vgl. Bühner und Ziegler, 2009).

#### Auffahren auf Kolonne

Der longitudinale Differenzabstand bzw. die longitudinale EGO-Beschleunigung bzw. die longitudinale EGO-Geschwindigkeit werden in den Abbildungen 5.17 bzw. 5.18 bzw. 5.19 für das Manöver Auffahren auf Kolonne abgebildet. Als Startpunkt wurde ein Abstand von 200 m definiert, der deutlich vor dem Zeitpunkt (ca. 5 s) bzw. dem Abstand (ca. 135 m) liegt, ab dem sich die drei Applikationen unterscheiden.

Der Differenzabstand (Abb. 5.17) zeigt den relativen Abstand zwischen EGO und Target.

Aufgrund der unterschiedlichen Reaktion des Systems auf das Vorderfahrzeug kommt es bei den Applikationen „dynamisch“ und „moderat“ zu einem sehr starken Eintau-

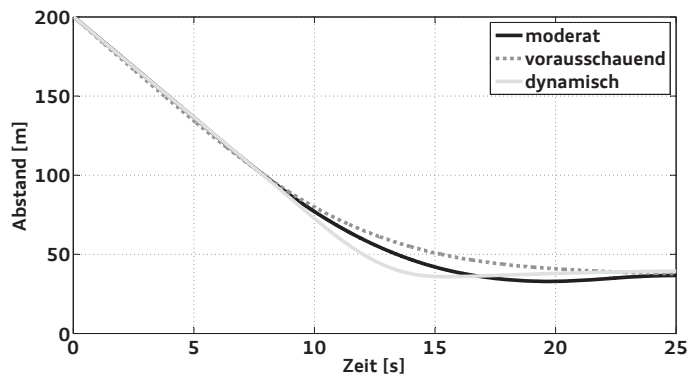


Abbildung 5.17: Objektive Messgrößen des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinaler Differenzabstand

chen<sup>3</sup>, wohingegen die Applikation „vorausschauend“ direkt auf den eingestellten Sollabstand von 40 m (Tachohalbe bei 80 km/h) einregelt. Dies geben auch die in Tabelle 5.4 zusammengefassten Messwerte wieder.

Das in Abbildung 5.18 dargestellte Beschleunigungsdiagramm verdeutlicht, dass die unterschiedlichen Applikationen zeitlich nacheinander und damit auch bei immer geringer werdendem Abstand den Verzögerungsvorgang einleiten.

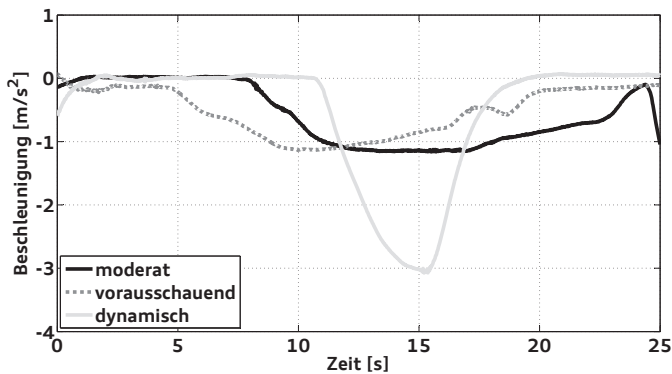


Abbildung 5.18: Objektive Messgrößen des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Beschleunigung

<sup>3</sup>Unter Eintauchen wird das kurzzeitige Unterschreiten des Sollabstandes bei einem Annäherungsvorgang verstanden.

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Diese Tatsache wird durch den Reaktionsabstand<sup>4</sup> wiedergegeben. Die sehr frühe Reaktion der Applikation „vorausschauend“ führt zu dem geringsten Gradienten, gefolgt von der Applikation „moderat“ und einem sehr großen Gradienten bei der Applikation „dynamisch“. Die Verzögerungsmaxima der Applikationen „moderat“ und „vorausschauend“ unterscheiden sich kaum, wohingegen die Applikation „dynamisch“ einen fast dreifachen Wert erreicht.

Abbildung 5.19 zeigt, wie sich die unterschiedlichen Reaktionsstrategien auf den Verlauf der Geschwindigkeit auswirken.

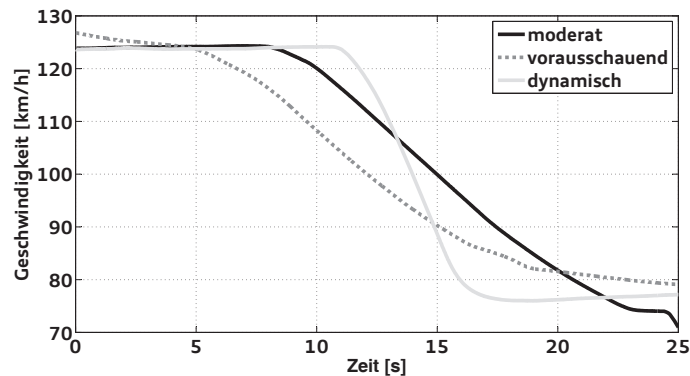


Abbildung 5.19: Objektive Messgrößen des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

So können auch hier wieder die unterschiedlichen Gradienten und Reaktionsabstände erkannt werden. Zusätzlich wird deutlich, was ein Eintauchvorgang zur Folge hat. Um auf den Sollabstand zu kommen, wird zunächst die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeuges unterschritten, bevor wieder auf die korrekte Geschwindigkeit beschleunigt wird.

In Ergänzung zu den bereits angesprochenen charakteristischen Kennwerten ist in der Tabelle 5.4 noch der Detektionsabstand angegeben. Dieser ist der Wert, zu dem das System dem Nutzer (meist) optisch anzeigt, dass es ein Zielfahrzeug erkannt hat.

Die Varianzanalyse und der Mehrfachvergleich nach Bonferroni (Tabelle E.1 und E.5) zeigen, dass sich die Applikationen deutlich von einander unterscheiden. Außer beim Kennwert maximale Verzögerung beim Vergleich der Studie I der Applikationen „moderat“ und „vorausschauend“ und beim Kennwert minimale Geschwindigkeit des Vergleichs „moderat“ und „vorausschauend“ der Studie II zeigen die restlichen Kennwerte signifikante Unterschiede.

<sup>4</sup>Messtechnisch ist dies der Abstand, bei dem ein definierter Verzögerungswert (hier:  $-0,2 \text{ m/s}^2$ ) dem Betrag nach überschritten wird.

Tabelle 5.4: Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Auffahren auf Kolonne

	Applikation	Anzahl		Mittelwert		Standardabweichung	
		Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Reaktions- abstand	moderat	64	40	107,74	117,22	17,2	9,88
	vorausschauend	62	48	139,18	136,03	35,42	21,73
	dynamisch	65	49	65,44	73,22	12,47	1,57
Minimal- abstand	moderat	64	40	32,50	26,93	2,61	3,88
	vorausschauend	62	48	37,76	37,62	2,67	2,42
	dynamisch	65	49	35,75	34,65	0,75	2,40
Detektions- abstand	moderat	64	40	121,71	125,75	10,15	8,16
	vorausschauend	62	48	157,11	157,44	31,68	25,01
	dynamisch	65	49	79,99	79,15	6,05	0,42
Maximale Verzögerung	moderat	64	40	-1,23	-1,23	0,06	0,21
	vorausschauend	62	48	-1,22	-1,51	0,13	0,28
	dynamisch	65	49	-3,08	-2,92	0,27	0,09
Minimale Geschwindig- keit	moderat	64	40	74,04	73,00	2,25	1,77
	vorausschauend	62	48	78,59	73,10	3,87	1,39
	dynamisch	65	49	75,41	69,00	1,12	0,99

## Überholen

Die graphischen Verläufe der Applikationen sind in den Abbildungen 5.20 und 5.21 dargestellt. Der Beginn dieses Manövers wird durch das Setzen des Blinkers und damit das Einleiten des Überholvorgangs definiert. Der Zeitpunkt  $t=0$  s ergibt sich somit durch diesen Trigger, wobei zusätzlich ein Vorlauf von 1 s berücksichtigt wird.

Auf die Darstellung des Verlaufs des longitudinalen Differenzabstandes kann hier verzichtet werden, da dieser keine zusätzlich notwendigen Informationen enthält.

Dem Verlauf der Beschleunigung in Abbildung 5.20 ist zu entnehmen, dass es unterschiedlich lange dauert, bis das System den Überholwunsch des Fahrers in eine Reaktion, also eine Beschleunigung, umsetzt.

Dies kann auch sehr deutlich den Werten der Reaktionszeit<sup>5</sup> der Tabelle 5.5 entnommen werden. Zusätzlich zu einer zeitlichen Staffelung erreichen die Applikationen in der Reihenfolge „dynamisch“, „moderat“ und „träge“ immer geringere Gradienten und Maximalwerte.

<sup>5</sup>Beim Manöver Überholen ist die Reaktionszeit definiert als die Zeit, die vom Setzen des Blinkers bis zum Überschreiten einer definierten Beschleunigung vergeht (hier:  $0,4 \text{ m/s}^2$ ).

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

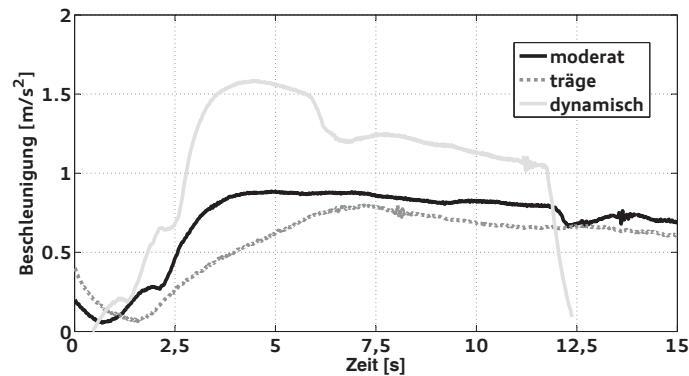


Abbildung 5.20: Objektive Messgrößen des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Beschleunigung

Der unterschiedliche Verlauf der Beschleunigung hat naturgemäß unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile zur Folge (Abb. 5.21).

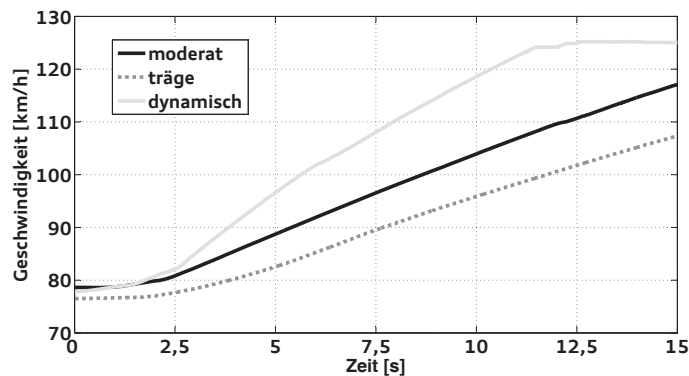


Abbildung 5.21: Objektive Messgrößen des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

So kommt nur die Applikation „dynamisch“ in dem hier dargestellten Zeitausschnitt auf die eingestellte Wunschgeschwindigkeit. Die Applikationen „moderat“ und „träge“ zeigen einen fast parallelen Verlauf.

Als letzter interessanter Kennwert kann der Tabelle 5.5 die Überholzeit entnommen werden. Dies ist die Zeitspanne, welche zwischen dem Überschreiten der definierten Beschleunigung und dem Erreichen eines vorzugebenden Differenzabstandes vergeht (hier: 0 m).

Die Tabellen E.2 und E.6 fassen wieder die Varianzanalyse sowie den Mehrfachvergleich zusammen. Die Kennwerte maximale Beschleunigung und Reaktionszeit unter-

Tabelle 5.5: Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Überholen

	Applikation	Anzahl		Mittelwert		Standardabweichung	
		Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Maximale Beschleunigung	moderat	68	61	0,90	0,92	0,01	0,03
	träge	67	61	0,78	0,81	0,10	0,15
	dynamisch	61	58	1,56	1,61	0,09	0,08
Überholzeit	moderat	68	61	11,91	12,23	0,75	3,94
	träge	67	61	13,43	13,54	0,91	2,76
	dynamisch	61	58	9,39	9,03	0,72	2,68
Reaktionszeit	moderat	68	61	2,58	3,00	0,65	1,44
	träge	67	61	3,28	3,51	0,63	1,71
	dynamisch	61	58	1,67	1,29	0,50	0,91

scheiden sich bei allen Applikationen signifikant. Der Kennwert Überholzeit ist außer beim Vergleich „moderat“ mit „träge“ der Studie II ebenfalls signifikant unterschiedlich. Die Applikationen sind somit deutlich von einander abzugrenzen.

### Reaktion auf Einscherer

Wie bereits in Kapitel 5.3.1 erwähnt, können bei diesem Manöver auf Grund technischer Probleme nur die Ergebnisse der Studie I (Q7) analysiert werden. In den Abbildungen 5.22, 5.23 und 5.24 sind die jeweiligen Verläufe der Applikationen für das Manöver Reaktion auf Einscherer abgebildet.

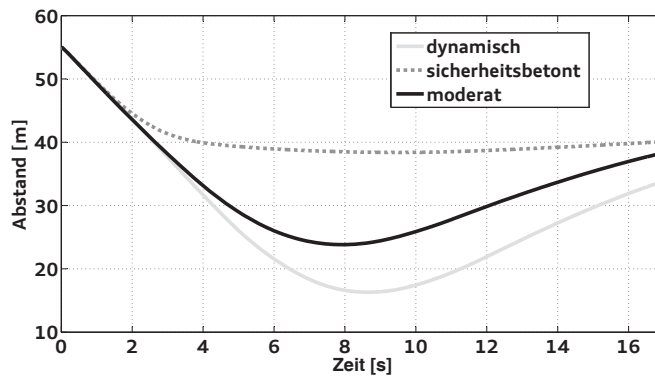


Abbildung 5.22: Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinaler Differenzabstand



## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Als Startpunkt wurde ein Abstand von 55 m definiert, der ca. 1 s vor dem Zeitpunkt liegt, ab dem sich die drei Applikationen unterscheiden. Ähnlich wie beim Manöver Auffahren auf Kolonne wird das unterschiedliche Systemverhalten an der Eintauchtiefe sehr deutlich. Die Applikation „sicherheitsbetont“ lässt kein Eintauchen zu und regelt direkt auf den eingestellten Abstand Tachohalbe, wohingegen die beiden Applikationen „moderat“ und „dynamisch“ dem Target-Fahrzeug sehr nahe kommen (Abb. 5.22).

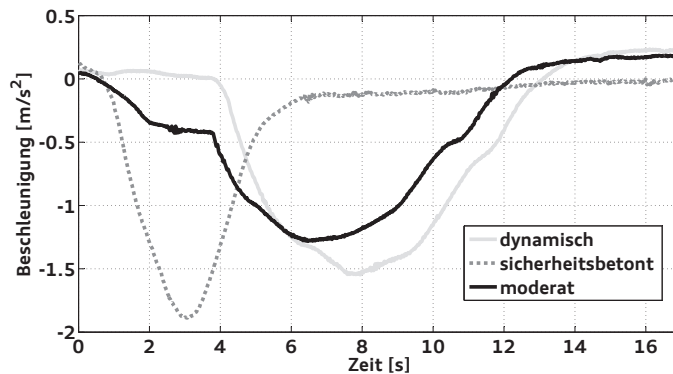


Abbildung 5.23: Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung

Dieses Verhalten wird durch die Beschleunigungsverläufe, die in Abbildung 5.23 dargestellt sind, bestätigt. Obwohl sowohl die Applikation „moderat“ als auch die Applikation „sicherheitsbetont“ sehr früh (in der Abbildung nach unter 1 s) auf das einscherende Fahrzeug reagieren, ist der Gradient der Applikation „moderat“ so gering, dass die Differenz des Kennwerts Reaktionszeit ca. 3 s beträgt.

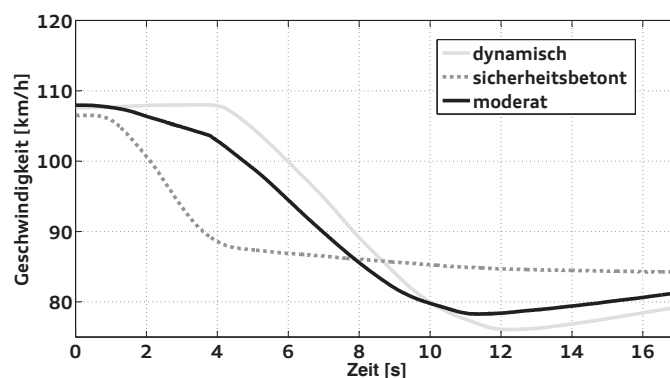


Abbildung 5.24: Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

### 5.3 Messergebnisse

Die Applikation „dynamisch“ reagiert erst, wenn der Einscherer den Spurwechsel vollständig abgeschlossen hat. Die Maximalwerte der Verzögerungen unterscheiden sich bei diesem Manöver nur gering (ca.  $0,6 \text{ m/s}^2$ ). Der Geschwindigkeitsverlauf verdeutlicht wieder die Folgen des Eintauchens (Abb. 5.24). Die Applikation „sicherheitsbetont“ nähert sich der Zielgeschwindigkeit von oben und unterschreitet diese nie. Im Gegensatz dazu müssen die Applikationen „moderat“ und „dynamisch“ nach Erreichen der minimalen Geschwindigkeit beschleunigen und brauchen demnach wesentlich länger, bis sich wieder eine stationäre Folgefahrt einstellt.

Tabelle 5.6: Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Reaktion auf Einscherer

	Applikation	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung
		Studie I	Studie I	Studie I
Reaktions- abstand	moderat	59	33,37	3,15
	sicherheitsbetont	60	47,67	2,41
	dynamisch	54	27,38	3,51
Minimal- abstand	moderat	59	24,70	2,46
	sicherheitsbetont	60	38,52	1,03
	dynamisch	54	16,33	2,35
Reaktionszeit	moderat	59	4,18	0,71
	sicherheitsbetont	60	1,38	0,52
	dynamisch	54	4,87	0,69
Maximale Verzögerung	moderat	59	-1,26	0,12
	sicherheitsbetont	60	-1,87	0,13
	dynamisch	54	-1,52	0,19

Wie den Tabellen E.3 und E.7 zu entnehmen ist, zeigen alle Kennwerte signifikante Unterschiede zwischen den Applikationen.

#### Reaktion auf Ausscherer

Die jeweiligen Verläufe der Applikationen für das Manöver Reaktion auf Ausscherer sind in den folgenden Abbildungen 5.25 und 5.26 dargestellt. Der Beginn dieses Manövers wird durch den Ausschervorgang des Target-Fahrzeugs festgelegt.

Auf die Darstellung des Verlaufs des longitudinalen Differenzabstandes kann wie beim Manöver Überholen verzichtet werden, da dieser keine zusätzlichen Informationen liefert.

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

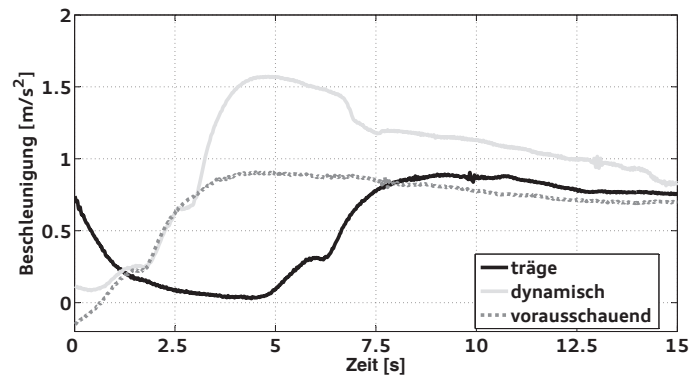


Abbildung 5.25: Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung

Der Beschleunigungsverlauf und damit die Reaktionszeit<sup>6</sup>, die in Abbildung 5.25 visualisiert werden, machen deutlich, dass die Zeit, bis das System die frei werdende Fahrspur erkennt, sehr stark von der Applikation abhängt.

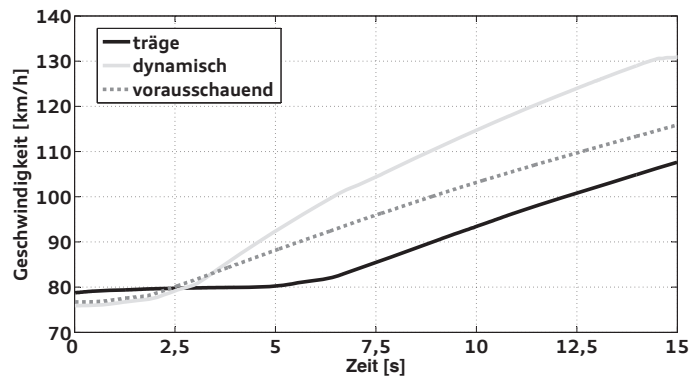


Abbildung 5.26: Objektive Messgrößen des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

Die beiden Applikationen „dynamisch“ und „vorausschauend“ beschleunigen bereits kurz nach dem Einleiten des Ausschervorgangs, wohingegen die Applikation „träge“ eine sehr lange Reaktionszeit hat. Diese Applikation beschleunigt erst, wenn das Target-Fahrzeug den Spurwechsel vollständig abgeschlossen hat. Bei den Maximalwerten liegen die beiden Applikationen „träge“ und „vorausschauend“ auf einem sehr ähnlichen

<sup>6</sup>Beim Manöver Reaktion auf Ausscherer ist dies die Zeit, die zwischen dem Beginn dieses Manövers und dem Überschreiten einer definierten Beschleunigung (hier:  $0,4 \text{ m/s}^2$ ) liegt.

Niveau. Die Applikation „dynamisch“ beschleunigt deutlich stärker. Die Gradienten sind bei diesem Manöver relativ ähnlich. Dieser Verlauf lässt sich selbstverständlich wieder anhand der Geschwindigkeit (Abb. 5.26) erkennen.

Die Geschwindigkeiten der beiden Manöver „dynamisch“ und „vorausschauend“ beginnen fast zeitgleich zu steigen. Der Verlauf des Manövers „dynamisch“ zeigt jedoch einen deutlich höheren Gradienten. Die Applikation „träge“ verläuft relativ parallel zur Applikation „vorausschauend“, jedoch wie bereits angesprochen mit einem zeitlichen Verzug.

Abschließend kann der Tabelle 5.7 noch die Überholzeit entnommen werden, welche wie beim Manöver Überholen definiert wird als die Zeitspanne, die zwischen dem Überschreiten der festgelegten Beschleunigung und dem Erreichen eines vorzugebenden Differenzabstandes vergeht (hier: 0 m).

Tabelle 5.7: Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Reaktion auf Ausscherer

	Applikation	Anzahl		Mittelwert		Standardabweichung	
		Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Maximale Beschleunigung	träge	60	54	0,91	0,93	0,09	0,03
	dynamisch	56	59	1,56	1,62	0,10	0,16
	vorausschauend	58	60	0,89	0,93	0,01	0,13
Überholzeit	träge	60	54	15,20	14,32	0,81	2,98
	dynamisch	56	59	9,56	10,62	0,51	4,73
	vorausschauend	58	60	11,32	11,80	0,33	2,88
Reaktionszeit	träge	60	54	5,03	5,62	0,77	3,57
	dynamisch	56	59	2,08	2,89	0,60	1,05
	vorausschauend	58	60	1,97	2,71	0,37	0,77

Die weiterführenden statistischen Analysen ergeben, dass bei der maximalen Beschleunigung des Vergleichs der Applikationen „träge“ mit „vorausschauend“ bei Studie I und Studie II bzw. dem Kennwert Überholzeit beim Vergleich der Applikationen „dynamisch“ und „vorausschauend“ bei Studie II kein signifikanter Unterschied nachzuweisen ist. Alle anderen Vergleiche sind signifikant und zeigen somit wieder einen deutlichen allgemeinen Unterschied zwischen den Applikationen (vgl. Tabelle E.4 und Tabelle E.8).

### Zusammenfassung der Bewertungen

Nach Auswertung und Analyse der subjektiven Bewertungen und der objektiven Kennwerte können nun die in Kapitel 5.1 aufgestellten Hypothesen überprüft werden.



## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Die in Hypothese I getroffene Aussage, für Fahrerassistenzsysteme können Eigenschaften definiert werden, anhand derer die Nutzer das System bewerten können, kann eindeutig bestätigt werden. Die ausgewählten Eigenschaften entsprechen den Probanden und die Ergebnisse zeigen sehr eindeutige Tendenzen. Auch das Ergebnis, dass keine Rangfolge ermittelt werden kann, entspricht dieser Aussage. Es bedeutet lediglich, dass der Bereich relativ groß ist, in dem das Systemverhalten für das entsprechende Manöver in der zu bewertenden Eigenschaft den Kundenwunsch erfüllt.

Hypothese II, dass die Fahrzeugklasse bzw. das Fahrzeugsegment einen Einfluss auf die Bewertung nach Hypothese I hat, kann hingegen nicht bestätigt werden. Dies erscheint im ersten Moment ein wenig überraschend, da bei Eigenschaften anderer Systeme wie beispielsweise der Härte des Fahrwerks, dem Motorsound oder der Sitzposition im Allgemeinen eine deutlich andere Erwartungshaltung der Kunden in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse vorliegt. Den Aussagen der Probanden konnte bei der Studie entnommen werden, dass es sich beim ACC eher um einen „Chauffeursmodus“ des Fahrzeugs handelt und dessen Ausprägung nicht in Zusammenhang mit der Fahrzeugklasse steht.

Da die Hypothesen eindeutig beantwortet werden konnten und sehr klare Ergebnisse aus den Studien gewonnen wurden, kann im weiteren Verlauf das Teilziel - Definition des Sollverhaltens - betrachtet werden.

## 5.4 Definition des Sollverhaltens durch Korrelation von objektiven Kennwerten und subjektiven Bewertungen

Ziel dieses Abschnittes ist, es über ein geeignetes Vorgehen ausgewählte, objektive Kennwerte und die subjektive Bewertung der Probanden zu verknüpfen, um den in Abbildung 4.1 vorgestellten Prozess umsetzen zu können. Hierfür müssen Bewertungsfunktionen entwickelt werden, die es erlauben, anhand eines gemessenen Kennwertes Aussagen zu einer Systemeigenschaft zu treffen.

Zunächst müssen repräsentative Kennwerte ausgewählt werden, wobei die Probanden nicht direkt nach physikalischen Kennwerten gefragt werden sollten bzw. können. Aus diesem Grund wurde den Probanden die Frage „Entspricht das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt mehr Ihrem eigenen Fahrstil?“ gestellt. Außerdem stellte der Versuchsleiter nach dem Ausfüllen der Bewertungsfragen die mündliche Frage: „Wieso finden Sie, dass die Fahrt 1 bzw. Fahrt 2 (je nach Ergebnis) mehr Ihrem eigenen Fahrstil entspricht?“ Diese Kombination an Fragen sollte zeigen, anhand welcher Kennwerte der Urteiler Fahrerassistenzsysteme auf seiner eigenen Skala bewertet (vgl. Kapitel 5.2.5). Die Mehrzahl aller Probanden beantworteten diese Frage bei den Manövern Auffahren auf Kolonne und Reaktion auf Einscherer mit der unterschiedlichen Verzögerung sowie dem Abstand zum Target-Fahrzeug beim Einsetzen dieser Verzögerung. Bei den Manövern Überholen und Reaktion auf Ausscherer waren die häufigsten Antworten die Stärke und der Zeitpunkt der Beschleunigung. In Tabelle 5.8 sind die Ergebnisse, in Form der relativen Häufigkeit der genannten Antworten aller Probanden, dargestellt.

Die Aussagen erlauben es nun nicht, wie in Kapitel 4 vorgestellt, für jedes Manöver und jede Eigenschaft eine zweidimensionale Bewertungsfunktion anhand eines Kennwertes zu entwickeln. Vielmehr muss eine dreidimensionale Bewertungsfunktion über der Fläche der Kennwerte Beschleunigung bzw. Verzögerung und (Reaktions-) Abstand bzw. (Reaktions-) Zeit aufgespannt werden.

Im Folgenden werden die Kennwerte Beschleunigung und Verzögerung mit Dynamik und die Kennwerte Reaktionsabstand und Reaktionszeit mit Reaktion umschrieben. In diese Dynamik-Reaktions-Ebene werden die gemessenen und berechneten Mittelwerte der Kennwerte eingetragen und anschließend wird eine möglichst kleine Ellipse, welche jeweils die drei Punkte umschließt, ergänzt. Durch eine grafische Kodierung von dunkel bis weiß wird visualisiert, inwieweit die Eigenschaft an der jeweiligen Stelle erfüllt ist. Wobei dunkel für „sehr“ und weiß für „gar nicht“ steht. Der schwarze Bereich der Ebenen muss nach dem jetzigen Stand der Forschung als unbekannt akzeptiert werden. Aufgrund der Erfahrungen aus den Studien, sowie der Auswertung der subjektiven Ur-

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Tabelle 5.8: Kennwerte der Probanden

	Kennwert	Häufigkeit
Auffahren auf Kolonne	Verzögerung	34%
	Abstand	49%
	Sonstiges	13%
	Enthaltung	3%
Überholen	Beschleunigung	45%
	Zeit	37%
	Sonstiges	13%
	Enthaltung	4%
Reaktion auf Einscherer	Verzögerung	27%
	Abstand	51%
	Sonstiges	21%
	Enthaltung	1%
Reaktion auf Ausscherer	Beschleunigung	49%
	Zeit	40%
	Sonstiges	11%
	Enthaltung	0%

teile der Eigenschaft Dynamik wird diese im weiteren Verlauf der Arbeit nicht für die Definition des Sollverhaltens verwendet.

### 5.4.1 Bewertungsfunktionen des Manövers Auffahren auf Kolonne

Die Abbildung 5.27(a) zeigt die Kombination aus Messwerten und Bewertung in der Eigenschaft Sportlichkeit. Der Grafik ist zu entnehmen, dass ein sportliches Verhalten mit einer starken Beschleunigung und einer späten Reaktion verbunden ist. Je schwächer die Dynamik und je früher sie einsetzt desto unsportlicher wird das Systemverhalten. Ein anderes Verhalten ist der Darstellung der Bewertungsfunktion der Eigenschaft Sicherheit zu entnehmen (Abb. 5.27(b)). Für ein hohes Sicherheitsempfinden ist eine frühe und schwache Ausprägung wichtig. Der Bereich des Reaktionsabstandes innerhalb dessen das Systemverhalten als sicher empfunden wird, ist relativ groß. Je später und stärker das System auf das Vorderfahrzeug reagiert, desto unsicherer wird dies wahrgenommen.

Die Bewertung für die Eigenschaft Komfort ist identisch der Eigenschaft Sicherheit. Eine frühe bis mittlere Reaktion bei schwacher Dynamik ist komfortabel, je später und stärker gebremst wird desto unkomfortabler wird es.

## 5.4 Definition des Sollverhaltens

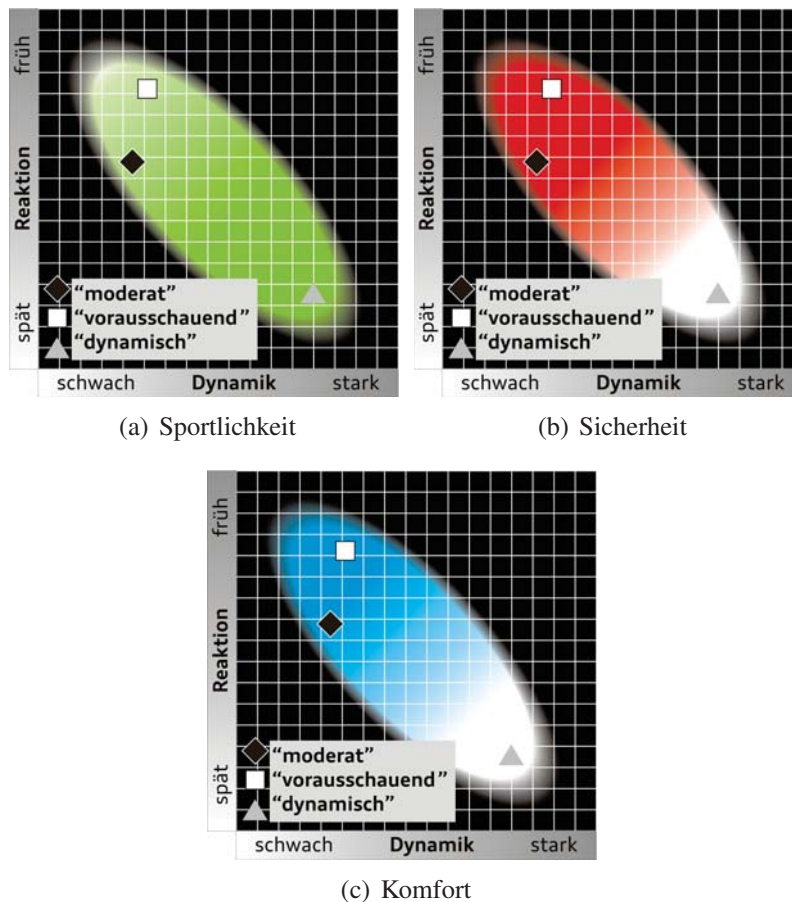


Abbildung 5.27: Objektive Bewertung des Manövers Auffahren auf Kolonne

Zusammenfassend lässt sich für das Manöver Auffahren auf Kolonne folgendes feststellen. Für eine hohe Akzeptanz des Systems sind vor allem die beiden Eigenschaften Komfort und Sicherheit wichtig. Das System soll durch eine Reaktion rechtzeitig zurückmelden, dass es das Target-Fahrzeug erkannt hat und „weiß“, dass es bremsen muss. Ein sportliches Verhalten wird hier nicht gewünscht.

### 5.4.2 Bewertungsfunktionen des Manövers Überholen

In den Abbildungen 5.28(a), 5.28(b) und 5.28(c) sind die jeweiligen Bewertungen für das Manöver Überholen dargestellt. Die Eigenschaft Sportlichkeit zeigt einen deutli-



## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

chen diagonalen Zusammenhang. Eine starke Dynamik verbunden mit einer frühen Reaktion wird als sportlich empfunden. Je schwächer und gleichzeitig auch später das System reagiert, desto unsportlicher wird es, wobei die Grenze von mäßig sportlich auf völlig unsportlich sehr scharf ist.

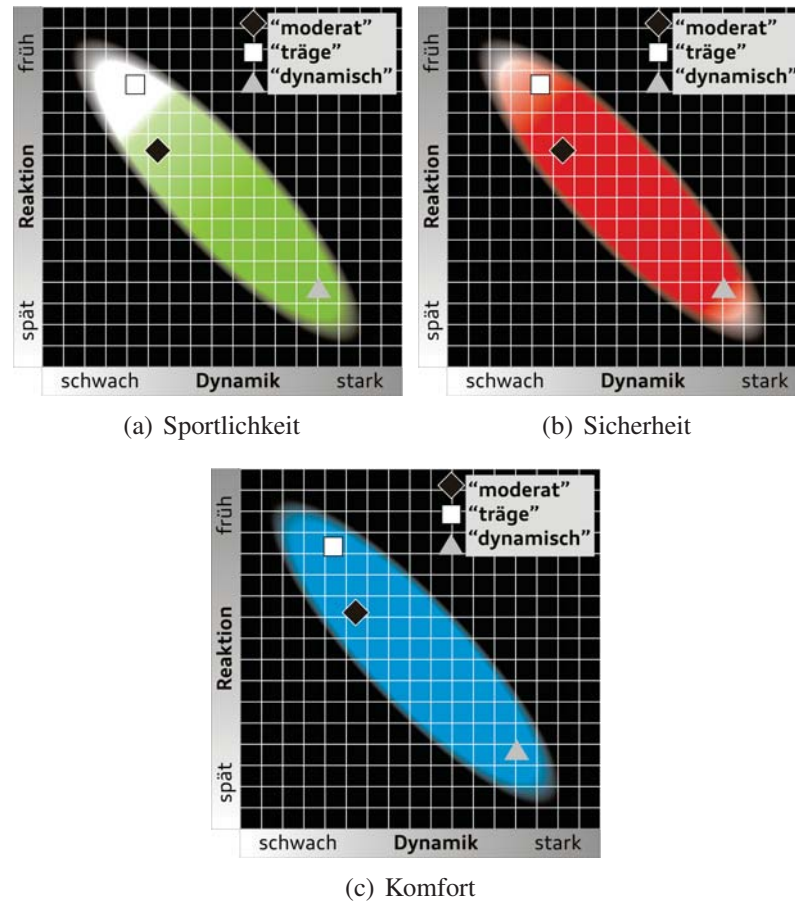


Abbildung 5.28: Objektive Bewertung des Manövers Überholen

Der in Abbildung 5.28(b) als sicher dargestellte Bereich der Ellipse ist sehr groß. Das Optimum liegt bei schwacher bis mittlerer Dynamik und mäßiger bis früher Reaktion. Bei zu früher und starker Dynamik nimmt die Bewertung langsam ab, wobei die Richtung spät und schwach einen stärkeren Einfluss hat.

Der Komfortbereich (Abb. 5.28(c)) erstreckt sich über den gesamten Bereich der Ellipse.

## 5.4 Definition des Sollverhaltens

Beim Manöver Überholen haben die beiden Eigenschaften Sportlichkeit und Sicherheit den größten Einfluss auf den Favoriten. Führt der Nutzer einen Überholvorgang aus, soll dies das System mit einer relativ prompten und mäßig starken Beschleunigung umsetzen.

Eine optimale Systemauslegung liegt im Bereich Mitte/unten der Bewertungsfunktionen.

### 5.4.3 Bewertungsfunktionen des Manövers Reaktion auf Einscherer

Die Verknüpfung der Messgrößen und der subjektiven Bewertung der Eigenschaft Sportlichkeit ist in Abbildung 5.29(a) dargestellt.

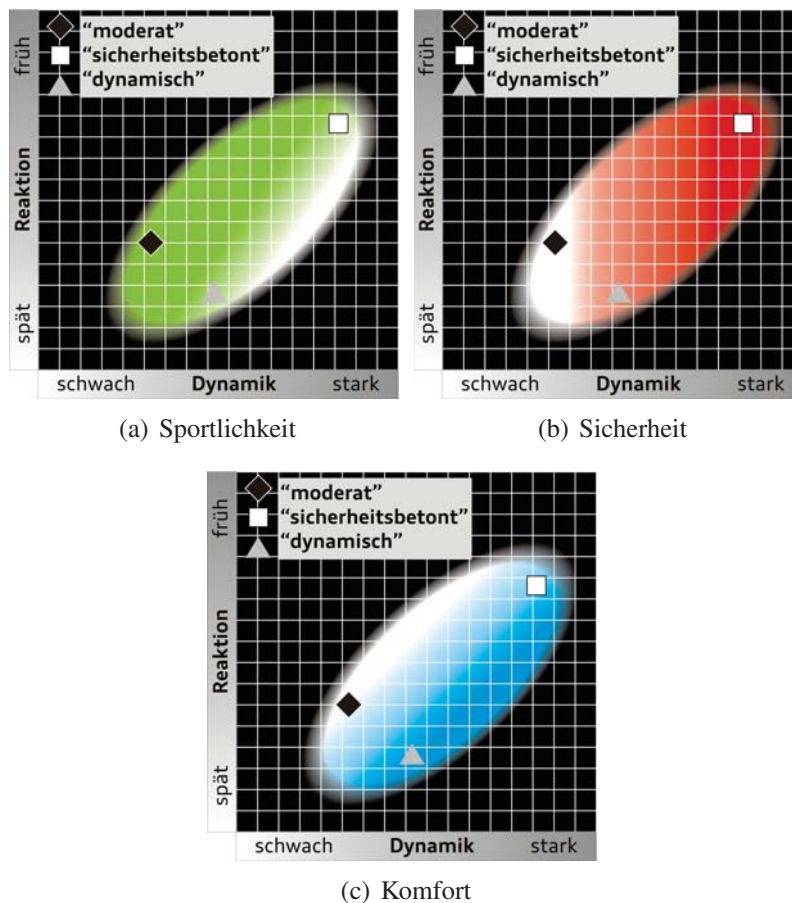


Abbildung 5.29: Objektive Bewertung des Manövers Reaktion auf Einscherer

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

Eine mittlere Reaktion mit schwacher bis mittlerer Dynamik ist sportlich. Die späte Reaktion verbunden mit einer mittleren Dynamik ist genauso wie die frühe Reaktion mit starker Dynamik mäßig sportlich. Eine weitere parallele Verschiebung in Richtung starke Dynamik verschlechtert diese Eigenschaft weiter. Eine sichere Systemausprägung zeigt eine frühe Reaktion mit starker Verzögerung. Reagiert das System spät und mit mittlerer Dynamik ist dies mäßig sicher. Eine späte bis mittlere Reaktion mit schwacher Dynamik ist jedoch völlig unsicher (Abb. 5.29(b)).

Abbildung 5.29(c) zeigt das Ergebnis bei der Frage nach dem Komfort. Eine mittlere Dynamik in Kombination mit einer späten Reaktion ist komfortabel. Ausgehend von diesem rechten/unteren Teil wird die Systemausprägung in Richtung oben/links immer unkomfortabler, wobei bereits bei mittlerer bis schwacher Dynamik und mittlerer bis später Reaktion das System völlig unkomfortabel ist.

Beim Manöver Reaktion auf Einscherer wird wie beim Manöver Auffahren auf Kolonne der Favorit maßgeblich von den Eigenschaften Sicherheit und Komfort beeinflusst. Eine sportliche Ausprägung ist nicht gewünscht.

Ziel sollte es sein, die Applikation so abzustimmen, dass die Messwerte im Bereich rechts/Mitte mit Tendenz nach oben liegen.

### 5.4.4 Bewertungsfunktionen des Manövers Reaktion auf Ausscherer

Die Bewertungen für das Manöver Reaktion auf Ausscherer ähneln dem Manöver Überholen stark. Auch hier ist, wie in Abbildung 5.30(a) dargestellt eine sportliche Applikation mit einer frühen und starken Dynamik verbunden. Je weiter sich die Applikation nach links/oben verschiebt, desto unsportlicher wird sie.

Dieses Verhalten zeigt sich ebenfalls bei der Bewertung der Eigenschaft Sicherheit (Abb. 5.30(c)). Anders als bei dem Manöver Überholen bleibt die Bewertung jedoch auch bei starker Dynamik und früher Reaktion auf einem hohen Niveau.

Die Eigenschaft Komfort wird am besten bei einer schwachen Dynamik und frühen Reaktion erfüllt. Die Abbildung 5.30(c) zeigt zusätzlich, dass eine schwache Dynamik verbunden mit einer späten Reaktion genauso wie eine starke Dynamik mit früher Reaktion nur mäßig komfortabel ist.

Ist eine höhere Wunschgeschwindigkeit eingestellt, will der Nutzer, dass das System auf den Ausscherer möglichst schnell reagiert. Wie stark dabei die Beschleunigung ausfallen soll, kann nicht eindeutig festgestellt werden. Hier wird die starke Beschleuni-

## 5.4 Definition des Sollverhaltens

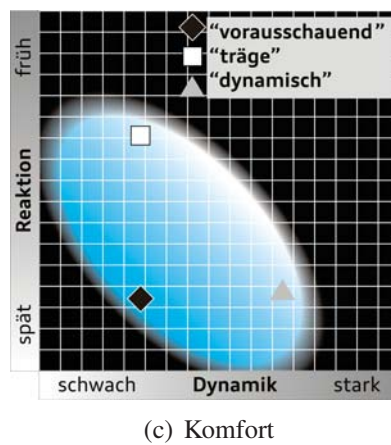
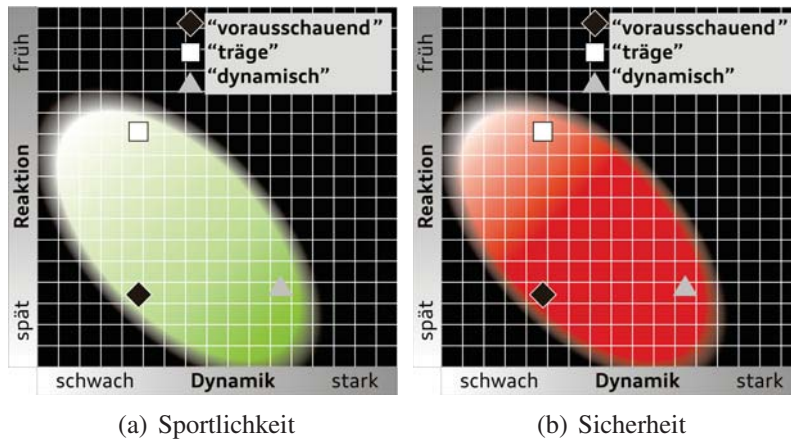


Abbildung 5.30: Objektive Bewertung des Manövers Reaktion auf Ausserer

gung als sportlicher und die schwache Beschleunigung als komfortabler empfunden. Dies scheint dann von dem individuellen Fahrer abzuhängen. Eine optimale Systemauslegung liegt dementsprechend im unteren Bereich der Bewertungsfunktionen.

## 5.5 Validierung der Methodik am Beispiel von ACC im neuen Audi A8

In diesem Kapitel soll die Gültigkeit der in den Kapiteln 5.3 und 5.4 erarbeiteten Bewertungsfunktionen überprüft werden. Hierfür wird erneut eine Untersuchung von ACC mit den bereits vorgestellten Messmethoden durchgeführt. Es werden wieder drei Applikationen für jedes Manöver dargestellt. Betrachtet werden jedoch nur die beiden Manöver Auffahren auf Kolonne und Reaktion auf Ausscherer.

So müssen zunächst die Applikationen objektiv vermessen werden, um mithilfe der Kennwerte Dynamik und Reaktion sowie den Bewertungsfunktionen eine Vorhersage über das subjektive Kundenempfinden treffen zu können. Aus diesem Grund war es auch nicht notwendig, dass die Applikationen in ihrem Verhalten möglichst denen der ersten beiden Studien entsprechen. Außerdem werden zur Validierung der getroffenen Vorhersagen die subjektiven Urteile der Probanden mittels einer Studie ermittelt und in Rangfolgen gebracht. An der Studie nahmen erneut 36 Probanden der drei gleich verteilten Altersgruppen *jünger* (18 bis 29 Jahre), *mittel* (30 bis 49 Jahre) und *älter* (ab 50 Jahre) teil. Die Gruppen wurden ebenfalls wieder aus je sechs Frauen und sechs Männern gebildet. Bei dieser Validierung sollte eine neue Stichprobe gebildet werden. Bis auf zehn Probanden (28 %) konnten die Personen ausgetauscht werden.

Die objektiven Messgrößen der Applikationen sind in den Tabellen 5.9 und 5.10 zusammengefasst.

Tabelle 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Reaktion auf Ausscherer (Validierung)

	Applikation	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung
Maximale Beschleunigung	I	49	1,01	0,04
	II	50	1,01	0,03
	III	50	1,55	0,15
Überholzeit	I	49	10,21	0,61
	II	50	9,89	0,63
	III	50	8,35	0,63
Reaktionszeit	I	49	4,07	0,30
	II	50	2,09	0,21
	III	50	0,09	2,15

In den Abbildungen 5.31 und 5.32 sind die Messwerte in die Dynamik-Reaktions-Ebene zusammen mit den Bewertungsfunktionen eingetragen. Wie bereits vorgestellt, visuali-

## 5.5 Validierung der Methodik am Beispiel von ACC im neuen Audi A8

Tabelle 5.10: Mittelwerte und Standardabweichungen des Manövers Auffahren auf Kolonne (Validierung)

	Applikation	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung
Reaktions- abstand	I	39	139,83	5,11
	II	41	138,76	7,08
	III	42	96,77	3,09
Minimal- abstand	I	39	25,64	2,58
	II	41	37,60	1,37
	III	42	19,70	0,91
Reaktionszeit	I	39	5,50	0,40
	II	41	5,58	0,52
	III	42	8,67	0,32
Maximale Verzögerung	I	39	-1,13	0,08
	II	41	-1,45	0,20
	III	42	-1,52	0,08
Minimale Geschwindig- keit	I	39	73,08	1,05
	II	41	76,73	3,22
	III	42	72,12	0,73

sieht hierbei die grafische Kodierung inwieweit die Eigenschaft an der jeweiligen Stelle erfüllt ist, wobei dunkel für „sehr“, weiß für „gar nicht“ und der Übergang für „mäßig“ steht.

Die Bewertung des Manövers Auffahren auf Kolonne lässt nun folgende Prädiktionen der Applikationen zu. Die Applikation „I“ zeigt ein mäßig sportliches und ein sehr sicheres wie auch komfortables Verhalten. Zu einer identischen Aussage kommt man bei Applikation „II“. Applikation „III“ liegt bei den Eigenschaften Sicherheit und Komfort im mäßigen Bereich und ist sehr sportlich.

Die ermittelten und normierten Skalen geben folgende Bewertung der Probanden wieder. Applikation „I“ erhält bei den Eigenschaften Sportlichkeit, Sicherheit und Komfort die Skalen 1,10, 1,42 und 1,51. Dies bedeutet, sie wird als mäßig sportlich, mäßig sicher und sehr komfortabel bewertet. Außer bei der Eigenschaft Sportlichkeit entspricht dies exakt der Prädiktion. Die Skalen der Applikation „II“ lauten 1,03, 1,80 und 1,75 und entsprechen somit einer mäßig sportlichen, sehr sicheren und sehr komfortablen Abstimmung. Dieses Ergebnis entspricht den Bewertungsfunktionen. Die letzte Applikation „III“ wird von den Probanden mit 1,69, 0,59 und 0,55 als sehr sportlich und jeweils mäßig sicher und komfortabel eingestuft. Auch dieses Ergebnis bestätigt die Korrektheit der Bewertungsfunktionen.

## 5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC

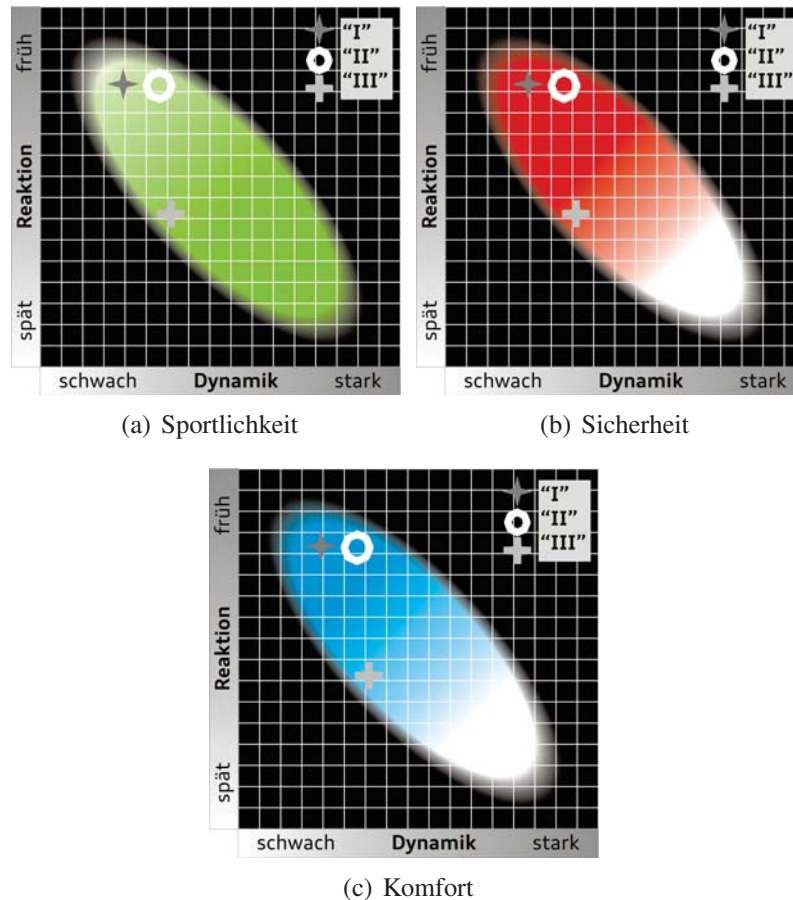


Abbildung 5.31: Objektive Bewertung des Manövers Auffahren auf Kolonne (Validierung)

Die Messwerte für das Manöver Reaktion auf Ausscherer bedeuten für die Eigenschaften der Applikation „I“ eine mäßig sportliche, mäßig sichere und ebenso mäßig komfortable Ausprägung. Bei Applikation „II“ kann ebenfalls eine mäßig sportliche, jedoch sehr sichere und sehr komfortable Bewertung vorhergesagt werden. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Applikation sehr nahe am Rand der Ellipse liegt und somit die Prädiktion Fehler aufweisen kann. Abschließend zeigt Applikation „III“ ein sehr sportliches, sehr sicheres und mäßig komfortables Verhalten.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Studie soll nun wieder die Korrektheit der Vorhersagen analysieren. Applikation „I“ wird von den Probanden folgendermaßen eingestuft. Mit 0,88 als mäßig sportlich, mit 1,08 als mäßig sicher und mit 1,18 als mäßig komfortabel. Dies entspricht exakt den Bewertungsfunktionen. Die Bewertung der Ap-

## 5.5 Validierung der Methodik am Beispiel von ACC im neuen Audi A8

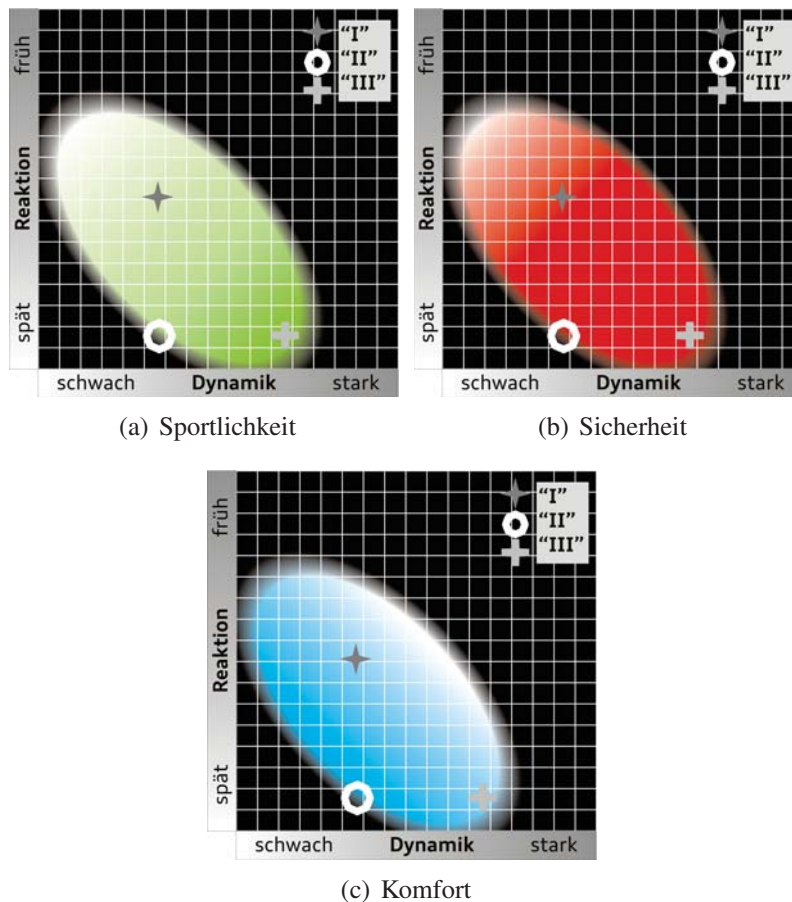


Abbildung 5.32: Objektive Bewertung des Manövers Reaktion auf Ausserer (Validierung)

plikation „II“ führte zu den Skalen 1,00, 1,27 und 1,34. Somit liegt nach dem Probandenurteil eine mäßig sportliche, mäßig sichere und mäßig komfortable Ausprägung vor. Wie bereits angeführt scheint die Einstufung im Grenzbereich der Ellipse nicht zu 100 % korrekt zu sein. Es kann angenommen werden, dass eine zu schwache Dynamik trotz früher Reaktion die Bewertung in der Eigenschaft Sicherheit verschlechtert. Applikation „III“ entspricht mit den Skalen 1,92, 1,46 und 1,30 wieder sehr gut der Vorhersage durch die Bewertungsfunktion.

In Kapitel 5 wurde ein Versuchskonzept erarbeitet und erläutert um ein eigenschaftsabhängiges Sollverhaltens von ACC zu entwickeln. Anschließend wurden die nach diesem Konzept gewonnenen Ergebnisse sowohl der subjektiven Bewertung als auch der objektiven Messungen vorgestellt. Die Ergebnisse erlaubten die Verknüpfung von harten





## *5 Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC*

und weichen Fakten. So existieren nun Bewertungsfunktionen, deren Gültigkeit, durch die in diesem Kapitel durchgeführten Validierungsstudie, mit sehr großer Übereinstimmung bestätigt werden konnten.

# 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

Aus den in der Motivation aufgeführten Anforderungen Qualitäts- und Komplexitätssteigerung sowie Kostenreduktion ist eine stärkere Integration der Simulation in den Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen eine logische Folge.

Durch die Analyse der unterschiedlichen Test- und Simulationstools sowie der Entwicklungsmethoden (vgl. Kapitel 2, Tabelle A.2 und Tabelle A.3) und der zusätzlichen Rahmenbedingung, dass in der Automobilindustrie viele Systeme, wie auch das ACC, nicht direkt beim Fahrzeughersteller (OEM), sondern bei einem externen Systemlieferanten entwickelt werden, zeigen hier Hardware in the Loop-Prüfaufbauten das größte Potential.

Aus diesem Grund soll im Folgenden ein Konzept für einen FAS-Domänen-HIL erarbeitet und beschrieben werden. Im letzten Abschnitt dieser Arbeit muss dann noch überprüft werden, ob die in Kapitel 5 erarbeiteten Kennwerte aus virtuell durchgeführten Testszenarien denen aus real gefahrenen Manövern entsprechen, um so die Bewertungsfunktionen in die virtuelle Entwicklung übertragen zu können.

## 6.1 Konzept und Systemaufbau eines FAS-Domänen-HILs

Ein Domänen-HIL ist ein auf ein Fachgebiet bzw. auf einen Themenbereich spezialisiertes Tool. In diesem Fall auf die funktionale Entwicklung bzw. Bewertung eines Fahrerassistenzsystems anhand des realen Steuergeräts. Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, können die Test- und Simulationswerkzeuge für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen in die Elemente *Umwelt*, *Fahrer*, *Fahrzeug* und *Fahrzeugsystem* unterteilt und anhand deren Ausprägungen klassifiziert werden. Abbildung 6.1 visualisiert an dieser Stelle noch einmal den funktionalen Aufbau des FAS-Domänen-HILs anhand dieser Elemente (farbliche Kodierung: grau  $\Rightarrow$  *simuliert*; schwarz  $\Rightarrow$  *real*).

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

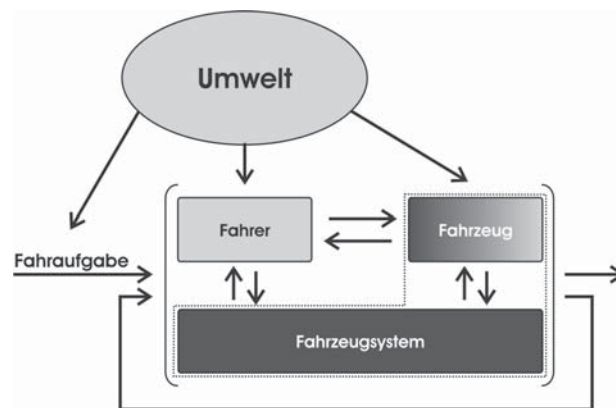


Abbildung 6.1: Funktionaler Aufbau des FAS-Domänen-HILs

**Fahraufgabe** Für ein Test- und Simulationswerkzeug ergibt sich die Fahraufgabe aus den definierten Testfällen. An dieser Stelle sind dies die bereits mehrfach angesprochenen fünf relevanten Manöver Stationärfahrt, Auffahren auf Kolonne, Überholvorgang, Reaktion auf Einscherer und Reaktion auf Ausscherer.

**Fahrer** Da, wie in Kapitel 3.1 bereits erläutert, Fahrerassistenzsysteme Teile der primären Fahraufgabe übernehmen, werden an den *Fahrer* in Form eines Fahrermodells keine großen Anforderungen gestellt. In den durchzuführenden Manövern übernimmt das eingesetzte Fahrerassistenzsystem ACC die Aufgaben der Längsführung komplett. Einzig das reproduzierbare Durchführen eines Spurwechsels, was hier jedoch durch das einfache Folgen einer vorgegebenen Trajektorie erfolgen muss, wird durch das Fahrermodell umgesetzt.

**Umwelt** Die Anforderungen an die Simulation der *Umwelt* sind, wie bei sehr vielen Simulationswerkzeugen, die größten. So müssen hier alle Elemente der *Umwelt*, wie der Straßenverlauf oder die Verkehrsteilnehmer, nachgebildet werden.

**Fahrzeug** Wie in Kapitel 2.1.2 vorgestellt kann das Element *Fahrzeug* alle Ausprägungen von rein real bis vollkommen simuliert haben. Bei dem hier vorgestellten FAS-Domänen-HIL wird ein vollständig simuliertes Fahrzeug eingesetzt. Da es sich bei den durchzuführenden Fahrmanövern um keine Situationen im physikalischen Grenzbereich eines Automobils handelt, sind die Anforderungen an das Fahrzeugmodell relativ gering. Zusätzlich zum eigentlichen Fahrzeugmodell müssen auch noch die für die Fahrerassistenzfunktion wichtigen, jedoch zum *Fahrzeug* gehörenden, Komponenten Restbussimulation, FAS-MMI sowie der Radarsensor (vgl. Kapitel 6.2) simuliert werden.

## 6.1 Konzept und Systemaufbau eines FAS-Domänen-HILs

**Fahrzeugsystem bzw. Fahrerassistenzsystem** Beim Fahrzeugsystem handelt es sich um das reale Steuergerät, mit den wie im realen Fahrzeug vorhandenen Schnittstellen.

Abbildung 6.2 stellt zunächst grob den technischen Aufbau sowie die Zugehörigkeit der Elemente *Umwelt*, *Fahrer*, *Fahrzeug* und *Fahrzeugsystem* zu den einzelnen Komponenten dar.

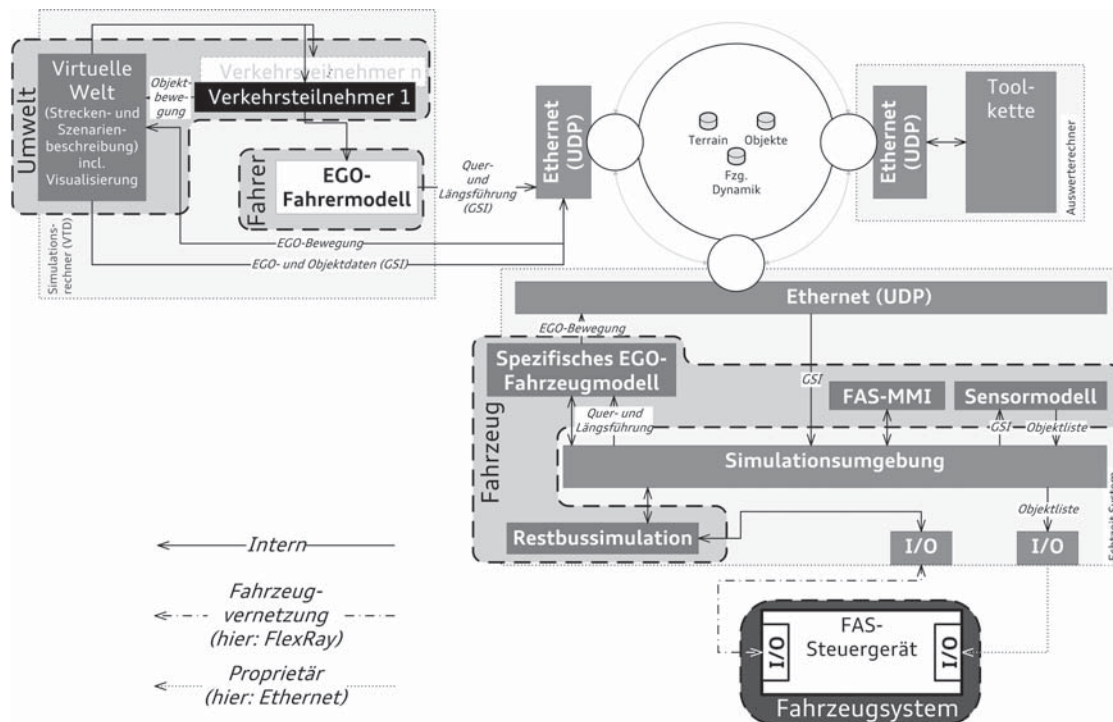


Abbildung 6.2: Technischer Aufbau des FAS-Domänen-HILs

Technisch besteht das System im Wesentlichen aus den vier Komponenten Simulationsrechner, Auswerterechner, Echtzeit System und dem zu untersuchenden FAS-Steuergerät. Die Kommunikation zwischen den beiden Rechnern und dem Echtzeit System erfolgt per Ethernet (UDP<sup>1</sup>). Das Steuergerät ist über die reale Fahrzeugvernetzung (hier: FlexRay) sowie eine zusätzliche proprietäre Schnittstelle, wie sie auch im realen Fahrzeug

<sup>1</sup>Das User Datagram Protocol ist ein spezielles (verbindungsloses) Transport-Protokoll zum Versenden von Daten.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

für die Applikation des Systems vorhanden ist (hier: XCP<sup>2</sup> over Ethernet), mit dem Echtzeit System verbunden. Durch diesen modularen Aufbau ist ein Austausch einzelner Komponenten sehr viel einfacher zu realisieren, was einen Umstieg z. B. auf ein Steuergerät eines anderen Fahrerassistenzsystems relativ problemlos ermöglicht.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten allgemein und konkret am umgesetzten Beispiel des ACC-Domänen-HILs näher betrachtet.

### 6.1.1 Simulationsrechner

Der Simulationsrechner beinhaltet die beiden Elemente *Umwelt* incl. Verkehrsteilnehmer sowie das Element *Fahrer*. Die hierfür eingesetzte Software **Virtual Test Drive** (VTD) ist eine in Kooperation von Audi, Volkswagen und der Firma Vires Simulationstechnologie entwickelte modulare Umgebungssimulation. Sie wird bereits in vielen Bereichen der Industrie als Standardtool eingesetzt (vgl. von Neumann-Cosel u. a., 2009; Miegler u. a., 2009).

In einem Preprocess werden die gewünschten Strecken im sogenannten Road Designer erstellt und im OpenDRIVE®-Format abgespeichert. Zur Festlegung des Szenarios werden auf die Strecke im Anschluss das EGO-Fahrzeug und die gewünschten Verkehrsteilnehmer (unterschiedliche Fahrzeugtypen oder Fußgänger) gesetzt, sowie deren Verhalten definiert. Sofern gewünscht können dem Fremdverkehr unterschiedlich parametrisierte Fahrermodelle zugewiesen und so ein realitätsnahes, nicht deterministisches Verkehrsverhalten dargestellt werden. Für die detaillierte Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen ist es jedoch meist zielführender, dem Fremdverkehr ein klar definiertes Verhalten „aufzuzwingen“. Dies wird mithilfe von Triggern, welche entweder relativ zu jedem Verkehrsteilnehmer oder absolut auf eine Position der Strecke gelegt werden können, umgesetzt.

Über eine definierte Schnittstelle (**Generic Simulation Interface**; GSI) werden Zustandsinformationen der Simulation wie zum Beispiel Position und Ausrichtung aller Verkehrsteilnehmer sowie die Stellgrößen für Längs- und Querführung des EGO-Fahrermodells zur Verfügung gestellt.

### 6.1.2 Echtzeit System

Das Echtzeit System besteht aus diversen Unterkomponenten und beinhaltet das gesamte Element *Fahrzeug*. Die zentrale Komponente ist eine Umgebung zur Steuerung

---

<sup>2</sup>Das XCP-Protokoll (Universal Measurement and Calibration Protocol) wird aufgrund seiner Flexibilität, wie die Anwendbarkeit auf verschiedenen Netzwerkkarten, für die Messdatenerfassung und Kalibrierung elektronischer Steuergeräten verwendet.

## 6.1 Konzept und Systemaufbau eines FAS-Domänen-HILs

der komplexen Simulation. Bei dem aktuellen System wird hier ein Concurrent iHawk Multiprozessorsystem mit RedHawk Linux und SIMulation Workbench (vgl. concurrent, 2010) eingesetzt.

Um ein möglichst realistisches und spezifisches Fahrzeugmodell einbinden und austauschen zu können, wurde dieses von der eigentlichen Simulationsumgebung entkoppelt und in das Echtzeit System integriert. So kann je nach Fahrzeugtyp das passende Modell verwendet werden. Bei dem aktuellen System handelt es sich um ein eigenentwickeltes Simulinkmodell, wobei die für den jeweiligen Fahrzeugtyp abhängigen Parameter aus sehr aufwendigen Mehrkörpersimulationsmodellen generiert werden. Weitere wesentliche Punkte dieses Modells sind die unterschiedlichen longitudinalen und lateralen Eingangsgrößen, mit denen es angesprochen werden kann. So sind die longitudinalen Ausgangssignale des EGO-Fahrermodells, wie sie z. B. bei einer einfachen Fahrt ohne ACC verwendet werden, eine Zielbeschleunigung, wohingegen das ACC-Steuergerät ein Motormoment und eine Sollverzögerung über den Bus fordert. Abhängig davon, ob ACC im Modus aktiv oder aus bzw. standby ist, werden die geforderten EGO-Fahrermodell-Eingangsgrößen umgeschaltet und daraus die Bewegung des Modells in einem Simulationsschritt berechnet. Die neuen Positionsdaten werden inklusive einiger Informationen, welche für die Visualisierung notwendig sind, in die virtuelle Welt zurückgeführt.

Mit Hilfe der Restbussimulation wird das Steuergerät über die reale FlexRay-Fahrer-Netzwerk mit den passenden Signalen versorgt, damit eine Initialisierung erfolgt.

Das FAS-MMI ist eine einfache Simulation eines Fahrzeugkombiinstrumentes zur Überwachung der wichtigsten Signale des Fahrzeugmodells wie Geschwindigkeit, Drehzahl oder Gang. Zusätzlich wird darüber das zu untersuchende FAS gesteuert und dessen Systemzustand dargestellt. So können alle Interaktionen, die auch im realen Fahrzeug mit dem System stattfinden können, durchgeführt werden.

Da moderne Fahrerassistenzsysteme, wie eingangs beschrieben, die Fahrumgebung mithilfe von Umfeldsensorik wahrnehmen, ist zusätzlich ein Sensormodell zur Abbildung der entsprechenden Sensorfunktionalität erforderlich. Hierfür wurden über sehr aufwendige Messungen die Sensoreigenschaften analysiert. Für die so gewonnenen Erkenntnisse wurden Methoden zur Abbildung dieser Eigenschaften in Algorithmen erarbeitet und ein Sensormodell erstellt. Eine genauere Betrachtung dieses Sensormodells folgt in Kapitel 6.2.

### 6.1.3 FAS-Steuergerät

Bei dem Steuergerät handelt es sich naturgemäß um die reale Hardware. Die Schnittstellen sind die identischen wie in der Realität. Die Kommunikation mit der Restbussi-

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

mulation bzw. dem Fahrzeugmodell erfolgt per FlexRay. Für die Einspeisung der zuvor im Sensormodell ermittelten und angepassten Objektliste muss jedoch eine spezifische, **Plug On Device (POD)** genannte, Entwicklungsschnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Die darauf aufbauenden Funktionen wie die Auswahl des Zielobjektes sowie die eigentliche Fahrzeugregelung erfolgen im Steuergerät.

### 6.1.4 Auswerterechner

Der Auswerterechner dient der Visualisierung, Aufzeichnung und Auswertung aller notwendigen *Fahrer-, Fahrzeug-, Umwelt- und Fahrzeugsystem-Daten*. Die Verarbeitung geschieht wieder mit der in Kapitel 5.2.5 vorgestellten Referenztoolkette. Der modulare Aufbau der Toolkette erlaubt eine sehr einfache Integration unterschiedlicher Datenquellen. Für die Simulation musste nur ein angepasster Adapter programmiert werden, so dass die Darstellung der Datenströme in Abbildung 5.12 nur um einige Komponenten ergänzt werden muss (vgl. Abbildung 6.3).

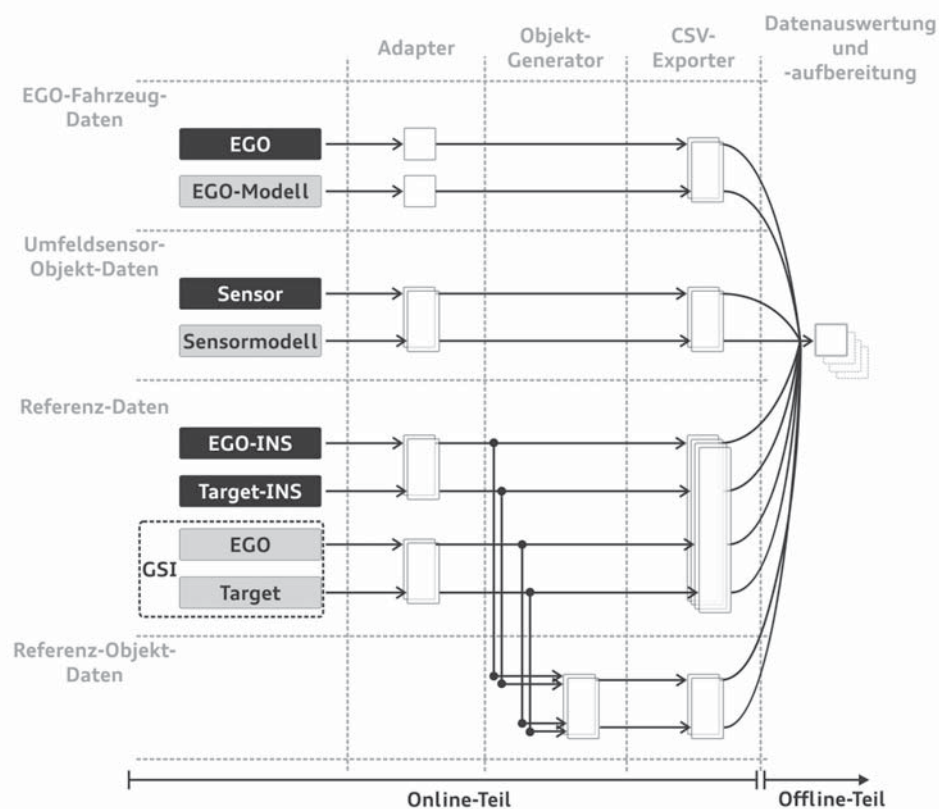


Abbildung 6.3: Datenströme der Referenztoolkette (vgl. Strasser u. a., 2010)

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

Wie bereits angesprochen verwendet das ACC einen Radarsensor, um seine Umgebung zu vermessen. Das in dieser Arbeit untersuchte System ist ein Doppelradarsystem bei dem jeweils ein Sensor links und rechts an der Stelle, an der traditionellerweise die Nebelscheinwerfer verbaut sind, integriert wird. Durch Fusion der Radardaten beider Sensoren wird ein virtueller Sensor in der Mitte der beiden realen Sensoren gebildet. Die so ermittelten Objekte werden in der Funktion adaptive Geschwindigkeitsregelung zur Auswahl und Durchführung der entsprechenden Strategie verwendet. Da der Sensor im ACC-Domänen-HIL nicht verwendet werden kann, müssen die Informationen der virtuellen Welt verarbeitet und wie im realen Fahrzeug über eine Objektliste mit möglichst realitätsnahen Informationen ausgegeben werden.

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Analyse der realen Sensoreigenschaften, die Entwicklung geeigneter Methoden zur Implementierung des Sensormodells sowie die Validierung des Modells für den ACC-Domänen-HIL detailliert erläutert (vgl. Brahmī, 2010).

### 6.2.1 Modellierungskonzept

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Modellierung des Radarsensors vorgestellt und diskutiert. Aus der Vielzahl möglicher Sensoreffekte müssen die wichtigsten Einflussfaktoren ausgewählt und anschließend die dazu notwendigen Entwicklungsschritte abgeleitet werden.

#### Sensoreffekte

Die Auswahl der später umgesetzten Effekte ist für die Qualität der Simulationsergebnisse von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund ist der Einfluss der Effekte auf die Funktion bei der Auswahl zu berücksichtigen. Zusätzlich müssen aber auch die Machbarkeit und der Implementierungsaufwand berücksichtigt werden. Ein entscheidender Faktor ist dabei die Echtzeitfähigkeit, da das Steuergerät zu vorgegebenen Zeitpunkten Objektinformationen des Sensors benötigt.

Im Folgenden werden die im weiteren Verlauf dieser Arbeit analysierten Effekte kurz erläutert.

- **Sichtbereich (Field of View FOV)**  
Das Sichtfeld eines Radarsensors gibt den theoretischen Detektionsbereich wieder und ist für die Funktion sehr wichtig. Beispielsweise ist ein möglichst großer



## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

lateralen Öffnungswinkel bei der rechtzeitigen Erkennung von vor dem EGO-Fahrzeug einscherenden Fahrzeugen für die Funktionsausprägung entscheidend.

- **Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes**  
Die Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes beeinflusst die Funktion erheblich. Je nachdem welche Position eines Target-Fahrzeuges zurückgespiegelt wird, muss z. B. eine Notbremsfunktion einige Millisekunden früher oder später ausgelöst werden, um die gewünschte Geschwindigkeit abbauen zu können.
- **Trennfähigkeit**  
Die Trennfähigkeit bezeichnet im Wesentlichen das Auflösungsvermögen des Radarsensors. Dieser Effekt tritt relativ häufig auf und kann einen sehr großen Einfluss auf die Leistung des Systems haben. Beispielsweise muss das System ein hinter einem LKW fahrendes Motorrad als eigenständiges Objekt detektieren, um den Wunschabstand korrekt einregeln zu können.
- **Latenzzeit**  
Die Latenzzeit, also der zeitliche Verzug zwischen Messung eines Objektes und der Ausgabe des Objektes an die nachgeschalteten Funktionen des Systems, ist ein sehr entscheidender Faktor für einen Radarsensor und kann einen großen Einfluss auf das Systemverhalten haben.
- **Datenrate**  
Die Datenrate bezeichnet die Häufigkeit, mit der der Radarsensor Daten liefert. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf die Systemeigenschaften, da zu große zeitliche Abstände beispielsweise den Zeitpunkt der Auslösung einer Notbremsfunktion beeinflussen können.
- **Verdeckung**  
Die Verdeckung bezeichnet die Abschattung der Radarwellen durch ein Objekt, so dass die in Laufrichtung dahinter liegenden Objekte nicht gemessen werden können. Durch Transmission der elektromagnetischen Welle durch nicht reflektierende Oberflächen wie die Heck- und Frontscheibe eines Fahrzeuges hindurch bzw. Tunnelung können beim Radarsensor häufig optisch verdeckte Objekte detektiert werden, was eine wesentliche Eigenschaft der Radartechnik darstellt.
- **Tracking**  
Das Tracking bezeichnet das Halten von Zielen, welche sich aus dem Sichtbereich herausbewegt haben, über eine definierte Anzahl an Berechnungszyklen und die Zuordnung neuer Messungen zu bereits existierenden Objekten. Dieser Effekt kann einen starken Einfluss auf die Funktionsweise des Radarsensors haben.

## Entwicklungsschritte

Der Entwicklungsprozess ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Wie bereits mehrfach erwähnt müssen die Effekte zunächst mit Messungen analysiert und anschließend in Form von

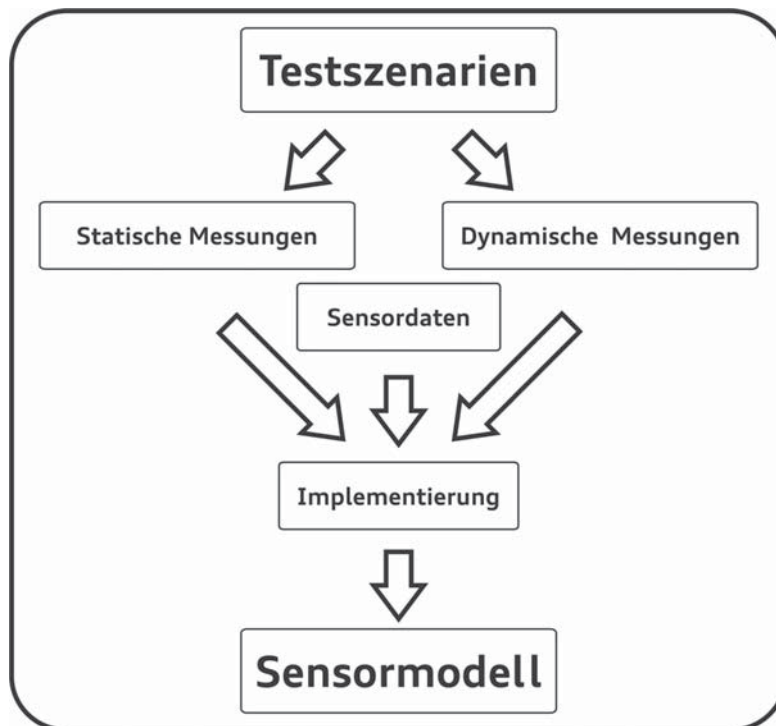


Abbildung 6.4: Entwicklungsprozess des Sensormodells

Softwaremodulen umgesetzt werden. In Abhängigkeit der zu untersuchenden Effekte eignen sich sowohl statische Messungen, die bei stehenden Target-Objekten und bei stehendem EGO-Fahrzeug durchgeführt werden, als auch dynamische Messungen zur Bewertung.

### Statische Messungen

Für statische Messungen kommen als Target-Fahrzeuge Ersatzobjekte, sogenannte Tripel­spiegel, zum Einsatz. Diese Objekte bilden aufgrund ihrer Materialeigenschaften und ihrer Geometrie die Reflektivitätseigenschaften realer Fahrzeuge nach, sind jedoch wegen der geringen Abmessungen sehr flexibel einsetzbar. Die Geometrie des Tripel­spiegels entscheidet dabei über den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Radarquerschnitt ( $\sigma$ ), der sich laut Mesow (2008) aus den Größen Seitenlänge  $l$  bzw. Kantenlänge  $s$  des Tripel­spiegels sowie der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle  $\lambda$  berechnen lässt.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

$$\sigma = \frac{\pi l^4}{3\lambda^2} \quad (6.1)$$

Mit  $l = \sqrt{2s^2}$  folgt:

$$\sigma = \frac{4\pi s^4}{3\lambda^2} \quad (6.2)$$

Da die in Kapitel 5 vorgestellten Szenarien genauso wie die im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigten Fahrmanöver ausschließlich mit Personenkraftfahrzeugen durchgeführt werden, wurde ein Tripelspiegel mit einer Seitenlänge  $l=28$  cm verwendet, um den RCS eines Kfzs nachzubilden. Abbildung 6.5 stellt den in dieser Arbeit verwendeten Tripelspiegel dar.

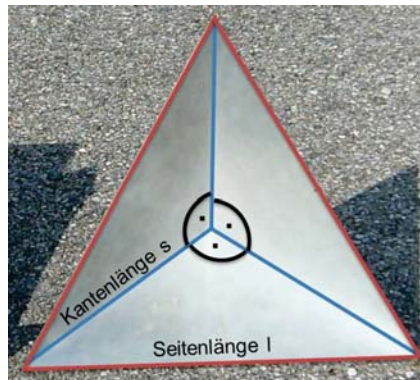


Abbildung 6.5: Geometrie des Tripelspiegels

Zur Vermessung der Positionen der Tripelspiegel und des EGO-Fahrzeugs werden Laserentfernungsmessgeräte als Referenzmesstechnik verwendet. Für große Entfernungen und für Messungen relativ zum EGO-Fahrzeug werden dabei ein Tachymeter (vgl. Abbildung 6.6(a)) und für kleinere Entfernungen ein einfaches Laserentfernungsmessgerät (vgl. Abbildung 6.6(b)) verwendet.

### Dynamische Messungen

Für Effekte, bei denen dynamische Messungen unerlässlich sind, da diese nur während einer Fahrt auftreten, wurde wieder die in Kapitel 5.2.5 vorgestellte Referenztoolbox verwendet.

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

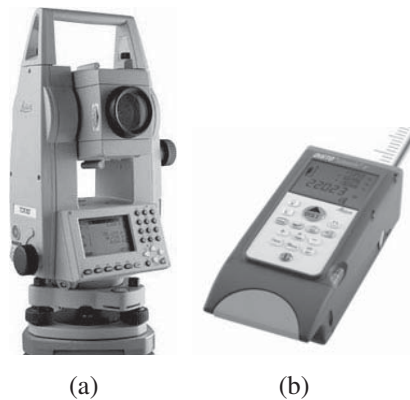


Abbildung 6.6: Eingesetzte Entfernungsmessgeräte (Leica, 2011)

### Implementierung

Die aus den Messungen gewonnenen Ergebnisse werden in Form von parametrisierbaren Softwaremodulen implementiert. Jeder untersuchte Effekt wird als ein Modul umgesetzt, sodass das Zusammenwirken aller Module das gewünschte Sensormodell bildet. Dieses Konzept ermöglicht eine relativ einfache Anpassung bzw. Wiederverwendbarkeit der Module für weitere Sensormodelle.

### 6.2.2 Messungen und Ergebnisse

Im Folgenden werden die durchgeführten statischen wie auch dynamischen Messungen vorgestellt und die Ergebnisse analysiert. Für jede Messung werden sowohl die Daten des Radars als auch die Referenzdaten dokumentiert, um die Effekte später im Labor analysieren zu können.

In Abbildung 6.7 wird das für die Messungen gültige Koordinatensystem, das Sensorkoordinatensystem, dargestellt. Als positiver X-Abstand bzw. longitudinaler Differenzabstand wird somit der Abstand in Fahrtrichtung nach vorne und als positiver Y-Abstand bzw. lateraler Differenzabstand der Abstand in Fahrtrichtung nach rechts bezeichnet. Das Sensorkoordinatensystem hat seinen Ursprung in der Mitte der Fahrzeugbreite einige Zentimeter hinter dem Kühlergrill, somit exakt zwischen den beiden Radarsensoren des eingesetzten Doppelradarsystems (vgl. Kapitel 3.2).

Die meisten Messungen wurden auf einem Testgelände durchgeführt, da eine sehr große, möglichst ebene und störungsfreie Fläche nötig war. Für die drei Effekte Latenzzeit, Datenrate und Verdeckung wurden hingegen Messungen im realen Straßenverkehr durchgeführt.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

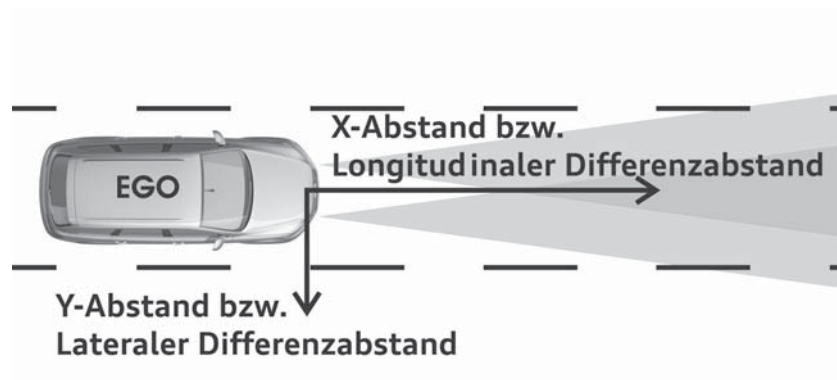


Abbildung 6.7: Sensorkoordinatensystem

### Sichtbereich

Die Analyse des Sichtbereichs wurde mit statischen Messungen durchgeführt. Das EGO-Fahrzeug wurde dafür am Rand der Testfläche platziert und der Tripelspiegel von außen bzw. vorne in das Field of View hineinbewegt. Um den später noch analysierten Einfluss des Trackingeffekts zu minimieren, wurde das Testobjekt sehr langsam (ca. 0,08 m/s) bewegt. Abbildung 6.8 stellt das Messprinzip schematisch dar.

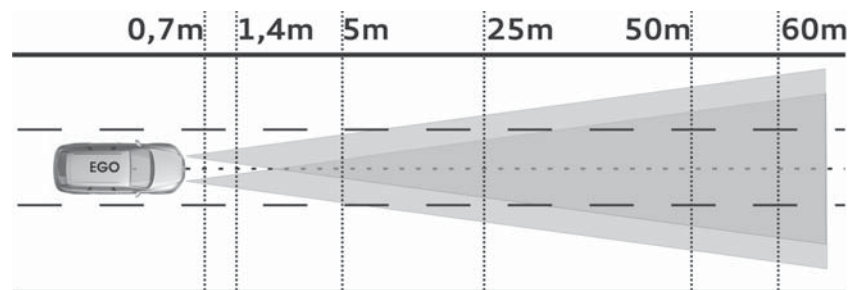


Abbildung 6.8: Messprinzip: Sichtbereich

Wird der Tripelspiegel von der Sensorik stabil erfasst, wird die genaue Position mit dem Tachymeter vermessen und in das Sensorkoordinatensystem übertragen. Tabelle 6.1 fasst die gemessenen Grenzpositionen in Form des longitudinalen (X) und lateralen (Y) Differenzabstands zusammen.

Durch die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen den gemessenen Positionen wird eine eindeutige Grenze des Sichtbereichs definiert. Das Ergebnis dieser Linearisierung ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

Da die Sensoren symmetrisch eingebaut sind und eine identische Anordnung der Antennen besitzen, kann von einer Symmetrie des Sichtbereichs ausgegangen werden und die

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

Tabelle 6.1: Messergebnis: Sichtbereich

X[m]	1,5	7,05	19,94	30,59	55,13
Y[m]	2,13	5,69	9,93	14,61	17,97
X[m]	85,34	115,59	164,81	189,87	243,46
Y[m]	26,66	31,26	41,13	44,94	20,01

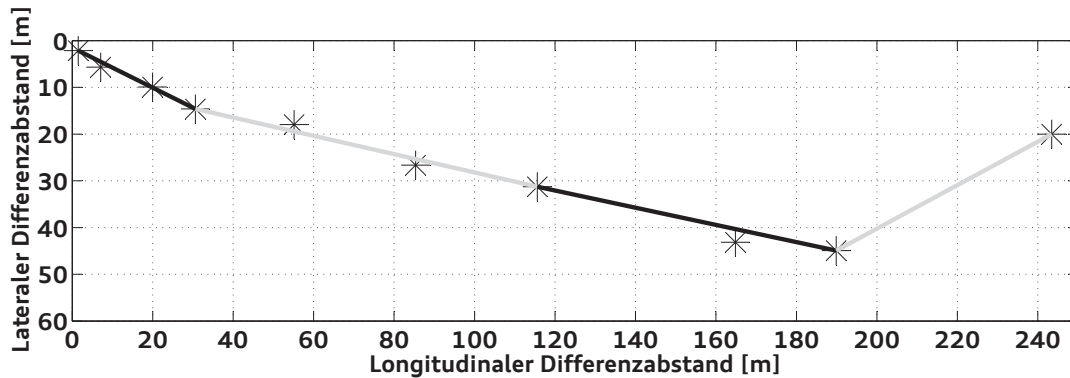


Abbildung 6.9: Messergebnis: Linearisierter Sichtbereich

Ergebnisse können an der X-Achse gespiegelt werden. Diese Annahme wurde durch exemplarische Messungen bei ausgewählten Entfernungen auf beiden Seiten des Sichtbereichs bestätigt. Befindet sich demzufolge ein Objekt außerhalb der rechten oder linken Grenze kann es nicht vom Sensor erfasst werden, innerhalb wird es als Target-Objekt gemessen.

Die Analyse des Effektes des blinden Bereichs erfordert sehr präzise Messungen um die Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  aus Abbildung 6.10 zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Messergebnis: Blinder Bereich

	X[m]	Y[m]
$P_1$	1,40	0,00
$P_2$	0,75	0,30
$P_3$	0,72	1,10

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

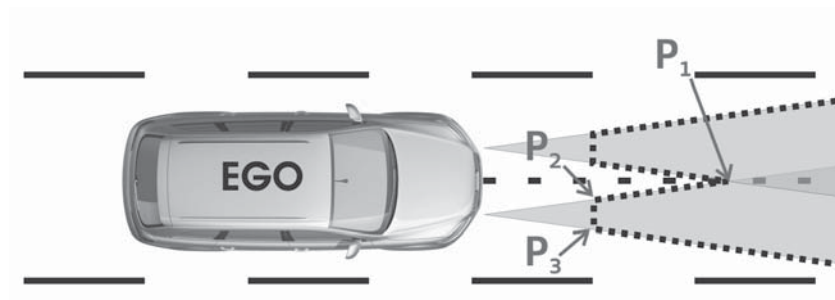


Abbildung 6.10: Messprinzip: Blinder Bereich

### Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes

Für die Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes werden sowohl statische als auch dynamische Messungen vorgenommen. Außerdem werden zwei Situationen unterschieden. Befindet sich das Target-Fahrzeug vor dem EGO-Fahrzeug mit geringem Gierwinkel, wird der Reflexionspunkt auf dem Heck des Vorderfahrzeugs liegen. Bei großem Gierwinkel oder relativ nahen Fahrzeugen auf der Nebenspur wird die dem EGO-Fahrzeug zugewandte Seite als Ziel ausgegeben.

### Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes auf dem Heck

Für die Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes auf dem Heck des Target-Fahrzeugs werden die longitudinalen und die lateralen Auswirkungen separat betrachtet, da kein Zusammenhang zwischen X und Y angenommen wird.

### Longitudinale Genauigkeit

Bei den Untersuchungen wird das Target-Fahrzeug an unterschiedlichen Positionen innerhalb des Sichtbereichs positioniert und durch Langzeitbeobachtungen das Verhalten des Sensors analysiert. Durch Vergleich von der mit dem Tachymeter gemessenen Position und dem Mittelwert der Messpunkte kann der Offset berechnet werden. Das Ergebnis dieses Vergleichs wird in Tabelle 6.3 gezeigt.

Die Ergebnisse zeigen einen mittleren, systematischen Fehler von 32,3 cm, den Mesow (2008) dadurch erklärt, dass die Radarwellen durch ihre physikalischen Eigenschaften in die Stoßfänger eindringen und erst von Teilen mit hohem Metallgehalt reflektiert werden. Die geringe angegebene Standardabweichung weist darauf hin, dass der vom Radarsensor ermittelte X-Abstand sehr genau und stabil gemessen wird.

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

Tabelle 6.3: Messergebnis: Longitudinale Genauigkeit auf dem Heck

Abstand [m]	Mittelwert [m]	Standardabweichung [m]	Offset [m]
21,60	21,89	0,01	0,29
74,96	75,32	0,02	0,36
78,72	79,02	0,05	0,30
153,06	153,40	0,15	0,34

### Laterale Genauigkeit

Für die Analyse der lateralen Genauigkeit wurden dynamische Messungen durchgeführt. In Abbildung 6.11 sind beispielhaft die Ergebnisse einer Messung dargestellt. Insgesamt zeigten alle Messungen eine äußerst hohe laterale Genauigkeit ohne systematischen Offset mit einer Standardabweichung von 0,25 m.

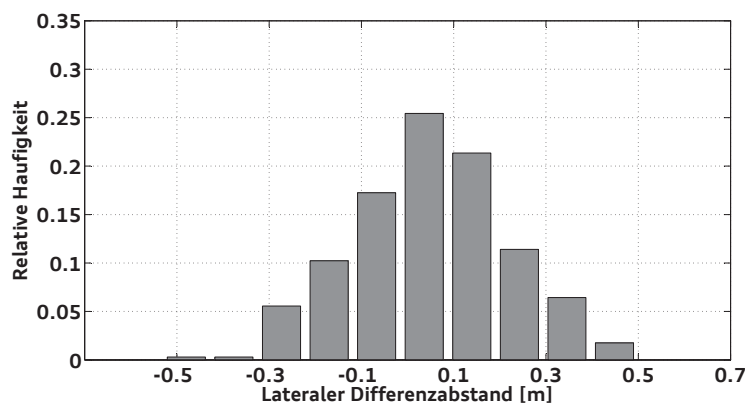


Abbildung 6.11: Messergebnis: Laterale Genauigkeit auf dem Heck

Da aufgrund der Voruntersuchungen von Bouzouraa und Hofmann (2010) eine Normalverteilung erwartet wird, wurden zusätzlich zu den dynamischen Messungen die Ergebnisse der statischen Messungen der longitudinalen Genauigkeit genutzt und nach den Regeln von Simat (2007)<sup>3</sup> auf Normalverteilung getestet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

<sup>3</sup>**Schiefe der Verteilung (Test A):** Beim Vergleich vom Median  $\tilde{x}$  und arithmetischem Mittel  $\bar{x}$  einer Verteilung muss gelten:  $0,9 \leq \frac{\tilde{x}}{\bar{x}} \leq 1,1$

**Breite der Verteilung (Test B):** Für die Standardabweichung  $s$  und das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  einer Verteilung muss gelten:  $3 \cdot s \leq |\bar{x}|$



## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

Tabelle 6.4: Messergebnis: Laterale Genauigkeit auf dem Heck

Abstand [m]	Median [m]	Mittelwert [m]	Standardabweichung [m]	Test A	Test B
6,84	-0,35	-0,35	0,029	erfüllt	erfüllt
16,54	-0,94	-0,94	0,036	erfüllt	erfüllt
34,44	-1,63	-1,64	0,060	erfüllt	erfüllt
48,37	-1,83	-1,96	0,250	erfüllt	erfüllt

Basierend auf diesen Erkenntnissen kann die erwartete Position des Reflexionspunktes am Heck des Fahrzeugs mithilfe einer normalverteilten Wahrscheinlichkeit beschrieben werden.

### Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes auf der Seite

Da dieser Effekt vor allem bei Einschervorgängen im Nahbereich vorkommt, bei denen das Target-Fahrzeug einen kleinen Gierwinkel im Vergleich zum EGO-Fahrzeug hat, wird er mithilfe der Referenzmesstechnik in genau diesem Manöver untersucht. Ein typisches Beispiel visualisiert Abbildung 6.12.



Abbildung 6.12: Messprinzip: Genauigkeit auf der Seite

Ausgewertet wurde hierbei die Position des Reflexionspunktes in X-Richtung, bezogen auf das Fahrzeugheck des Target-Fahrzeugs. Die Verteilung der Messpunkte stellt Abbildung 6.13 dar.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich bei Einschernern bzw. relativ zum EGO-Fahrzeug schräg vorbeifahrenden Target-Fahrzeugen der Reflexionspunkt am häufigsten in einem Abstand von ca. 3,4 m (Standardabweichung: 0,4 m) vom Fahrzeugheck befindet, was dem Bereich des Radkastens bzw. der vorderen Tür entspricht.

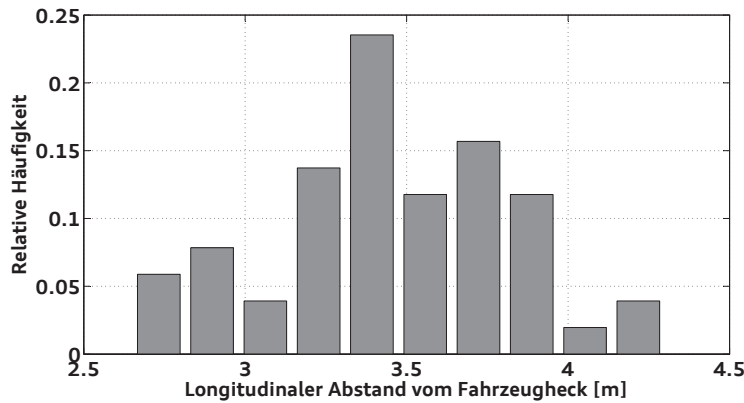


Abbildung 6.13: Messergebnis: Genauigkeit auf der Seite

### Genauigkeit der longitudinalen Geschwindigkeit

Um die Genauigkeit der Geschwindigkeit  $v_x$  beurteilen zu können, muss die vom Radarsensor ausgegebene Geschwindigkeit mit der der Referenz verglichen werden. Die Ergebnisse eines Messzyklus stellt Abbildung 6.14 exemplarisch dar.

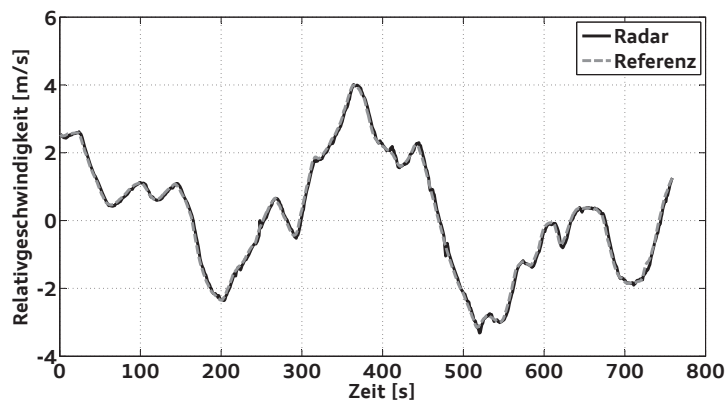


Abbildung 6.14: Messprinzip: Longitudinale Geschwindigkeit

Der Tabelle 6.5 ist zusätzlich der Mittelwert des Fehlers der Differenzgeschwindigkeiten aus Referenz und Sensor über jede Fahrt, sowie über alle Fahrten, zu entnehmen. Dieses Ergebnis zeigt mit welcher hoher Genauigkeit der Radar die longitudinale Geschwindigkeit misst. Der Grund dafür liegt im Messprinzip der direkten Geschwindigkeitsmessung durch den Dopplereffekt.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

Tabelle 6.5: Messergebnis: Longitudinale Geschwindigkeit

Fahrt	1	2	3	4	5	6
Mittelwert des Fehlers [m/s]	0,05	0,04	0,15	0,15	0,03	0,01
	0,07					

### Trennfähigkeit

Für die Untersuchung der Trennfähigkeit bzw. des Auflösungsvermögens eignen sich besonders statische Messungen, da hier mindestens zwei Target-Fahrzeuge notwendig sind. Bei dynamischen Messungen müssten damit mehr als drei Referenzsysteme eingesetzt, synchronisiert und ausgewertet werden, was eine erhebliche Komplexität bedeuten würde. Außerdem muss die Trennfähigkeit unabhängig von der bereits weiter oben diskutierten Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes bewertet werden. Aus diesem Grund werden auch hier wieder Tripelspiegel eingesetzt.

### Laterale Trennfähigkeit

Für die Messung der lateralen Trennfähigkeit werden zwei Tripelspiegel bei verschiedenen Entfernungen so positioniert, dass der Radarsensor zwei Objekte erkennt. Anschließend wird der äußere Tripelspiegel (2) sehr langsam in Richtung des zweiten (1) bewegt. Sobald die Messtechnik nur noch ein Objekt ausgibt, wird dieser Abstand gemessen. Abbildung 6.15 stellt das Messsprinzip sowie eine beispielhafte Auswertung der Ergebnisse bei einem Abstand von 15 m dar.

Die Ergebnisse bei verschiedenen Entfernungen sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Rechnet man die absolut gemessenen Werte für X- und Y-Abstand in einen auf den Ursprung des Sensorkoordinatensystems bezogenen Winkel um, kann eine entfernungsabhängige laterale Trennfähigkeit bzw. Auflösung von ca.  $6^\circ$  festgestellt werden.

Tabelle 6.6: Messergebnis: Laterale Trennfähigkeit

X-Abstand [m]	$Y_{min}$ [m]	Winkel [ $^\circ$ ]
10	1,2	6,84
15	1,52	5,78
50	5,06	5,77

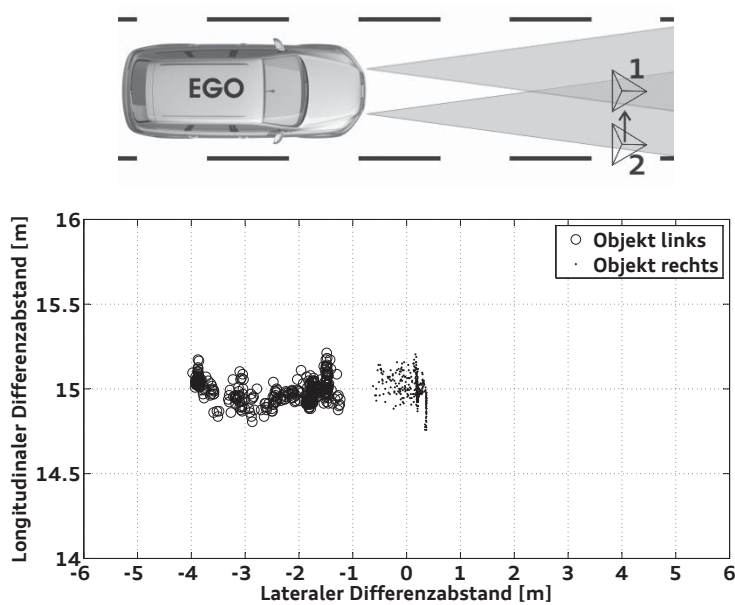


Abbildung 6.15: Messprinzip: Laterale Trennfähigkeit

### Longitudinale Trennfähigkeit

Zusätzlich zur lateralen Trennfähigkeit kann der Radarsensor Objekte auch nach dem X-Abstand trennen. Demzufolge wird bei jeder Entfernung von dem Punkt, ab dem die Objekte bei der Y-Verschiebung zusammengefasst wurden, die longitudinale Trennfähigkeit untersucht. Von dieser Position aus wird der äußere Tripelspiegel (2) nach vorne geschoben, bis der Radarsensor zwei Objekte unterscheidet und analog zu der vorherigen Messung wird der Relativabstand gemessen. Eine Darstellung des Messprinzips, sowie ein Beispiel der Auswertung der Ergebnisse dieser Messung wird in Abbildung 6.16 visualisiert.

Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in Tabelle 6.7, erneut in Abhängigkeit des Abstand, zusammengefasst.

Tabelle 6.7: Messergebnis: Longitudinale Trennfähigkeit

X-Abstand [m]	$X_{min}$ [m]
05	0,65
10	0,85
15	0,82
50	1,27

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

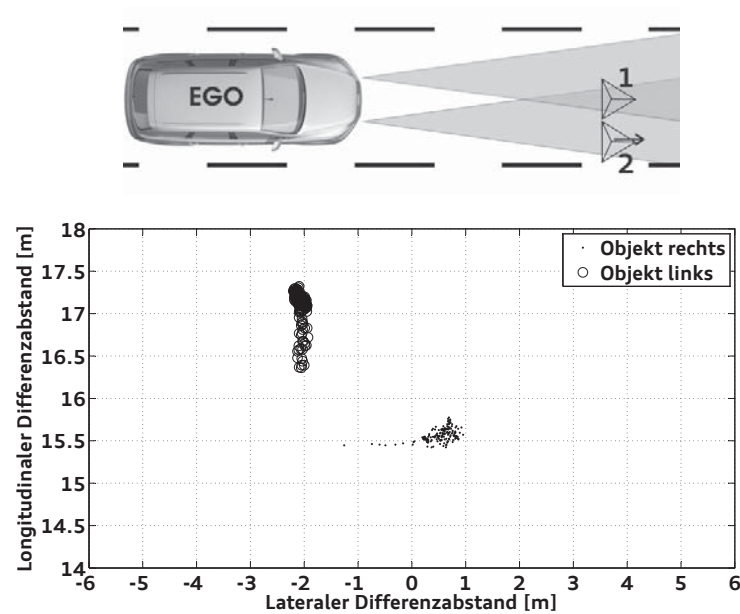


Abbildung 6.16: Messprinzip: Longitudinale Trennfähigkeit

### Latenzzeit und Zykluszeit

Die Latenzzeit bewirkt, wie in Abbildung 6.17 dargestellt, eine zeitliche Verschiebung des tatsächlichen Signals und des ausgegebenen bzw. gemessenen Signals. Bei der La-

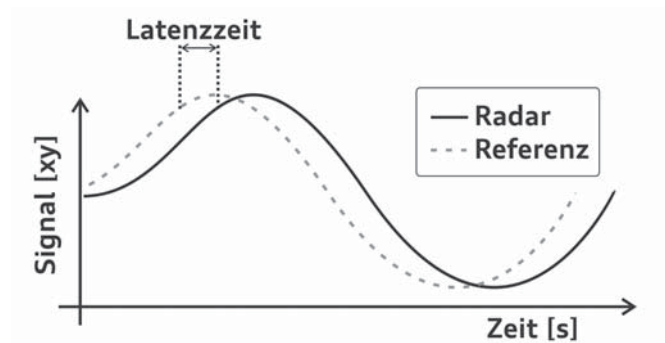


Abbildung 6.17: Messprinzip: Latenzzeit (theoretisch)

tenzzeit werden wieder die Erkenntnisse von Bouzouraa und Hofmann (2010) verwendet. Sie ermittelten bei ihren Untersuchungen folgenden Zusammenhang.

$$\text{Latenzzeit} = 120 \text{ ms} + \text{Anzahl}_{\text{Objekte}} * 4 \text{ ms} \quad (6.3)$$

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

Bei der Untersuchung der Zykluszeit wird analysiert, in welchen Zeitabständen der Radarsensor seine Daten liefert. Hierfür wird die Zykluszeit sehr vieler Messungen in Abhängigkeit der ausgegebenen Objektanzahl analysiert. Abbildung 6.18 veranschaulicht grafisch den dabei ermittelten Zusammenhang.

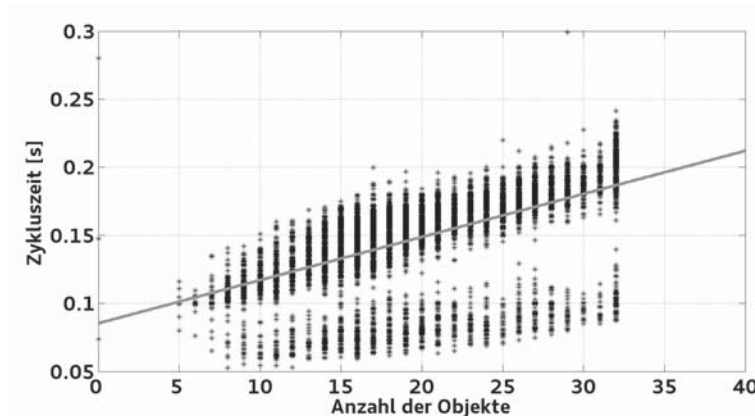


Abbildung 6.18: Messergebnis: Abhängigkeit der Zykluszeit von der Anzahl der Objekte

Wie bei der Latenzzeit kann auch bei der Zykluszeit ein Zusammenhang mit der Anzahl der Objekte festgestellt werden. Je größer die Anzahl an Objekten im Erfassungsbereich des Sensors ist, desto größer ist der Rechenaufwand, was zur Folge hat, dass die Zykluszeit steigt. Über die folgende Formel kann dieser Zusammenhang angenähert werden.

$$\text{Zykluszeit} = 85 \text{ ms} + \text{Anzahl}_{\text{Objekte}} * 3 \text{ ms} \quad (6.4)$$

Vergleicht man die Formeln 6.3 und 6.4 so wird deutlich, dass die Latenzzeit aus der Zykluszeit plus weiteren Komponenten besteht und somit als übergeordneter Taktgeber verwendet werden muss.

### Verdeckung

Eine vollständige Analyse des Effektes der Verdeckung ist kaum durchführbar. Für diese Untersuchung müsste eine Vielzahl von Fahrzeugen mit den Referenzmesssystemen ausgestattet werden und eine extrem große Datenmenge aufgenommen und analysiert werden. Aus diesem Grund wird die Verdeckung nur qualitativ bewertet.

Hierfür wurden Messungen (ohne Referenzmesstechnik) auf der Autobahn durchgeführt. Anschließend konnten im Labor, durch das Beobachten sowohl des Videobildes als auch der Radardaten, die folgenden Zusammenhänge festgestellt werden.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

- Fahrzeuge auf den Nebenspuren werden praktisch ungestört erfasst.
- Ab einem lateralen Versatz der Target-Fahrzeuge auf der EGO-Spur kleiner 0,20 m kommt es zur Verdeckung.
- Auf der EGO-Spur werden maximal vier verdeckte Fahrzeuge detektiert.

### Tracking

Zur Analyse dieses Effektes konnten die Messungen der Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes verwendet werden. Hierbei wurden keine eindeutigen Ergebnisse festgestellt. Die Analyse ergab jedoch, dass es in der Regel mehr als drei Zyklen dauert, bevor ein Objekt, das sich im Sichtbereich des Sensors befindet, ausgegeben wird. Ein Objekt, welches sich nicht mehr innerhalb des FOV befindet, wird auch erst nach mindestens drei Zyklen verworfen.

### 6.2.3 Implementierung

In diesem Abschnitt werden die Methoden zur Modellierung der im vorangegangenen Kapitel 6.2.2 analysierten Effekte erläutert. Viele Effekte sind nicht radarspezifisch, sondern können mit angepasster Parametrisierung auch für weitere Sensoren und damit Assistenzsysteme verwendet werden. Daher war das Ziel der Implementierung, erneut ein möglichst modulares Konzept zu erarbeiten. Die unter diesen Vorgaben entstandene Softwarearchitektur gibt Abbildung 6.19 wieder. Wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben

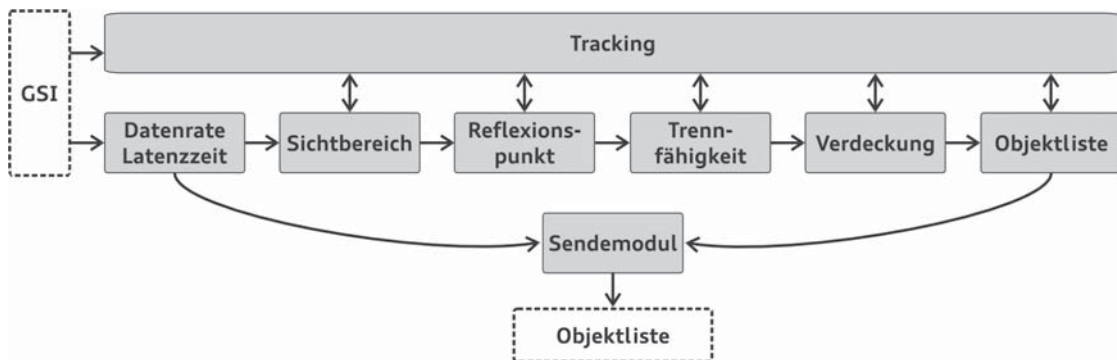


Abbildung 6.19: Softwarearchitektur des Sensormodells

werden die Daten der virtuellen Welt über die Schnittstelle GSI ausgegeben. Aufbauend auf diesen Daten werden die einzelnen Effekte nacheinander abgearbeitet, wobei das Tracking fast alle Module beeinflusst. Nachdem die Objektinformationen, wie im realen

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

Sensor, zu einer Objektliste zusammengefasst wurden, wird diese über das abschließende Sendemodul und die Messtechnikchnittstelle in das Steuergerät eingespeist. Die konkrete Umsetzung wird im Weiteren detailliert erläutert.

### Sichtbereich

Der Sichtbereich wird, wie in den Abbildungen 6.8 und 6.10 dargestellt, linearisiert.

$$Y_{max} = a \cdot X + b \quad \text{für} \quad X_{min} \leq X \leq X_{max} \quad (6.5)$$

Da jedes Target-Objekt über eine Bounding Box<sup>4</sup> abgebildet wird, genügt der folgende einfache Vergleich der lateralen Abstände aller Eckpunkte und des Sichtbereichs.

$$|Y| \leq Y_{max} \quad (6.6)$$

Tabelle 6.8 fasst die, aus den in Kapitel 6.2.2 durchgeführten Messungen, ermittelten Parameter aller Geradenabschnitte zusammen. Für den Bereich 1 zwischen 0,73 m und 1,5 m müssen, aufgrund des in Abbildung 6.10 dargestellten blinden Bereichs, die zwei angegebenen Bedingungen erfüllt sein.

Tabelle 6.8: Geradengleichungen für die Linearisierung des Sichtbereichs

Bereich	$X_{min}$ [m]	$X_{max}$ [m]	a	b
1.1	0,73	1,5	-0,4545	0,6818
1.2	0,73	1,5	0,4524	0,77
2	1,5	30,59	0,4524	0,77
3	30,59	115,6	0,19594	8,619
4	115,6	199,2	0,015	29,48
5	199,2	250	-0.2128	74,94

### Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes

Befindet sich ein Target-Fahrzeug innerhalb des Sichtbereichs, werden den Ecken gemäß Abbildung 6.20 binäre Werte zugewiesen.

<sup>4</sup>Die Bounding Box ist ein möglichst einfacher geometrischer Körper, der die dreidimensionalen Target-Objekte umschließt (hier: kleinstmöglicher Quader, vgl. Abbildung 6.20).



## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

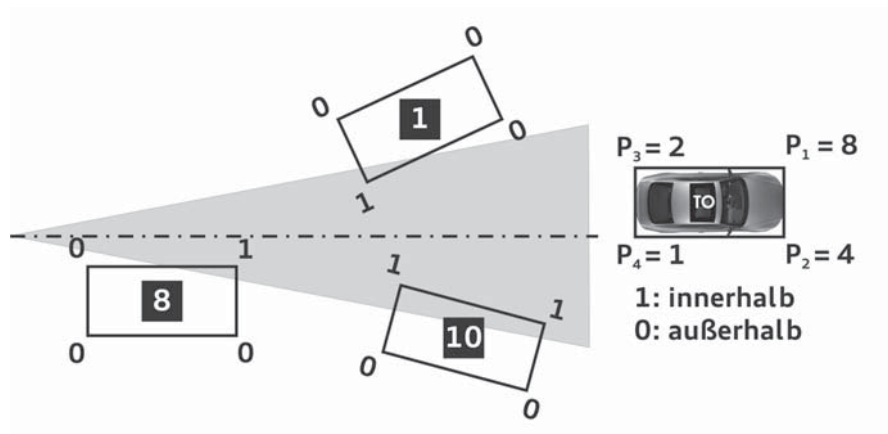


Abbildung 6.20: Kodierung der Lage der Bounding Box im Sichtfeld

Somit kann die Lage der Bounding Box mithilfe eines dezimalen Werts durch Addieren der Binärwerte aller Eckpunkte eindeutig beschrieben werden. Anschließend wird anhand der Codierung sowie der Ausrichtung des Target-Fahrzeugs relativ zum EGO-Fahrzeug (Gierwinkel<sup>5</sup>) über die in Tabelle 6.9 aufgelisteten Regeln entschieden, ob der Reflexionspunkt auf dem Heck oder der Seite des Target-Fahrzeugs liegt bzw. das Objekt aktuell nicht weiter betrachtet wird.

Tabelle 6.9: Entscheidungsregeln der Lage des Reflexionspunktes

Kodierung	Gierwinkel	Lage im Sichtfeld	Reflexionspunkt
2,4,10,14	$\leq 45^\circ$	unabhängig	Seite
	$> 45^\circ$	unabhängig	verwerfen
1,5,9,13	$\geq -45^\circ$	unabhängig	Seite
	$< -45^\circ$	unabhängig	verwerfen
8	$< 0^\circ$	unabhängig	verwerfen
	$\geq 0^\circ$	unabhängig	Seite
4	$\geq 0^\circ$	unabhängig	verwerfen
	$< 0^\circ$	unabhängig	Seite
12	$< 0^\circ$	rechts	verwerfen
	$\geq 0^\circ$	rechts	Seite
	$< 0^\circ$	links	Seite
	$\geq 0^\circ$	links	verwerfen
3,7,11,15	unabhängig	unabhängig	Heck

<sup>5</sup>In Fahrtrichtung nach links: positiv; in Fahrtrichtung nach rechts: negativ.

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

Für die Genauigkeiten konnten hohe Güten ermittelt werden. Die Abweichungen des Reflexionspunktes vom idealen Wert können mithilfe eines Offsets und einer normalverteilten Abweichung umgesetzt werden. Das Wandern des Reflexionspunkts wird dabei durch ein mit einer normalverteilten Wahrscheinlichkeit generiertes Rauschen berechnet. Diese normalverteilte Abweichung  $\delta$  wird durch einen parametrisierbaren Zufallsgenerator (vgl. Gleichung 6.7) erzeugt. Der Mittelwert dieser Abweichung entspricht dem jeweils gültigen Offset  $D_{Offset}$ .

$$\delta_{i+1} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\delta_i - D_{Offset})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6.7)$$

Der daraus resultierende Differenzabstand  $D_{Modell}$  ergibt sich somit aus dem von der Simulation ausgegebenen idealen Abstand  $D_{VTD}$  und der normalverteilten Abweichung  $\delta$ .

$$D_{Modell} = D_{VTD} + \delta \quad (6.8)$$

### Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes auf dem Heck

#### Longitudinale Genauigkeit

Der Offset der Abweichung der longitudinalen Genauigkeit  $X_{Offset}$  entspricht dem in Tabelle 6.3 angegebenen systematischen Fehler von 32,3 cm. Aus den gefundenen Ergebnissen besitzt die normalverteilte Abweichung  $\delta x$  eine Breite und somit eine Standardabweichung  $\sigma(X)$ , die eine Abhängigkeit von der Entfernung  $X$  gemäß Gleichung 6.9 aufweist.

$$\sigma(X) = 0,0011 \cdot X - 0,0081 \quad (6.9)$$

Das daraus resultierende  $X_{Modell}$  setzt sich dementsprechend wie folgt zusammen:

$$X_{Modell} = X_{VTD} + \delta x \quad (6.10)$$

#### Laterale Genauigkeit

Für den lateralen Differenzabstand können die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Werte 0,25 m bzw. 0 m für die Standardabweichung  $\sigma(Y)$  bzw. den Offset  $Y_{Offset}$  eingesetzt werden. Der Abstand  $Y_{Modell}$  ergibt sich somit folgendermaßen:

$$Y_{Modell} = Y_{VTD} + \delta y \quad (6.11)$$

### Lage und Genauigkeit des Reflexionspunktes auf der Seite

Wird anhand der Analyse der Situation nach Tabelle 6.9 entschieden, dass sich der Reflexionspunkt auf der Seite des Fahrzeugs befindet, erfolgt die Berechnung des Reflexionspunktes analog zur Lage und Genauigkeit auf dem Heck, jedoch mit dem Offset  $X_{OffsetSeite} = 3,4\text{ m}$  und der Standardabweichung  $\sigma_{XSeite} = 0,4\text{ m}$  (vgl. Abbildung 6.13). Zusätzlich muss eine trigonometrische Umrechnung für die X- und Y-Richtung gemäß Gleichung 6.12 und 6.13 durchgeführt werden.

$$X_{Modell} = X_{VTD} + \Delta X = X_{VTD} + (X_{OffsetSeite} + \delta_{xSeite}) \cdot \cos \alpha \quad (6.12)$$

$$Y_{Modell} = Y_{VTD} + \Delta Y = Y_{VTD} + \Delta X \cdot \tan \alpha \quad (6.13)$$

### Laterale und longitudinale Trennfähigkeit

Wie in der Analyse dargestellt, trennt der Radarsensor die Objekte sowohl nach deren Differenzabständen als auch nach der Geschwindigkeit. In der Software wird diese Eigenschaft folgendermaßen umgesetzt.

Zunächst werden wie in Abbildung 6.21 die Objekte nach ihrer longitudinalen Entfernung aufsteigend sortiert und nach den Werten der Tabelle 6.7 einem Cluster zugeordnet, sofern die Abstände zwischen den Objekten die ermittelten abstandsabhängigen Grenzen unterschreiten. In dem in Abbildung 6.21 beispielhaft dargestellten Fall ergeben sich drei Cluster mit je einem, zwei oder drei Objekten.

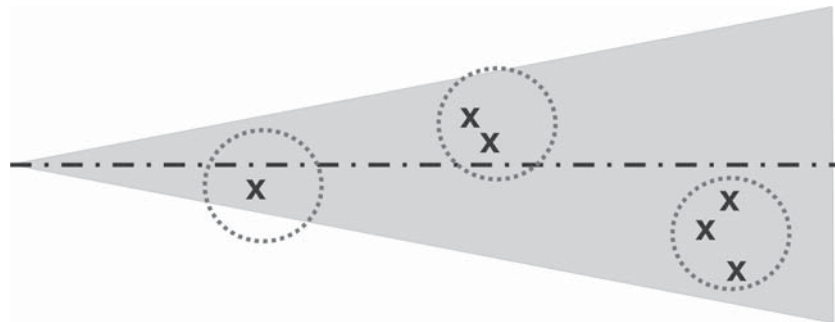


Abbildung 6.21: Beispiel der Analyse der Trennfähigkeit

Innerhalb der Cluster wird anschließend die laterale Trennfähigkeit untersucht. Weisen dementsprechend zwei Objekte einen Winkelunterschied kleiner als  $6^\circ$  auf, so werden diese Objekte weder anhand des longitudinalen noch des lateralen Positionsunterschieds getrennt.

Eine Trennung der Objekte kann somit nur noch aufgrund eines Geschwindigkeitsunterschieds erfolgen. Diese Trennung setzt der Algorithmus in einer impliziten Form um. Objekte werden nur zu einem Cluster zusammengefasst, wenn sie nicht innerhalb von drei Simulationsschritten die Grenzwerte der longitudinalen Trennfähigkeit überschreiten. Somit werden nur Objekte, welche keine oder eine nur äußerst geringe Differenzgeschwindigkeit haben, zu einem Cluster zusammengefasst und es wird zudem die geschwindigkeitsabhängige Trennfähigkeit berücksichtigt.

### Latenzzeit und Zykluszeit

Die untersuchten Effekte Latenzzeit und Zykluszeit müssen wie in Kapitel 6.2.2 analysiert durch einen Timing-Algorithmus umgesetzt werden. Abbildung 6.22 stellt dessen Prinzip dar.

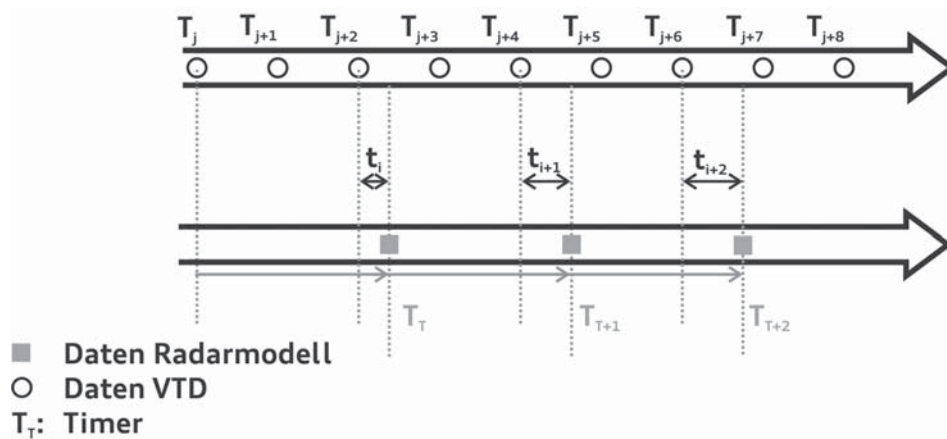


Abbildung 6.22: Implementierungsansatz der Zykluszeit und Latenzzeit

Die Taktrate der Simulationssoftware ist so konfiguriert, dass sie deutlich höher ist als die des Radarsensors. Der Timing-Algorithmus muss diese Daten in der Form verwalten, dass das gemessene Verhalten der Zykluszeit und der Latenzzeit umgesetzt wird. Dazu werden Timer verwendet, deren Zyklen frei wählbar sind. Zu Beginn werden die ersten Daten (hier:  $T_j$ ) sofort verwendet, verarbeitet und in Abhängigkeit von der Anzahl der Objekte im Sichtbereich verzögert ( $T_T$ ) ausgegeben (vgl. Gleichung 6.3). Die Daten, welche während dieser Wartezeit von VTD kommen, werden in Abhängigkeit zu dem aktuellen Timer und der geschätzten Ankunftszeit des nächsten Datenpaketes verworfen oder verwendet. Der Ankunftszeitpunkt  $T_{j+1}$  wird prädiziert und mit der aktuellen Zykluszeit des Timers gemäß Gleichung 6.14 verglichen.  $T_j$  entspricht hierbei der Ankunftszeit des aktuellen und  $T_{j-1}$  des letzten Datenpaketes.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

$$T_j + (T_j - T_{j-1}) \leq T_T \quad (6.14)$$

Wird diese Bedingung verletzt, werden die aktuellen Daten von VTD übernommen und die entsprechende neue Zeit des Timers nach der folgenden Gleichung berechnet.

$$T_{T+1} = f(\text{Anzahl}_{\text{Objekte}}) - t_i \quad (6.15)$$

mit:

$$f(\text{Anzahl}_{\text{Objekte}}) = \text{Latenzzeit} = 120 \text{ ms} + \text{Anzahl}_{\text{Objekte}} * 4 \text{ ms} \quad (6.16)$$

### Verdeckung

Der Effekt der Verdeckung wird erneut durch einen Clustering-Algorithmus umgesetzt. Abbildung 6.23 stellt dessen Prinzip dar. Zunächst werden die Objekte nach deren late-

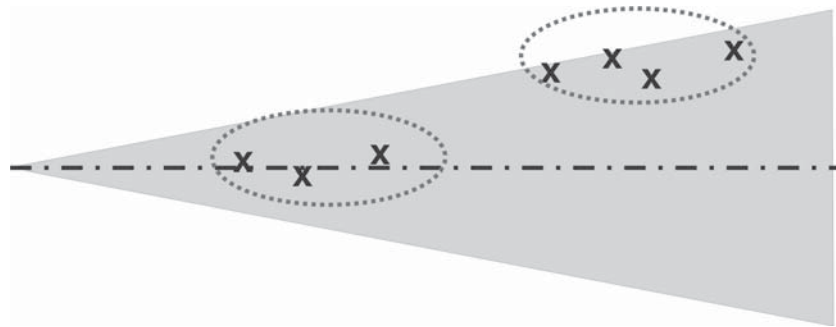


Abbildung 6.23: Beispiel der Analyse der Verdeckung

raler Position aufsteigend sortiert und daraufhin Cluster von Objekten mit einem kleinen lateralen Positionsunterschied (kleiner 0,10 m) gebildet.

Da das vorgelagerte Modul die Y-Werte bereits verändert hat, müssen an dieser Stelle des Sensormodells andere Positionswerte verwendet werden. Somit findet die Sortierung anhand des geometrischen Mittelpunkts der zu jedem Fahrzeug gehörenden Bounding Box statt.

In Abhängigkeit von der Position der Objekte in Bezug auf das EGO-Fahrzeug wird somit entschieden, welche Objekte innerhalb eines Clusters ausgegeben werden müssen, wobei in X-Richtung nahe Objekte vor fernen Objekten ausgegeben werden. Als Kriterien werden hierbei die in Kapitel 6.2.2 beobachteten Grenzen verwendet.

## Tracking

Um den Effekt des Trackings umsetzen zu können, muss die Historie der Objekte bekannt sein. Dazu verwendet das Sensormodell einen Mechanismus, der Informationen über jedes Objekt zwischenspeichert, sodass ein zeitlicher Zusammenhang erstellt werden kann. In Anhängigkeit von den vorangegangenen drei Messzyklen wird entschieden, ob ein Objekt verwendet und ausgegeben wird oder gelöscht werden muss. Dieser Mechanismus beeinflusst die Module Sichtbereich, Reflexionspunkt, Trennfähigkeit und Verdeckung und wirkt sich somit abschließend auch auf die Objektliste aus.

## Weitere Objektinformationen

Zusätzlich zu den bereits in Kapitel 6.2.2 analysierten und oben umgesetzten Effekten gibt der Radarsensor für jedes Objekt noch die Informationen Dynamic Property und Existenzwahrscheinlichkeit aus.

## Dynamic Property

Das Dynamic Property gibt dabei die Bewegungsrichtung der Objekte an, wobei die drei Zustände stehend, gleiche Richtung oder entgegengesetzte Richtung existieren. Durch einen einfachen Vergleich der Relativgeschwindigkeiten wird diese Information generiert.

## Existenzwahrscheinlichkeit

Die Existenzwahrscheinlichkeit gibt an, wie vertrauenswürdig die ausgegebenen Informationen eines Objektes sind. In der Regel steigt der Wert der Existenzwahrscheinlichkeit mit der Anzahl der Messzyklen ( $a$ ), bei denen ein Objekt kontinuierlich erfasst wurde, bis auf einen dimensionslosen, maximalen Wert von 100 an. Das Sensormodell berechnet diese gemäß Gleichung 6.17.

$$\text{Existenzwahrscheinlichkeit} = \begin{cases} 0 & \text{für } a \leq 3 \\ 12,8 \cdot a - 28,6 & \text{für } 3 \leq a \leq 10 \\ 100 & \text{für } a \geq 10 \end{cases} \quad (6.17)$$

Abbildung 6.24 zeigt jeweils ein Beispiel für ein gemessenes und ein modelliertes Signal.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

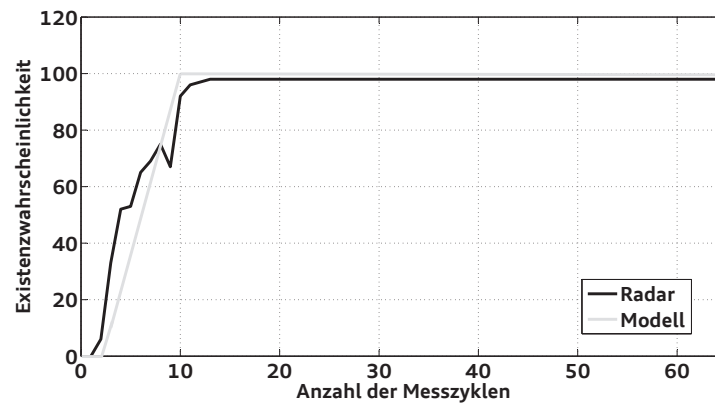


Abbildung 6.24: Gemessene und modellierte Existenzwahrscheinlichkeit

### 6.2.4 Validierung

Abschließend wird eine erste Validierung der implementierten Module qualitativ am HIL und quantitativ mithilfe von Referenzdaten durchgeführt.

#### Validierung am HIL

Die qualitative Untersuchung am HIL soll zeigen, dass das Steuergerät mit den Daten des Sensormodells die geforderten Funktionalitäten umsetzen kann.

Das ACC-Steuergerät konnte mit den vom Modell erzeugten Objektdaten die Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs und den Abstand zum Target-Fahrzeug einregeln. Zusätzlich werden die Effekte Sichtbereich, Lage des Reflexionspunktes, Trennfähigkeit sowie Verdeckung augenscheinlich analysiert und bewertet. Die Modelldaten zeigen ein vergleichbares Verhalten wie die Daten des realen Radarsensors.

#### Validierung mit Referenzdaten

Bei der Methode der Validierung des Sensormodells mit Referenzdaten werden, wie in Abbildung 6.25 dargestellt, die aufgezeichneten Referenzdaten über einen Adapter an die Eingangsschnittstelle des Sensormodells angepasst. Die so ermittelten Objektdaten werden anschließend in das Sensormodell eingespeist und die Ergebnisse mit den Daten des realen Sensors verglichen.

Abbildung 6.26 zeigt das Verhalten des lateralen Differenzabstands (Wandern am Heck) bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit. Visuell kann bereits eine sehr gute Übereinstimmung der Ausgabewerte festgestellt werden. Statistisch ermittelt der Radarsensor einen mittleren Abstand von 52 cm mit einer Standardabweichung von 50 cm. Die Werte des Sen-

## 6.2 Sensormodell des ACC-Domänen-HILs

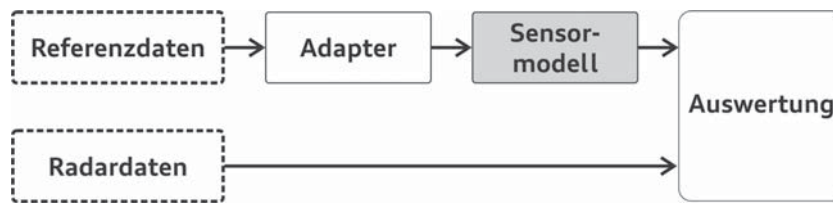


Abbildung 6.25: Validierungsprinzip mit Referenz

sormodells ergeben einen mittleren Abstand von 45 cm sowie ebenfalls eine Standardabweichung gleich 50 cm.

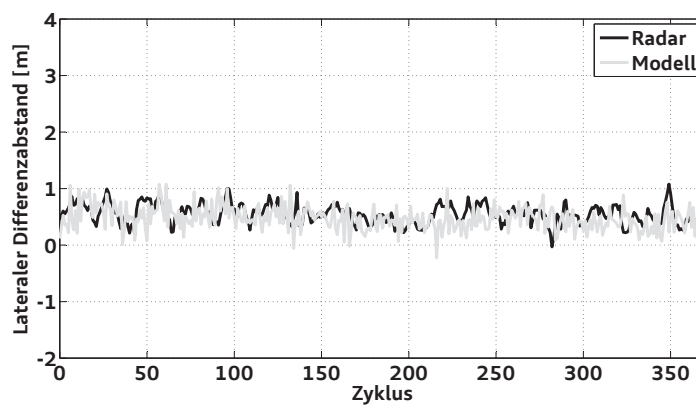


Abbildung 6.26: Genauigkeit des lateralen Differenzabstands des Sensormodells

Ein Ergebnis des so durchgeführten Vergleichs des longitudinalen Differenzabstands zeigt Abbildung 6.27. Es kann erneut eine äußerst hohe Übereinstimmung des vom Radar ausgegebenen Abstands mit dem berechneten des Modells festgestellt werden.



## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

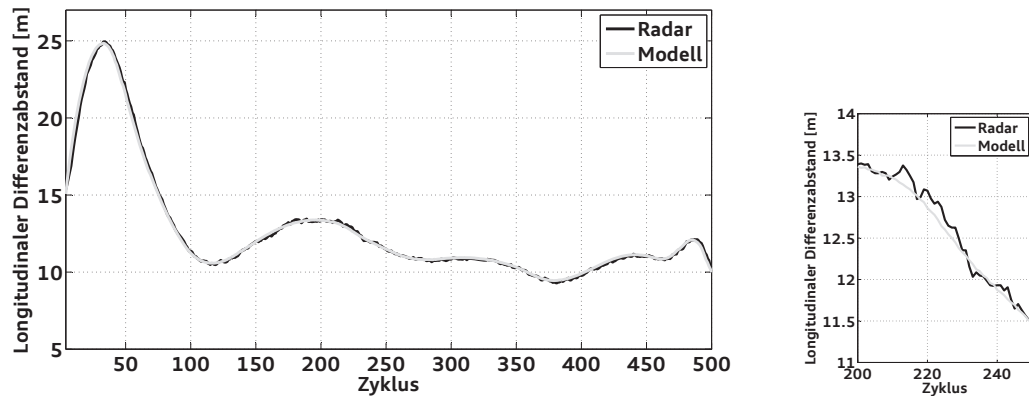


Abbildung 6.27: Genauigkeit des longitudinalen Differenzabstands des Sensormodells

### 6.2.5 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das Sensormodell als eine wesentliche Komponente des ACC-Domänen-HILs vorgestellt. Dabei mussten folgende Entwicklungsschritte bearbeitet werden:

- Auswahl der zu modellierenden Sensoreffekte
- Durchführung von statischen und dynamischen Messungen
- Auswertung der Messungen
- Implementierung der Sensoreffekte
- Validierung des Sensormodells

Das Sensormodell wurde so gestaltet, dass es relativ einfach angepasst, verbessert oder erweitert werden kann. Die modulare Umsetzung der Mechanismen, deren Parametrisierbarkeit sowie die Betrachtung der Sensoreigenschaften auf Datenebene (Objektliste) und nicht auf physikalischer Ebene erlauben zusätzlich deren Verwendung für andere (Radar-)Sensoren.

Für weitere Verbesserungen sollten detailliertere Messungen mit mehr Target-Fahrzeugen durchgeführt werden. Dadurch können beispielsweise die Effekte der Trennfähigkeit oder der Verdeckung noch besser bewertet und somit implementiert werden.

Durch die Integration des Sensormodells in den HIL kann nun im folgenden Kapitel die Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation am ACC-Domänen-HIL getestet und bewertet werden.

## 6.3 Validierung der Eigenschaftsentwicklung am ACC-Domänen-HIL

In den vorangegangenen Abschnitten wurden das Konzept sowie die einzelnen Komponenten des ACC-Domänen-HILs vorgestellt. Um dieses Werkzeug und somit die Simulation für die funktionale Entwicklung einsetzen zu können, muss abschließend untersucht werden, ob die bei der Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC definierten objektiven Messgrößen (vgl. Kapitel 5) vergleichbare Werte bei simulierten Fahrversuchen ergeben. Ein erneutes Eintragen der Kennwerte in die Dynamik-Reaktions-Ebene ist an dieser Stelle nicht nötig, da keine Anwendung durchgeführt wird, sondern die Anwendbarkeit der Bewertungsfunktionen validiert werden soll und dies, wie gerade beschrieben, durch die Überprüfung der Vergleichbarkeit der Kennwerte geschehen muss.

Da das ACC des aktuellen Audi A8 in den HIL integriert wurde, musste dieses Fahrzeug zur Analyse eingesetzt werden. Es wurden die fünf in Kapitel 5.2.1 relevanten Manöver Stationärfahrt, Auffahren auf Kolonne, Überholvorgang, Reaktion auf Einscherer und Reaktion auf Ausscherer sowohl in der Simulation als auch in Realfahrten in einer Standardapplikation durchgeführt. Bei der Auswertung wurden daraufhin die Daten der realen und simulierten Fahrten übereinander gelegt, um die Ergebnisse zu vergleichen.

In den folgenden Abbildungen werden die Daten der Realfahrt schwarz und die Daten der HIL-Fahrt grau dargestellt.

### Folgefahrt

Die Untersuchung des Manövers Folgefahrt wird mithilfe des longitudinalen Differenzabstands und der EGO-Geschwindigkeit analysiert. Das Target-Fahrzeug fährt bei beiden Fahrten eine konstante Geschwindigkeit von 80 km/h. Abbildung 6.28 zeigt die beiden Verläufe des Abstands. Der Abstand zwischen EGO und Target bleibt mit einem Mittelwert von 34,4 km/h und 34,4 km/h bei einer Standardabweichung von 0,18 km/h und 0,42 km/h sowohl bei der HIL- als auch der Realfahrt konstant. Außerdem gibt es eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Fahrten.

Abbildung 6.29 zeigt den Verlauf der longitudinalen EGO-Geschwindigkeit. Die HIL-Fahrt kommt hier auf eine mittlere Geschwindigkeit von 79,6 km/h und eine Standardabweichung von 0,01 km/h und die Realfahrt auf 80,0 km/h bzw. 0,39 km/h. Auch hier passen die Ergebnisse sehr gut zusammen.

Beim Manöver Folgefahrt erzeugt die Simulation sehr gute Ergebnisse, die mit der Realfahrt quasi übereinstimmen. Somit liefert der Einsatz der Bewertungsfunktionen aussagekräftige Ergebnisse.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

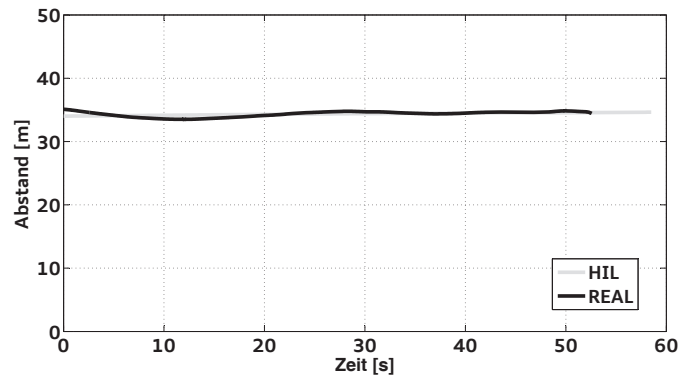


Abbildung 6.28: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Folgefahrt: Longitudinaler Differenzabstand

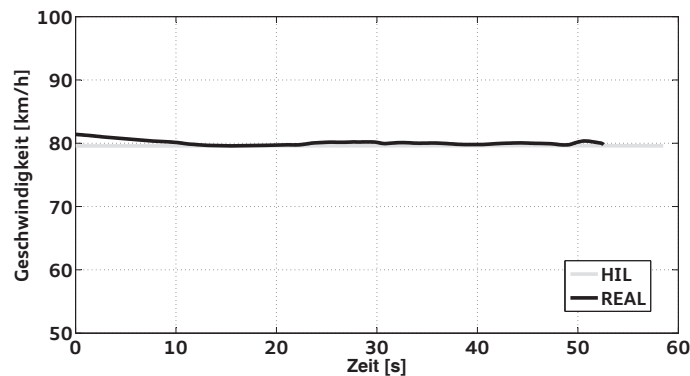


Abbildung 6.29: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Folgefahrt: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

### Auffahren auf Kolonne

In Abbildung 6.30, Abbildung 6.31 und Abbildung 6.32 sind die Verläufe der HIL- und der Realfahrt des Manövers Auffahren auf Kolonne abgebildet. Der Verlauf des longitudinalen Differenzabstands verdeutlicht sehr gut den stattfindenden Eintauchvorgang. Die HIL-Fahrt kommt dabei auf einen minimalen Wert von 25,0 m und die Realfahrt auf 24,4 m. Der danach stattfindende Einschwingvorgang liegt dem Verlauf nach quasi übereinander.

Auch der Verlauf der Beschleunigung zeigt gute Ergebnisse. So unterscheiden sich die beiden Graphen kaum in ihren Verläufen und erreichen Maximalwerte von  $1,0 \text{ m/s}^2$  bzw.

### 6.3 Validierung der Eigenschaftsentwicklung am ACC-Domänen-HIL

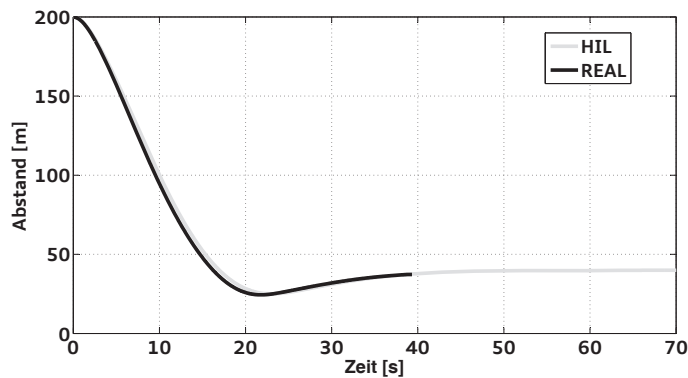


Abbildung 6.30: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinaler Differenzabstand

1,1 m/s<sup>2</sup>. Einzig der spätere Reaktionsabstand von 124 m zu 141 m bei der HIL- bzw. Realfahrt macht leichte Unterschiede deutlich.

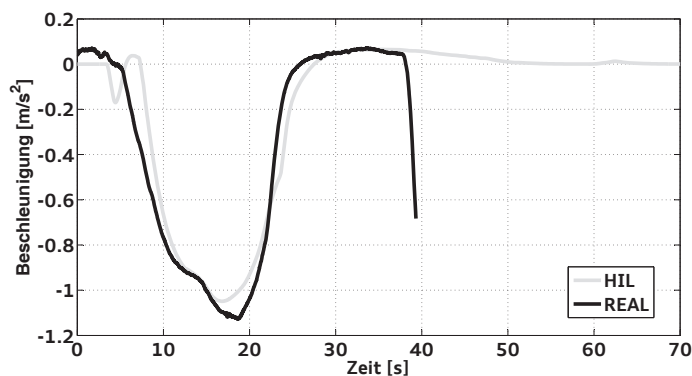


Abbildung 6.31: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Beschleunigung

Das Geschwindigkeitsprofil unterscheidet sich ebenfalls aufgrund der späteren Reaktion leicht, wobei die beiden Minimalwerte von 75,9 km/h und 73,9 km/h mit einer Differenz von 2,0 km/h die Bewertung nicht beeinflussen.

Zusammenfassend lässt sich für das Manöver Auffahren auf Kolonne festhalten, dass die Ergebnisse der HIL-Fahrt repräsentativ für das Verhalten im Fahrzeug sind. Auch der etwas geringere Reaktionsabstand würde bei Anwendung der aktuellen Bewertungsfunktionen (vgl. Abbildung 5.31) keine negative Auswirkung auf das Ergebnis haben.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

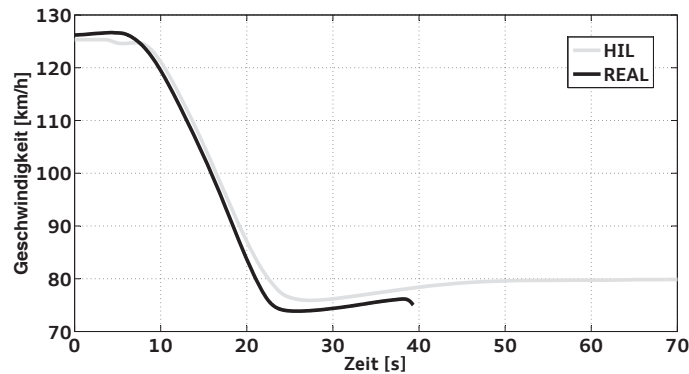


Abbildung 6.32: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Auffahren auf Kolonne: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

### Überholen

Zunächst zeigt das Y-Abstandsdiagramm (lateraler Differenzabstand zwischen dem EGO- und dem Target-Fahrzeug) in Abbildung 6.33, dass der Verlauf des Überholvorgangs der beiden Fahrten praktisch identisch ist.

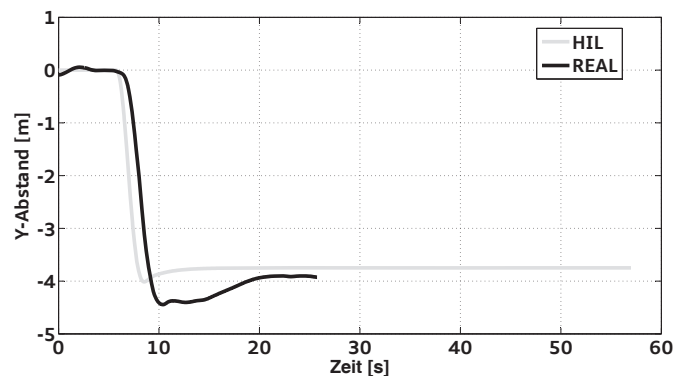


Abbildung 6.33: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Überholen: Lateraler Differenzabstand

Auch der Beginn des Beschleunigungsverlaufs, der in Abbildung 6.34 dargestellt ist, zeigt einen fast identischen Gradienten. Der anschließende recht deutliche Unterschied der Maximalwerte lässt sich durch eine Sonderfunktion im ACC erklären. Durch das Setzen des Blinkers und das Durchführen eines Spurwechsels verstärkt eine sogenannte Überholhilfe die Beschleunigung circa um die hier feststellbaren  $0,2 \text{ m/s}^2$ . Diese Zusatzfunktion des ACCs kann aufgrund der technischen Gegebenheiten aktuell noch nicht im

### 6.3 Validierung der Eigenschaftsentwicklung am ACC-Domänen-HIL

HIL umgesetzt werden, da noch keine Rückführung des Blinkersignals aus der Simulation in das Steuergerät existiert. Dies wirkt sich, wie in Abbildung 6.35 dargestellt, auch auf den Verlauf der Geschwindigkeit aus.

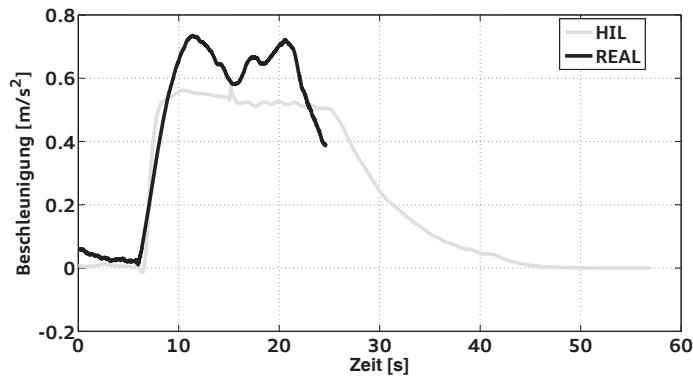


Abbildung 6.34: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Beschleunigung

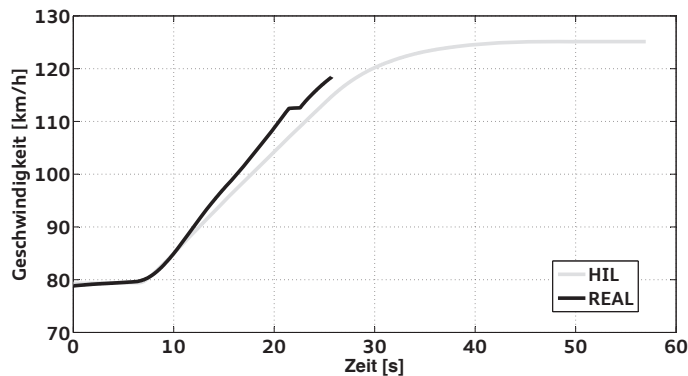


Abbildung 6.35: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Überholen: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

Für das Manöver Überholen kann festgestellt werden, dass der Ablauf sehr gut verglichen werden kann und nur die maximalen Beschleunigungswerte voneinander abweichen. Dies könnte jedoch durch weiterführende Arbeiten am HIL noch verbessert werden und somit erneut zu sehr guten Übereinstimmungen führen.

## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

### Einscheren

Abbildung 6.36 gibt den Verlauf des longitudinalen Differenzabstands der beiden Fahrten wieder. Der Beginn sowie die Gradienten sind praktisch identisch. Einzig die Minimalwerte von 21,3 m bei der Realfahrt bzw. 19,4 m bei der Simulation zeigen einen leichten Unterschied.

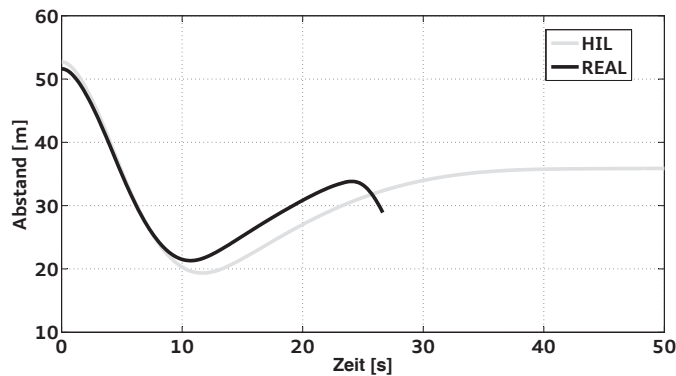


Abbildung 6.36: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinaler Differenzabstand

Der in Abbildung 6.37 dargestellte Beschleunigungsverlauf bestätigt den Verlauf des Abstands. Auch hier ist anfangs kein Unterschied feststellbar. Die maximal anliegende Verzögerung unterscheidet sich fast zeitgleich um sehr geringe  $0,07 \text{ m/s}^2$ .

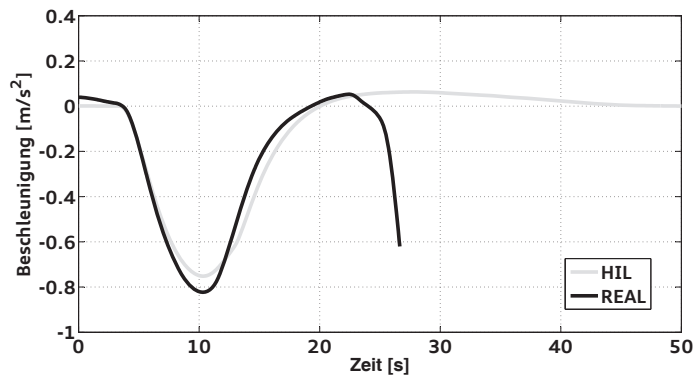


Abbildung 6.37: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung

Auf die in Abbildung 6.38 dargestellten Geschwindigkeitsprofile wirkt sich dieser leichte Unterschied kaum aus.

### 6.3 Validierung der Eigenschaftsentwicklung am ACC-Domänen-HIL

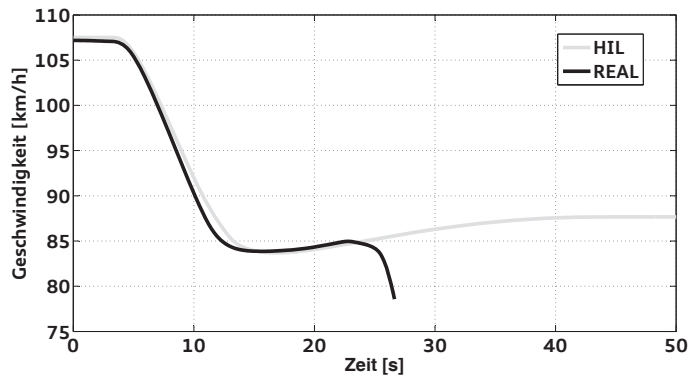


Abbildung 6.38: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Einscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

Mit diesen Ergebnissen kann auch für das Manöver Einscheren eine Anwendbarkeit der Simulation festgehalten werden. Besonders die, für die erarbeitete Methodik interessanten Größen, Dynamik und Reaktion zeigen keine bzw. nur sehr geringe Unterschiede.

#### Ausscheren

An dem in Abbildung 6.39 dargestellten Ausschervorgang kann zunächst die Vergleichbarkeit der Trajektorie festgestellt werden.

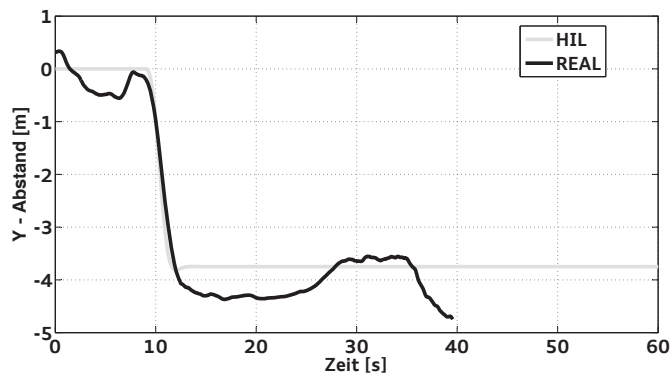


Abbildung 6.39: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Ausschereer: Lateraler Differenzabstand

Der Beschleunigungsverlauf zeigt zunächst praktisch gleiche Maximalwerte mit nur um  $0,07 \text{ m/s}^2$  unterschiedlichen Messgrößen (Abb. 6.40) und sehr ähnlichen Gradienten. Einzig die zeitlich spätere Reaktion nach 12,5 s zu 14,7 s bei der Real- bzw. HIL-Fahrt macht leichte Unterschiede deutlich.



## 6 Eigenschaftsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der Simulation

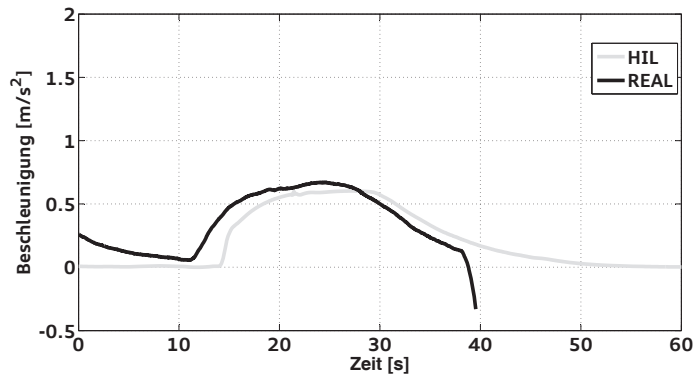


Abbildung 6.40: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Beschleunigung

Diesen Verlauf bestätigt auch die EGO-Geschwindigkeit in Abbildung 6.41.

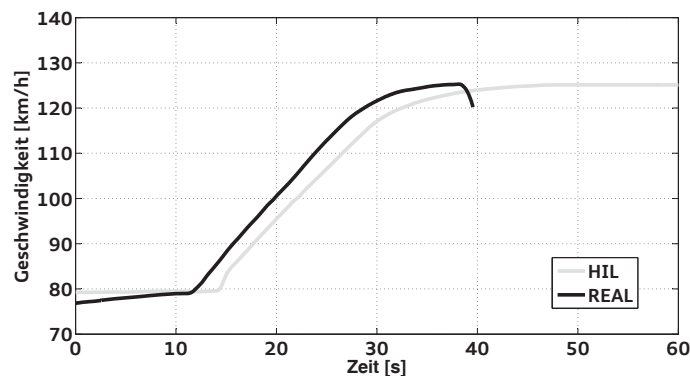


Abbildung 6.41: Vergleich HIL/Realtest des Manövers Reaktion auf Ausscherer: Longitudinale EGO-Geschwindigkeit

Zusammenfassend lässt sich für das Manöver Reaktion auf Ausscherer festhalten, dass die Simulation und die Realfahrt bis auf die Tatsache der späteren Reaktion einen identischen Verlauf zeigen. Dieser würde sich jedoch auf die Bewertung des Manövers auswirken, weswegen für weiterführende Arbeiten die hierfür verantwortliche Ursache herausgearbeitet und abgestellt werden sollte. Anschließend kann der definierte Prozess wieder angewendet und die Ergebnisse können verglichen werden.

Diese Validierung zeigt abschließend, dass die definierten Kennwerte sowohl aus den virtuell wie auch real durchgeführten Manövern ermittelt werden können. Somit kann-



### *6.3 Validierung der Eigenschaftsentwicklung am ACC-Domänen-HIL*

te gezeigt werden, dass sich die Simulation, mit der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Methode der Bewertungsfunktionen, für die funktionale bzw. eigenschaftsabhängige Entwicklung des ACCs eignet.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In der hier vorliegenden Arbeit, Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, wurden am Beispiel von ACC ein Prozess zur Bewertung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von Fahrerassistenzsystemen erarbeitet, ein Werkzeug zum Einsatz dieses in der Simulation entwickelt sowie die Anwendbarkeit des Prozesses in der Simulation validiert.

In einem ersten Schritt (Kapitel 2) wurde zunächst der Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung erarbeitet, um einen Überblick über vorhandene Tools sowie Entwicklungsmethoden zu erhalten und diese einheitlich zu klassifizieren. Anschließend wurden Fahrerassistenzsysteme und danach das System ACC als Beispiele moderner Fahrzeugsysteme und schließlich als Untersuchungsbeispiel vorgestellt (Kapitel 3).

Aufbauend auf diese Zusammenstellung wurden die Ziele und Ansätze dieser Arbeit definiert (Kapitel 4) und die drei konkreten Aufgaben abgeleitet:

- Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel des Adaptive Cruise Control (ACC).
- Konzeption und Aufbau eines FAS-Domänen-HILs als Simulationstool.
- Validierung der Anwendbarkeit der durch reale Testfahrten entwickelten Bewertungsfunktionen in der Simulation.

Für den ersten Teil der Aufgabendefinition (Kapitel 5), die Entwicklung des eigenschaftsabhängigen Sollverhaltens von ACC, wurde zunächst ein Bewertungsprozess definiert. So müssen über Testszenarien bzw. Fahrmanöver mithilfe einer geeigneten Messtechnik definierte physikalische Kennwerte wie Geschwindigkeit oder Fahrzeugbeschleunigung ermittelt werden. Da das Sollverhalten in Abhängigkeit von den Eigenschaften Sicherheit, Komfort, Dynamik und Sportlichkeit definiert werden soll, mussten Bewertungsfunktionen entwickelt werden, mit denen die physikalischen Kennwerte in diese Eigenschaften umgerechnet werden können.

Hierfür wurden aus der Vielzahl potentiell relevanter Verkehrssituationen die häufigsten ermittelt und die folgenden vier für die weiteren Betrachtungen ausgewählt: Folgefahrt, Auffahren auf Kolonne, Überholen, Reaktion auf Einscherer und Reaktion auf

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Ausscherer. Durch eine Studie, in der 36 Probanden jeweils drei unterschiedliche Systemausprägungen bewerten mussten, wurde mithilfe eines Paarvergleichs und der Auswertung nach dem Law of Comparative Judgement eine Rangfolge in den Eigenschaften Sicherheit, Komfort, Dynamik und Sportlichkeit ermittelt.

Aus einer zweiten, identischen Studie mit denselben Probanden, jedoch einem Fahrzeug einer völlig anderen Fahrzeugklasse (Studie I: Geländewagen; Studie II: sehr sportliche Mittelklasse) konnte folgende Schlussfolgerung abgeleitet werden: Für die Bewertung von Fahrerassistenzsystemen kann angenommen werden, dass die Fahrzeugklasse bzw. das Fahrzeugsegment keinen Einfluss auf das gewünschte Sollverhalten in den untersuchten Eigenschaften hat.

Zusätzlich konnten aus den Studien die folgenden Kennwerte herausgearbeitet werden: Verzögerung und Reaktionsabstand für die Manöver Auffahren auf Kolonne und Reaktion auf Einscherer bzw. Beschleunigung und Reaktionszeit für die Manöver Überholen und Reaktion auf Ausscherer. Aus diesen wurde eine Dynamik-Reaktions-Ebene aufgespannt für die im Weiteren durch die Kombination der subjektiven und objektiven Studienergebnisse Bewertungsfunktionen entwickelt werden konnten. Es existiert nun also eine Methode, die es ermöglicht, anhand von physikalischen bzw. messbaren Kennwerten eine Aussage über das wahrscheinliche Systemempfinden der Nutzer zu treffen.

Der zweite Teil der Aufgabe (Kapitel 6), die stärkere Integration der Simulation in den Produktentstehungsprozess, wurde im letzten Abschnitt der Arbeit betrachtet. Hierfür wurde aus den unterschiedlichen Simulationsmethoden die Hardware in the Loop (HIL) Simulation ausgewählt. Somit wurde ein Konzept für einen möglichst modularen ACC-Domänen-HIL erarbeitet und umgesetzt.

Ein wesentlicher Bestandteil, neben den Komponenten virtuelle Umwelt, Fahrer- und Fahrzeugmodell, Restbussimulation und Simulationsumgebung, ist hierbei das Sensormodell, da die Eigenschaften des jeweils eingesetzten Messprinzips und damit die des Sensors die Systemausprägung wesentlich beeinflussen. Das konkrete ACC, das in den HIL integriert wurde, verwendet hierbei zwei Radarsensoren. Für diese Ausprägung wurden die Systemeigenschaften über aufwendige statische wie auch dynamische Messungen analysiert und durch geeignete Methoden in Form eines Sensormodells umgesetzt. Abschließend wurde das Sensormodell validiert. Das Sensormodell wurde hierfür mit Referenzdaten aus realen Fahrversuchen stimuliert und der Ausgang des Modells mit den Daten des echten Sensorsystems verglichen. Die Auswertung zeigte dabei vergleichbare Ergebnisse zwischen dem Modell und dem realen Radarsensor.

Den Abschluss bildete die Untersuchung bzw. der Vergleich der real durchgeführten Fahrmanöver mit den simulierten Fahrmanövern (Kapitel 6.3). Dazu wurden jeweils die

Messgrößen der Dynamik-Reaktions-Ebene ermittelt und verglichen. Auch hier zeigte die Auswertung sehr gute Übereinstimmungen, wodurch die Anwendbarkeit der entwickelten Bewertungsfunktionen in der Simulation gezeigt werden konnte.

In dieser Arbeit wurde der stärkere Einsatz der Simulation in die funktionalen Entwicklung der hochkomplexen Fahrerassistenzsysteme durch die Anwendung eines objektiven Bewertungsverfahrens untersucht. Um die erarbeiteten Theorien auch konkret anwenden zu können, wurde das Fahrerassistenzsystem ACC als Beispiel verwendet. Eine vollständige Integration der erarbeiteten Methodik, bestehend aus dem Bewertungsprozess und den Test- und Simulationswerkzeugen, in einen ACC-Serienentwicklungsprozess erfordert jedoch noch weitere Arbeiten auf diesem Gebiet. So wurden die vier Manöver Auffahren auf Kolonne, Überholen, Reaktion auf Einscherer und Reaktion auf Ausscherer in den Studien betrachtet und folglich auch nur für diese die Bewertungsfunktionen entwickelt. Ein vollständig simulierter Test, mit dessen Hilfe die Entwickler konkrete Aussagen treffen sollten, würde eine Erweiterung des Fahrmanöverkatalogs um wichtige Verkehrssituationen wie beispielsweise Fahren in dynamischen Kolonnen, sowie eine detaillierte Analyse der gesamten Fläche der Dynamik-Reaktions-Ebenen erfordern.

Eine Übertragbarkeit der Methodik auf andere Fahrerassistenzsysteme kann folgendermaßen diskutiert werden: ACC ist ein System, welches den Fahrer bei seiner Fahraufgabe auf der Bahnführungsebene unterstützt bzw. aufgrund der bereits sehr hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit ihm die Längsführungsaufgaben in weiten Teilen der Fahraufgabe praktisch völlig abnehmen kann. ACC lässt sich damit zu den eingreifenden Systemen mit Aktuatorik zählen. Weitere Systeme, die auf der Bahnführungsebene zu dieser Kategorie gehören, sind der Lane Keeping Assist (LKA) und der Lane Change Assist (LCA). Zu den informierenden Systemen (ohne Aktuatorik) zählt das Lane Departure Warning (LDW) und zu den autonomen Systemen mit Aktuatorik die Automatische Notbremsung (ANB) oder Systeme der Forschung, wie der Staupilot. Für all diese Systeme, die aus einem aktiven Fahrzeuglenker einen Überwacher von Systemen machen, lässt sich annehmen, dass die im Zuge dieser Arbeit entwickelte Methodik auch auf sie adaptiert werden kann. Hingegen bei den Systemen der Navigationsebene Navigationssystem und Radiodienste (RDS-TMC) sowie Systemen der Stabilisierungsebene Antiblockiersystem (ABS), Antriebsschlupfregelung (ASR) und Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) wird keine Übertragbarkeit erwartet bzw. ist eine so aufwendige Modellierung von Bewertungsfunktionen nicht zielführend. Diese Systeme sollen in bestimmten Situationen, nach klaren Regeln und anhand von einfach zu definierenden



## *7 Zusammenfassung und Ausblick*

physikalischen Messwerten funktionieren, was somit zu einer einfachen Bewertung wie „Test erfüllt“ bzw. „Test nicht erfüllt“ führen würde.

Auch das entwickelte Konzept des FAS-Domänen-HILs sowie die angewendeten bzw. entwickelten Werkzeuge und Methoden lassen sich mit nur sehr geringem Aufwand an das jeweilige zu untersuchende System anpassen.

Somit lässt sich abschließend festhalten, dass diese Methode und vor allem die Simulation für die Entwicklung moderner Fahrzeugsysteme auf der Bahnführungsebene ein erhebliches Potential bietet.



# A Übersicht über die Test- und Simulationswerkzeuge

Im folgenden ist eine allgemeine Übersicht über die Werkzeuge Software in the Loop (SIL), Hardware in the Loop (HIL), Driver in the Loop (DIL), Vehicle in the Loop (VIL) und dem Realtest, sowie deren Eigenschaften zusammengefasst.



## A Test- und Simulationswerkzeuge

	SIL	HIL	DIL	VIL	Rapid Prototyping	Realtest On Board Test
<i>Fahrzeugsystem</i>	simuliert	real	simuliert oder real	simuliert oder real	simuliert	real
<i>Fahrer</i>	simuliert	simuliert	real	real	real	real
<i>Fahrzeug</i>	simuliert	simuliert	simuliert und/oder real	real	real	real
<i>Umwelt</i>	simuliert	simuliert	simuliert	real	real	real
<i>Verkehrsteilnehmer</i>	simuliert	simuliert	simuliert	simuliert	real	real
Test von...	Code	Steuergerät	Code/Steuergerät	Code/Steuergerät	Code	Steuergerät
Echtzeitfähigkeit	nein	ja	ja	ja	ja	ja

Tabella A.1: Übersicht über die Test- und Simulationswerkzeuge

++ = sehr gute Eigenschaft; + = gute Eigenschaft  
 0 = durchschnittliche Eigenschaft  
 - = schlechte Eigenschaft, -- = sehr schlechte Eigenschaft

	SIL	HIL	DIL	
			statisch	dynamisch mit Translation
Aufwand für Inbetriebnahme	++	+	0	--
Zeit für Inbetriebnahme	++	+	+	-
Betriebskosten	++	++	+	0
Zeit für Testdurchführung	++	+		-
Reproduzierbarkeit	++	++		++
Sicherheit	++	++		++
Realitätsnähe der Ergebnisse	-	0	-	+
Flexibilität	++	+		0
Sonstige Vor- und Nachteile	<b>Vorteil:</b> frühzeitiges Finden von Fehlern	<b>Vorteil:</b> frühzeitiger Test des Zusammenspiels von Software und Hardware	<b>Vorteil:</b> frühzeitiges Einbinden des Fahrers	<b>Nachteil:</b> nur Blackbox-Test
	<b>Nachteil:</b> nicht echtzeitfähig	<b>Nachteil:</b> nur Blackbox-Test	<b>Nachteil:</b> Risiko der Kinetose	

Tabelle A.2: Bewertung der Test- und Simulationswerkzeuge I



## A Test- und Simulationswerkzeuge

	Realtest		
	VIL	Rapid Prototyping	On Board Test
Aufwand für Inbetriebnahme	0	0	-
Zeit für Inbetriebnahme	0	0	-
Betriebskosten	0	0	-
Zeit für Testdurchführung	0	0	0
Reproduzierbarkeit	++	-	-
Sicherheit	+	-	-
Realitätsnähe der Ergebnisse	+	++	++
Flexibilität	0	0	-
Sonstige Vor- und Nachteile	<b>Vorteil:</b> frühzeitiges Einbinden des Fahrers  <b>Nachteil:</b> Streckendaten notwendig	<b>Vorteil:</b> frühzeitige Analyse des Echtzeitverhaltens  <b>Nachteil:</b> nur Funktionstest	<b>Vorteil:</b> reales System in realer Umgebung mit allen Schnittstellen <b>Nachteil:</b> sehr aufwendig oder später Einsatzzeitpunkt

Tabelle A.3: Bewertung der Test- und Simulationswerkzeuge II



## **B Detaillierter Überblick über die zitierten ACC-Studien**

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Thompson u. a. (2006a,b)
<b>Studienziele</b>	Ergonomische Betrachtung des ACC-HMIs
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- ACC mit Head-Up-Display (HUD)</li><li>- zwei Bedienvarianten von ACC<ul style="list-style-type: none"><li>divided: getrennte Geschwindigkeits- und Abstandsregelung</li><li>integrated: zusammengefasste Geschwindigkeits- und Abstandsregelung</li></ul></li></ul>
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	12 (6/6)
<b>Altersverteilung</b>	19 bis 53 Jahre
<b>Studiendauer</b>	ca. 15 Minuten Trainingsfahrt, ca. zwölf Minuten Testfahrt
<b>Ablauf/Szenarien</b>	Befahren einer Landstraße, während die Fahrer 18 verschiedene Aufgaben erfüllen mussten
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interview</li><li>- Fragebogen</li><li>- Erfassung der Augen- bzw. Blickbewegung</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- richtige ergonomische Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist für eine korrekte Interaktion von Fahrer und ACC-Fahrzeug entscheidend</li><li>- Anforderungen an ACC: haptische Rückmeldung für den Fahrer; Bedienelemente sollen leicht erreichbar und im Sichtbereich des Fahrers angeordnet sein</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Jenness u. a. (2008)
<b>Studienziele</b>	Überprüfung der Verkehrssicherheit mit ACC, abhängig vom Fahreralter
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Telefon- und Briefumfrage unter Fahrern, die ACC bereits selbst nutzen
<b>ACC-System</b>	verschiedene ACC-Systeme (nicht näher spezifiziert)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	370 (259/111)
<b>Altersverteilung</b>	25 bis 64 Jahre: 61% ab 65 Jahre: 39%
<b>Studiendauer</b>	k. A. <sup>1</sup>
<b>Ablauf/Szenarien</b>	—
<b>Messmethoden</b>	- Interview - Fragebogen
<b>Studienergebnisse</b>	- Mehrheit der Nutzer ist mit ACC zufrieden - weniger Spurwechselmanöver - geringere Stressbelastung

---

---

<sup>1</sup>k. A. bedeutet, dass in der jeweiligen Studie keine Angaben bzgl. des Testmerkmals gemacht wurden.

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Ioannou und Chien (1993) und Cremer u. a. (1998)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung des Verkehrsflusses mit ACC-Systemen
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Berechnung bzw. Rechnersimulation
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Simulation verschiedener Systeme auf unterschiedlichen internationalen Straßenabschnitten (z. B. Simulation von Autobahnen in der Nähe von London und Köln)</li><li>- Variation des ACC-Anteils am Gesamtverkehr</li><li>- Variation der Abstände zwischen den Fahrzeugen</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeiten, Fahrzeugpositionen, Abstand zum Vorderfahrzeug, Beschleunigungen, Anzahl der Spurwechsel und Kapazität der Straße
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- kritische Werte für mittlere Zeitlücken bzw. <math>TTC &lt; 1</math> s werden verringert</li><li>- Abstände zwischen Fahrzeugen nehmen ab</li><li>- Geschwindigkeitsunterschiede werden abgebaut</li><li>- Verkehrsdichte nimmt zu</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Ioannou und Stefanovic (2005)
<b>Studienziele</b>	Vergleich von rein manueller Fahrt und Mixbetrieb (Spurwechsel- und Verkehrsflussuntersuchungen)
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest auf abgesperrtem Testgelände
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	k. A.
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	verschiedene Szenarien (u.a. Einschervorgänge)
<b>Messmethoden</b>	- Erfassung von Geschwindigkeit, Position auf der Straße und Abständen zu anderen Fahrzeugen - Berechnungen des Schadstoffausstoßes
<b>Studienergebnisse</b>	- homogenerer Verkehrsfluss mit ACC - Reduzierung von Verbrauch und Schadstoffemissionen

---



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Marsden u. a. (2001)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung von Fahrerverhaltensänderungen im Umgang mit ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	k. A.
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	neun Tage
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Alltagsfahrten in drei verschiedenen Ländern/Städten (Lille, London, Hamburg)</li><li>- keine gestellten Szenarien</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Überwachung des Verkehrsraums und von anderen Verkehrsteilnehmern durch zwei im Fahrzeug eingebaute Videokameras</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug, Bremskraft, Beschleunigung und TTC</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- bei dichtem Verkehrsaufkommen generiert das ACC-System sehr viele Fehler</li><li>- Einsatz von ACC im Stadtverkehr nur bedingt möglich</li><li>- homogenere Beschleunigungswerte</li><li>- daraus ergeben sich zum Teil erhebliche Kraftstoffeinsparungen</li><li>- optimaler Prozentsatz der ACC-Fahrzeuge am Gesamtverkehr liegt zwischen 10% und 20%</li><li>- über 40% sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit wieder und der Verkehrsfluss wird zäher</li></ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Werf u. a. (2002)
<b>Studienziele</b>	Einfluss des ACCs auf die Kapazität und den Verkehrsfluss
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Berechnung bzw. Rechnersimulation
<b>ACC-System</b>	ACC, kombiniert u.a. mit Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- drei verschiedene Simulationen: manuelle Fahrt, ACC-Fahrt, ACC-Fahrt mit zusätzlicher Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation</li> <li>- unterschiedliche Verkehrsflusssimulationen auf Autobahnen (z. B. verschiedene Beschleunigungswerte für ACC-Fahrzeuge)</li> </ul>
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeiten, Fahrzeugpositionen, Abstand zum Vorderfahrzeug und Beschleunigungen
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- konventionelles ACC kann Verkehrsfluss und Kapazität nur geringfügig verbessern (Verbesserung der Kapazität auf Autobahnen um 7% bei Marktdurchdringung von 20% bis 60%)</li> <li>- Marktanteil von über 60% kann die Kapazität sogar leicht verringern (Fahrer wählen mit ACC teilweise höhere Abstände als im Manuellbetrieb)</li> <li>- Ziehharmonikaeffekte werden beim Verzögern/Beschleunigen verringert</li> <li>- ACC-Systeme mit zusätzlicher Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation realisieren deutlich kürzere Fahrzeugabstände und bringen dadurch eine signifikante Kapazitätserhöhung (Kapazitätserhöhung ist direkt proportional zum Quadrat der Marktdurchdringung)</li> <li>- Schlussfolgerung: evtl. eigene Fahrspur für ACC-Fahrzeuge mit Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation</li> </ul>

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Bruin u. a. (2007)
<b>Studienziele</b>	Entwurf und Test eines ACC-Systems kombiniert mit Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest auf ruhiger Landstraße
<b>ACC-System</b>	ACC, kombiniert mit Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation per WLAN
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	k. A.
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	Folgefahrt mit anschließender Bremsung in den Stillstand
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeit, Position auf der Straße (GPS) und Abständen zu anderen Fahrzeugen
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Bremsreaktion erfolgt schneller durch WLAN-Kommunikation</li><li>- Reduzierung von Reaktions- bzw. Anhalteweg</li><li>- Ziehharmonikaeffekte werden beim Verzögern/Beschleunigen verringert</li><li>- gleichmäßigerer Verkehrsfluss</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Davis (2007, 2004)
<b>Studienziele</b>	Auswirkungen von ACC in einem gemischten Verkehr auf den Verkehrsfluss
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Berechnung bzw. Rechnersimulation
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	unterschiedliche Verkehrsflusssimulationen auf Autobahnen mit Auf- und Abfahrten (z. B. verschiedene Beschleunigungswerte für ACC-Fahrzeuge)
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeiten, Fahrzeugpositionen, Abstand zum Vorderfahrzeug und Beschleunigungen
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- bei 50%-Anteil an ACC-Fahrzeugen am Gesamtverkehr kommt es zu erheblich weniger Stauungen und der Verkehrsfluss fließt gleichmäßiger</li><li>- Durchfluss erhöht sich um bis zu 20% im Vergleich zu rein manuellem Betrieb</li></ul>

---

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Hochstädter und Ludmann (1999)
<b>Studienziele</b>	Analyse der Stabilität von Fahrzeugkolonnen und verkehrliche Auswirkungen der Abstandsregelung
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Berechnung bzw. Rechnersimulation (PELOPS)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- verschiedene Reglermodi für unterschiedliche Fahrsituationen im Autobahn- wie im Stadtverkehr (z. B. Annähern, Folgen, Ein- oder Ausscheren des Vorderfahrzeugs)</li><li>- Ausstattungsrate von ACC am Gesamtverkehr: 6%, 20%, 40%, 100%</li><li>- Untersuchungsszenarien: Autobahn bzw. Stadtbetrieb mit verschiedenen Verkehrsdichten vom freien Verkehr bis hin zum Stau</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeiten, Fahrzeugpositionen, Abstand zum Vorderfahrzeug, Beschleunigungen, Kolonnenstabilität/Übertragungsverhalten, Sensorfehlern, Verkehrsfluss Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- gleichmäßigerer Verkehrsfluss (Beschleunigungsspitzen werden durch ACC abgebaut)</li><li>- Kraftstoffverbrauch kann reduziert werden</li><li>- Schadstoffemissionen werden zum Teil stark abgebaut</li></ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Neunzig und Breuer (2000)
<b>Studienziele</b>	Analyse von Fahrerassistenzsystemen im Hinblick auf Schadstoffausstoß und Fahrkomfort
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Berechnung bzw. Rechnersimulation (PELOPS)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- unterschiedliche Verkehrsflusssimulationen im Stadtbetrieb</li><li>- Vergleich von manueller Fahrt mit ACC-Betrieb bei variierenden Anteilen der ACC-Fahrzeuge am Gesamtverkehr (5%, 40%, 100%)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeiten, Fahrzeugpositionen, Abstand zum Vorderfahrzeug, Beschleunigungen und Verkehrsdichte
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- tatsächliches Kraftstoffeinsparpotential eines ACC-Systems hängt stark vom Fahrerverhalten ab</li><li>- ein sparsamer Fahrer wird durch ACC nicht bzw. gering bei der Kraftstoffeinsparung unterstützt (Einsparpotential ist ausgeschöpft)</li><li>- gleichmäßigerer Verkehrsfluss (Beschleunigungsspitzen werden durch ACC abgebaut)</li><li>- Kraftstoffverbrauch kann reduziert werden</li></ul>



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Bose und Ioannou (2001, 2000)
<b>Studienziele</b>	Umwelttechnische Untersuchung von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Berechnung bzw. Rechnersimulation (Comprehensive Modal Emissions Modell)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	unterschiedliche Verkehrsflusssimulationen (z. B. verschiedene Beschleunigungswerte für ACC-Fahrzeuge)
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeiten, Fahrzeugpositionen, Abstand zum Vorderfahrzeug und Beschleunigungen
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kraftstoffverbrauch sinkt um 8,5% bei 10%-Anteil an ACC-Fahrzeugen am Gesamtverkehr</li><li>- Schadstoffemissionen werden um 8,1% bis 18,4% bei 10%-Anteil an ACC-Fahrzeugen am Gesamtverkehr reduziert</li><li>- diese Einsparpotentiale können bis auf 28,5% (Kraftstoffverbrauch) bzw. 1,5% bis 60,6% (Schadstoffemissionen) anwachsen</li></ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Alkim u. a. (2007)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung des Einflusses von ACC auf die Verkehrssicherheit, den Verkehrsfluss und die Umwelt
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC mit Lane Departure Warning
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	19 (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	fünf Monate
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- ein Monat fahren Probanden ohne Assistenzsysteme (für Vergleichswerte), vier Monate mit Assistenten</li><li>- Alltagsfahrten (keine gestellten Szenarien)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fragebogen (vor, während und nach Versuch)</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeiten von ACC- und Vorderfahrzeug, Abstand zum Vorderfahrzeug, Fahrzeugposition, Beschleunigung/Verzögerung und Kraftstoffverbrauch</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- LDW wird öfter benutzt als ACC, ACC wird v. a. auf Autobahnen und Landstraßen bei dichtem aber frei fließendem Verkehr aktiviert</li><li>- Fahrer empfinden ACC als nützlicher und effektiver bzw. vertrauen diesem mehr als LDW</li><li>- Lernphase beim ACC ist länger als beim LDW (größerer Funktionsumfang beim ACC)</li><li>- Abstände zum Vorderfahrzeug werden mit ACC größer</li><li>- Harmonisierung von Geschwindigkeit, Abstand und Beschleunigung durch ACC</li><li>- 50% der Fahrer leiten ein Überholmanöver mit ACC früher ein, um das Assistenzsystem an einem Eingriff zu hindern</li><li>- mit ACC vermehrt Fahren auf der mittleren und linken Fahrspur</li><li>- ACC fördert das Ausführen von Nebentätigkeiten (z. B. Rauchen, Essen, Trinken)</li></ul>





## *B ACC-Studien*

- ACC und LDW verbessern die Verkehrssicherheit um ungefähr 8% (sehr geringe Sicherheitsabstände werden verringert)
  - Kraftstoffverbrauch geht um 3% zurück
  - Schadstoffemissionen sinken um 10%
-

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Viti u. a. (2007)
<b>Studienziele</b>	Bewertung von ACC bzgl. Verkehrsdichte, Sicherheit und Umweltbelastung
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC mit Lane Departure Warning
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	19 (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	sechs Monate
<b>Ablauf/Szenarien</b>	- ein Monat fahren Probanden ohne Assistenzsysteme (für Vergleichswerte), vier Monate mit Assistenten - Alltagsfahrten (keine gestellten Szenarien)
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrzeugposition, Bremskraft, Aktivitätsstatus der ACC-Nutzung und Abstand zu anderen Fahrzeugen
<b>Studienergebnisse</b>	- ACC-Nutzung durch Fahrer ist von der Verkehrsdichte bzw. vom Verkehrsfluss abhängig - oftmals Deaktivierung der ACC-Funktion durch den Fahrer in unkritischen Situationen - ist ACC einmal deaktiviert, kann bis zur Wiederaktivierung geraume Zeit vergehen - viele Fahrer deaktivieren ACC bei dichtem Verkehr - auch bei 100% ACC-Durchdringung im Straßenverkehr werden manche Fahrzeuge mit deaktiviertem ACC betrieben - daraus ergibt sich ein zäher und ineffizienter Verkehrsfluss - Fahrer bleibt weiterhin ein entscheidender Faktor bzgl. eines reibungslosen Verkehrsflusses - kleiner Sicherheitsgewinn (TTC wird um 8% reduziert) - Kraftstoffverbrauch sinkt um 3% - Schadstoffausstoß geht um 10% zurück - Homogenisierung von Geschwindigkeit und Abstand

---



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Hoedemaeker und Brookhuis (1998)
<b>Studienziele</b>	Adaptionseffekte bzgl. der Nutzung von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	38 (25/13)
<b>Altersverteilung</b>	25 bis 60 Jahre
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	vier Fahrergruppen (eingeteilt nach Fahrstil) mussten eine Folge von einzelnen, bestimmten Fahraufgaben (z. B. Folgefahrt, Auffahren auf Stauende, dichter Verkehr) ausführen
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interview</li><li>- Fragebogen (Skalenbewertung durch Fahrer/5-Punkte-Skala: -2 bis +2)</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug und Bremskraft</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fahrgeschwindigkeit steigt</li><li>- Abstand sinkt, dadurch fällt Bremsung im Notfall härter aus</li><li>- Spurwechsel nehmen zu</li><li>- Fahrt vermehrt auf linker Fahrspur</li><li>- Komfort- und Nutzengewinn</li></ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Dragutinovic u. a. (2005)
<b>Studienziele</b>	Verhaltenseffekte bei der Benutzung von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop
<b>ACC-System</b>	ACC, ACC Stop&Go, ICC (Intelligent Cruise Control)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	12 bis 60 (je nach Studie) (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	k. A.
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Auswertung von acht verschiedenen Studien durch meta-analytischen Ansatz</li><li>- Interview</li><li>- Fragebogen</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Position auf der Straße, Abständen zu anderen Fahrzeugen u.a.</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Geschwindigkeit steigt</li><li>- Abstand zwischen den Fahrzeugen sinkt</li><li>- geringere physische Belastung des Fahrers mit ACC</li></ul>



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Freyer (2008); Freyer u. a. (2007)
<b>Studienziele</b>	Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	- Studie 1: ACC (30 bis 180 km/h) - Studie 2: ACC (30 bis 180 km/h) mit Spurwechselunterstützungsfunktion (SWU)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	- Studie 1: 26 (15/11) - Studie 2: 26 (14/12)
<b>Altersverteilung</b>	- Studie 1: Durchschnittsalter 47 Jahre - Studie 2: Durchschnittsalter 45 Jahre
<b>Studiendauer</b>	Gesamtdauer der beiden Versuche von je drei Monaten mit einer durchschnittlichen Fahrzeit von ca. einer Stunde pro Versuchsfahrt (ca. 100 km)
<b>Ablauf/Szenarien</b>	Gliederung in fünf aufeinander aufbauende Phasen 1. Eingewöhnungsphase an das Versuchsfahrzeug 2. Messfahrt ohne ACC (Vergleichsfahrt) 3. ACC-Intensivtraining (u.a. Erlernen der Bedienelemente, ACC in Grenzsituationen) 4. Messfahrt mit ACC 5. Abschlussfragebogen
<b>Messmethoden</b>	- Interview - statistische Auswertung von Fragebögen - Kamera zur Dokumentation der Fahrszene bzw. zur Erfassung von Spurbreite, Spurmarkierungsart, Querablage, Gierwinkelfehler, Krümmung und Krümmungsänderung - Erfassung von Objektpositionen, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen, Spurwechseldauer, spezifischen Daten der Zielobjektauswahl, der Fahrschlauchbildung und ausgewählten internen Reglergrößen
<b>Studienergebnisse</b>	<b>Studie 1</b> - v. a. komfortable Fahrer fahren mit ACC signifikant schneller

- niedrige Akzeptanz des Serien-ACC-Systems in Spurwechselsituationen
- vermehrtes Fahren auf der linken Spur
- Abnahme der Gesamtanzahl von Spurwechseln während der Messfahrt mit ACC bei sportlichen Fahrern, bei komfortablen Fahrern steigt sie allerdings
- mit ACC gesteigener Ausscherabstand
- Fahrer nimmt bewusst Kompensationshandlungen vor
- Spurwechselmanöver mit ACC haben immer noch Schwächen im Vergleich zu manuellen Spurwechseln
- bei Fahrt mit ACC erhöht sich Anzahl der Bremsungen

### **Studie 2**

- mit ACC/SWU generell und unabhängig vom Fahrstil signifikant höhere Geschwindigkeiten
  - ermittelte Fahrverhalten mit dem ACC/SWU-System ist viel harmonischer (z. B. Harmonisierung der Geschwindigkeiten)
  - Zwischen der Messfahrt mit und ohne ACC/SWU keine signifikanten Unterschiede in den wesentlichen Parametern (Spurwechselanzahl, Ausscherabstand, Ausscherdifferenzgeschwindigkeit, Verteilung der Spurwechselklassen, Bremsungen)
  - verbesserte Systemtransparenz und Akzeptanz in der subjektiven Bewertung der Probanden
-

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Lange u. a. (2008)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit von der Modalität und vom Automatisierungsgrad
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC mit Head-Up-Display (HUD), max. Verzögerung $-3 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	25 (17/8)
<b>Altersverteilung</b>	18 bis 62 Jahre, Durchschnittsalter 39,5 Jahre
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Eingewöhnungsfahrt</li><li>- Versuchsfahrt auf Autobahnring mit autobahnspezifischen Fahrsituationen (z. B. Folgefahrt, Überholmanöver)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fragebogen</li><li>- Erfassung der Blickbewegungen</li><li>- Erfassung von Objektpositionen, Fahrzeuggeschwindigkeiten und -beschleunigungen, Spurwechseldauer, spezifischen Daten der Zielobjektauswahl, der Fahrschlauchbildung und von ausgewählten internen Reglergrößen u. a.</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Probanden fahren mit ACC im Mittel schneller</li><li>- Geschwindigkeiten pendeln sich auf einen Wert ein</li><li>- geringfügige Reduktion der Fahrzeugabstände durch ACC</li><li>- Spurhaltung verschlechtert sich leicht mit ACC (Abweichung von Spurmitte)</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Stanton u. a. (1997)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der Fahrerbelastung und Kontrollübernahme durch ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	12 (6/6)
<b>Altersverteilung</b>	Durchschnittsalter 21 Jahre
<b>Studiendauer</b>	ca. 30 Minuten
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- drei Versuchsabschnitte<ol style="list-style-type: none"><li>1. manuelle Probefahrt/Folgefahrt</li><li>2. manuelle Folgefahrt</li><li>3. ACC-Folgefahrt mit plötzlich auftretendem Fehler</li></ol></li><li>- Fahrer mussten während der drei Abschnitte Nebentätigkeiten (z. B. Bedienung des Radios) erfüllen</li><li>- Fehlersimulation des ACC-Systems (Übernahmesituation durch Fahrer)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interview</li><li>- statistische Auswertung der Nebentätigkeiten</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug, Bremskraft und Beschleunigung</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Geschwindigkeit bleibt unverändert</li><li>- Abstand bleibt gleich</li><li>- keine erhöhte Tendenz zu Spurwechseln</li><li>- körperliche Belastung des Fahrers geht zurück</li><li>- bei Fehlersimulation: Fahrer reagierten zum Teil sehr spät (bei vier Fahrern kam es zum Auffahrunfall)</li></ul>

---



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Filzek (2002)
<b>Studienziele</b>	Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realfahrten, Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	29 (28/1)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	zwei Stunden bzw. 229 km
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleich der Fahrweise mit und ohne Einsatz eines ACC</li> <li>- mehrheitlich Autobahnfahrt (Fahrt wird anschließend nach bestimmten Fahrsituationen klassifiziert, z. B. freie Fahrt, Folgefahrt, Annähern, Aus- und Einscheren, Spurwechsel)</li> </ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mitfahrender Versuchsleiter führte ein Fahrprotokoll</li> <li>- Persönlichkeits- und Leistungstests (z. B. Sehtest)</li> <li>- Befragungen der Probanden vor und nach der Fahrt</li> <li>- Erfassung von Abständen, Relativgeschwindigkeiten und Positionen der anderen Verkehrsteilnehmer, Querbeschleunigungen, Gierrate, Raddrehzahlen, Bremspedalkraft und Lenkradwinkel</li> <li>- Überwachung des Verkehrsraums und anderer Verkehrsteilnehmer durch eine im Fahrzeug eingebaute Videokamera</li> </ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- beim Einscheren anderer Verkehrsteilnehmer auf eigene Fahrspur wurde im ACC-Betrieb später verzögert</li> <li>- dadurch ergibt sich ein geringerer Abstand</li> <li>- bei Geschwindigkeitsunterschieden oberhalb von 45 km/h musste der Fahrer immer eingreifen</li> <li>- bei Folgefahrt ergeben sich keine Unterschiede bzgl. der Geschwindigkeit</li> <li>- minimale Werte für TTC etwas niedriger durch ACC, aber im Mittel ergibt sich eine höhere TTC</li> </ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Tricot u. a. (2004)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstelle bei einem Fahrerassistenzsystem
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC, max. Verzögerung $-3 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	45 (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	22 bis 52 Jahre
<b>Studiendauer</b>	zwei kurze Trainingsphasen und Messfahrt über 50 km
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fahrt auf Landstraße und Autobahn (einschließlich Auf- und Abfahrt)</li><li>- 36 Verkehrssituationen eingeteilt in sechs Gruppen (klassisches Überholen, selbst überholt werden, behinderter Überholvorgang durch nachfolgendes Fahrzeug, behinderter Überholvorgang durch entgegenkommendes Fahrzeug, Einscheren und plötzliche Verlangsamung eines Target-Fahrzeugs)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interview</li><li>- Fragebogen</li><li>- Aufzeichnung von Fahrercommentaren während der Fahrt</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug, Bremskraft, Beschleunigung, Position und Bewegung der Füße und Zahl der Überholmanöver</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Geschwindigkeit sinkt</li><li>- Spurwechselverhalten geht zurück</li></ul>

---

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Kovordányi (2005)
<b>Studienziele</b>	Adaptivitätsuntersuchungen von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC, max. Verzögerung $-3 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	30 (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	45 Minuten
<b>Ablauf/Szenarien</b>	fünf Szenarien unter kritischen Bedingungen (z. B. Target-Fahrzeug schert ein, Auffahren auf ein Stauende nach einer Kurve)
<b>Messmethoden</b>	- Fragebogen (NASA-TLX-Skala) - Erfassung von Durchschnittsgeschwindigkeit, Abstand und Verzögerung
<b>Studienergebnisse</b>	- Geschwindigkeit sinkt leicht ab - mittlere Zeitlücke steigt

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Ojeda und Nathan (2006)
<b>Studienziele</b>	Analyse der Lernphase von Fahrern im Umgang mit ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC (60 bis 160 km/h)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	8 (8/0), mit ACC unerfahrene aber mit konventionellem Tempomaten erfahrene Fahrer
<b>Altersverteilung</b>	25 bis 40 Jahre
<b>Studiendauer</b>	je Proband sechs Tage in vier Wochen
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- verschiedene Szenarien auf Autobahnen und Landstraßen (u. a. Folgefahrten, Einschervorgänge, Überholmanöver)</li><li>- Probanden mussten das ACC-System anderen Fahrern zeigen und sie darin unterrichten</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interview</li><li>- Fragebögen</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrzeugposition, Bremskraft, Aktivitätsstatus der ACC-Nutzung und Abstand zu anderen Fahrzeugen</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- erst nach durchschnittlich 370 km versteht der Fahrer das ACC-System, kann die Reaktionen des Assistenten richtig einschätzen und in Gefahrensituationen gegebenenfalls eingreifen</li><li>- erst nach 370 km wird von den meisten Fahrern Vertrauen gegenüber dem ACC-System entwickelt (Restzweifel bzgl. kritischen Verkehrssituationen und Überholmanövern verbleiben)</li><li>- die Mehrheit der Probanden reduziert mit der Zeit die Durchschnittsgeschwindigkeit im ACC-Modus</li><li>- Aufmerksamkeit der Fahrer wird durch ACC nicht beeinflusst</li><li>- kritische Abstände zwischen Fahrzeugen werden abgebaut</li><li>- Fahrt mit ACC wird von Fahrern als sicher und komfortabel angesehen</li></ul>



## *B ACC-Studien*

- Fahrer fühlen sich durch ACC in der Lage vermehrt Nebenaufgaben auszuführen
  - jedoch bevorzugt die Mehrheit der Probanden eine manuelle Fahrt gegenüber einer ACC-Fahrt
-

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Acarman u. a. (2006)
<b>Studienziele</b>	Vergleich von ACC mit und ohne Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Berechnung bzw. Rechnersimulation
<b>ACC-System</b>	ACC Stop&Go
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	Simulierter Stadtverkehr mit zwölf Fahrzeugen
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Abstand, Geschwindigkeit und Beschleunigung
<b>Studienergebnisse</b>	ACC mit zusätzlicher Kommunikation unter den Fahrzeugen ergibt im Stadtbetrieb einen effizienten und homogenen Verkehrsfluss mit geringen Geschwindigkeitsunterschieden

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Fancher u. a. (1998)
<b>Studienziele</b>	Sicherheits- und Komfortuntersuchungen von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC ohne aktiven Bremseneingriff, max. Verzögerung $-0,7 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	108 (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	zwei bis fünf Wochen je Proband
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Alltagsnutzung</li><li>- Fahrversuche unter verschiedenen Straßen- und Verkehrsbedingungen (inkl. Stadtbetrieb)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fragebögen</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug, Bremskraft, Beschleunigung und Systemzustand</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Benutzung von ACC bei moderatem Verkehrsaufkommen und bei hohen Geschwindigkeiten</li><li>- Zahl der kritischen Abstände wird reduziert, Abstände pendeln sich ein</li><li>- ACC-System ist relativ leicht zu erlernen und zu benutzen</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Rakha u. a. (2001)
<b>Studienziele</b>	Beeinflussung der Sicherheit bei der Fahrzeugführung durch den Einsatz von ACC im Vergleich zu einem konventionellen Tempomaten
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC und konventioneller Tempomat
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	108 (54/54)
<b>Altersverteilung</b>	20 bis 70 Jahre
<b>Studiendauer</b>	fünf Wochen
<b>Ablauf/Szenarien</b>	Alltagsfahrten
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fragebogen</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Abstand, Beschleunigung, Verzögerung und GPS-Koordinaten</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- keine Abstandsunterschiede bei Folgefahrt zwischen ACC- und manuellem Betrieb, jedoch Harmonisierung des Abstandverhaltens</li><li>- Probanden waren mit ACC-System zufrieden (ACC wurde öfter benutzt als konventioneller Tempomat)</li><li>- keine Unterschiede im Bremsverhalten im Vergleich zu einem konventionellen Tempomaten</li></ul>

---



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Ma und Kaber (2005)
<b>Studienziele</b>	Analyse des Situationsbewusstseins und der Belastung des Fahrers bei der Fahrt mit ACC und gleichzeitiger Benutzung eines Mobiltelefons
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	18 (9/9)
<b>Altersverteilung</b>	Durchschnittsalter 26,6 Jahre
<b>Studiendauer</b>	dreieinhalb bis vier Stunden pro Proband
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ausführung verschiedener Fahraufgaben (Folgefahrt, dynamische Geschwindigkeitsverläufe, Spurwechselmanöver)</li><li>- Fahrer führen während der Fahrt mehrere, kurze Telefongespräche mit Mobiltelefon</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interview</li><li>- Fragebogen (Skalenbewertung durch Fahrer)</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition und Abstand zum Vorderfahrzeug</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Situationsbewusstsein verbessert sich</li><li>- mentale Belastung des Fahrers fällt mit ACC</li><li>- bei zusätzlichen Nebentätigkeiten des Fahrers steigt die geistige Belastung wieder an</li><li>- ACC führt zu einer Homogenisierung von Abstand und Geschwindigkeit</li><li>- mit ACC keine erhöhte Verweildauer auf bestimmter gerader Fahrspur, jedoch auf kurviger Strecke verweilen Fahrer vermehrt auf einer Fahrspur</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Eick und Debus (2005)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung von Adaptionseffekten mit ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (dynamisch)
<b>ACC-System</b>	ACC mit Heading Control (HC)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	11 (6/5)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	45 km (12 km manuelle Fahrt, 33 km Fahrt mit ACC)
<b>Ablauf/Szenarien</b>	1. manueller Betrieb (Folgefahrt/freie Wahl von Abstand und Geschwindigkeit) 2. ACC-Betrieb (Folgefahrt/freie und vorgegebene Wahl von Abstand und Geschwindigkeit)
<b>Messmethoden</b>	- Fragebogen - Erfassung von Geschwindigkeit, Gaspedalstellung und Abständen zu anderen Fahrzeugen
<b>Studienergebnisse</b>	- Abstand zum Vorderfahrzeug nimmt ab - Adaptionseffekte durch ACC

---

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Lee und Nam (2007)
<b>Studienziele</b>	Komfort- und Übernahmeuntersuchungen von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (dynamisch)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	- Versuch 1: 40 Probanden (k. A./k. A.) - Versuch 2: 20 Probanden (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	- Versuch 1: Nach Trainingsfahrt, Folgefahrt ohne ACC bzw. Folgefahrt mit ACC - Versuch 2: Folgefahrten mit zusätzlicher Fehlersimulation (ACC-Störung) bei einer plötzlichen Bremsung des Vorderfahrzeugs
<b>Messmethoden</b>	- Fragebögen - Erfassung von Kopf- und Augenbewegungen - Erfassung von Durchschnittsgeschwindigkeit, Abstand und Position des ACC-Fahrzeugs
<b>Studienergebnisse</b>	<p><b>Versuch 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mittlere Zeitlücke sinkt mit ACC</li> <li>- Abstände werden mit ACC harmonisiert (unabhängig vom Fahrertyp)</li> <li>- seitliche Position der ACC-Fahrzeuge variiert stärker als bei Fahrzeugen ohne ACC, da Aufmerksamkeit der Fahrer abnimmt</li> <li>- mehr Kopf- und Augenbewegungen der Fahrer mit ACC</li> <li>- erhöhte Ablenkung des Fahrers mit ACC</li> </ul> <p><b>Versuch 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhte Ablenkung und Konzentrationsverlust durch ACC führt zu längerer Reaktionszeit der Fahrer</li> <li>- bei einer plötzlichen Bremsung des Vorderfahrzeugs: erhöhter Lenkaufwand und ausbleibende Bremsreaktion des Fahrers mit ACC</li> </ul>



- bei ACC-Störung sind Werte für Reaktionszeit und  
Fahrerinterventionen (Brems- und Lenkaufwand) maximal

---



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Popiv u. a. (2008)
<b>Studienziele</b>	Analyse des Fahrerverhaltens mit und ohne ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	6 (4/2)
<b>Altersverteilung</b>	18 bis 52 Jahre
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fahrt auf Autobahn mit entsprechenden Verkehrssituationen bei relativ dichtem Verkehrsaufkommen</li><li>- Durchführung von drei typischen Autobahnmanövern: Spurwechsel, Auffahren auf ein langsames Fahrzeug, fremde Fahrzeuge überholen lassen</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition und Abstand zu anderen Fahrzeugen</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- kürzerer Abstand mit ACC</li><li>- mittlere Zeitlücke ist unabhängig von der Geschwindigkeit</li><li>- mittlere Zeitlücke liegt oftmals unter einem für ein bestimmtes Fahrmanöver zulässigen Wert</li></ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Sacher und Bubb (2006a,b)
<b>Studienziele</b>	Feldversuche zur Erfassung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC (30 bis 200 km/h)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	34 (31/3); Fahrer, die mindestens seit drei Wochen das selbe Modell wie das Messfahrzeug fahren, da keine Gewöhnungseffekte untersucht werden sollten
<b>Altersverteilung</b>	bis 45 Jahre: 8 45 bis 55 Jahre: 13 ab 55 Jahre: 13
<b>Studiendauer</b>	sechs Tage
<b>Ablauf/Szenarien</b>	Alltagsfahrten (keine speziell gestellten Szenarien)
<b>Messmethoden</b>	- Fragebogen - Interview - Erfassung von Durchschnittsgeschwindigkeit, Abstand und Verzögerung
<b>Studienergebnisse</b>	- Die Probanden nutzen die Möglichkeit, das gesamte ACC-System auszuschalten sehr selten - kurzfristige Deaktivierung am Hebel oder durch Betätigen der Bremse reicht den Probanden meist aus - sowohl geübte als auch ungeübte ACC Fahrer nutzen vor allem die kleinste Zeitlücke (1 s), dicht gefolgt von der gesetzlich empfohlenen Zeitlücke (1,8 s) - ACC Novizen nutzen das System vor allem auf Autobahnen - ACC Experten nutzen das System zusätzlich auch in der Stadt und auf Landstraßen; oder sie sind mit der derzeitigen Funktionsweise nicht zufrieden und nutzen daher das System insgesamt nur noch selten - ACC Novizen müssen sich erst an die Funktionsweise des Systems gewöhnen (Bestätigung dieser Erkenntnis durch ACC Experten)



## B ACC-Studien

- ACC Erstnutzer fassen erst langsam Vertrauen in das System und seine Grenzen
  - begeisterte ACC Nutzer codieren die Fahraufgabe teilweise um und passen ihre Fahrweise an das ACC an
  - Komfortzuwachs wird v. a. von ruhigeren und langsameren Fahrern empfunden, sportliche Fahrer sehen keine optimale Unterstützung durch ACC
  - Hauptkritikpunkte der Probanden: eingeschränkter Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 200 km/h und Fahrzeuge in Kurven, die sich in der Nebenspur aufhalten und somit kein echtes Hindernis darstellen, werden oft als Hindernis detektiert
-

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Sayer u. a. (1997)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung von Abständen durch ACC abhängig vom Fahrercharakter
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC ohne aktiven Bremseneingriff, max. Verzögerung $-0,7 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	42 (k. A./k. A.), Erfahrung mit konventionellem Tempomaten
<b>Altersverteilung</b>	20 bis 30 Jahre: k. A. 40 bis 50 Jahre: k. A. 60 bis 70 Jahre: k. A.
<b>Studiendauer</b>	zwei Wochen je Proband
<b>Ablauf/Szenarien</b>	- Alltagsnutzung - Fahrversuche unter verschiedenen Straßen- und Verkehrsbedingungen
<b>Messmethoden</b>	- Fahrerbefragung - Fragebogen (Skalenbewertung durch Fahrer) - Erfassung von mittlerer Zeitlücke
<b>Studienergebnisse</b>	- mittlere Zeitlücke erhöht sich (Sicherheitsgewinn) - Fahrer fühlen sich im ACC-Betrieb sicher bzw. ACC kann die Sicherheit erhöhen



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Ohno (2001)
<b>Studienziele</b>	Analyse und Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens im Umgang mit ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC (40 bis 110 km/h)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	5 (5/0)
<b>Altersverteilung</b>	25 bis 35 Jahre
<b>Studiendauer</b>	dreieinhalb Stunden je Proband
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Folgefahrt</li><li>- Spurwechsel- und Überholmanöver (jeweils manuell und mit ACC)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug u. a.
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Abstand zum Vorderfahrzeug nimmt mit ACC zu</li><li>- dadurch können Unfälle reduziert werden</li><li>- seitliche Abweichungen von der Fahrbahnmitte nehmen mit ACC zu</li></ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Seppelt u. a. (2005)
<b>Studienziele</b>	Auswirkungen von Systemfehlern auf das Vertrauen der Fahrer in das System
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC (32 bis 137 km/h), max. Verzögerung $-2,75 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	16 (8/8)
<b>Altersverteilung</b>	25 bis 40 Jahre, Durchschnittsalter 30,1 Jahre
<b>Studiendauer</b>	zwei Stunden je Proband
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- nach Trainingsphase erfolgen Folgefahrten und Bremsmanöver (jeweils manuell und mit ACC)</li><li>- bei beiden Fahrten wurden für ein paar Minuten ein erhöhter Verkehr und Regen bzw. Nebel eingespielt</li><li>- durch den Regen und Nebel kommt es zu kurzfristigen Ausfällen des ACC-Systems</li><li>- während der Fahrten mussten Tester Nebentätigkeiten erfüllen</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug, Reaktionszeit, TTC und korrekte Erfüllung von Nebentätigkeiten
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Reaktionszeit der Fahrer erhöht sich mit ACC</li><li>- mittlere Zeitlücke und TTC steigen mit ACC</li><li>- Zahl der Kollisionen nimmt mit ACC ab (Sicherheitsgewinn)</li><li>- bei Regen/ACC-Ausfall ergeben sich bei der Bremsreaktion des Fahrers keine Unterschiede zwischen ACC und manuellem Betrieb</li><li>- bei Regen nimmt das Vertrauen in das ACC-System rapide ab</li><li>- bei erhöhtem Verkehrsaufkommen wird dem System eher vertraut</li><li>- ACC fördert eine höhere mittlere Zeitlücke während der Erfüllung von Nebenaufgaben</li></ul>

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Lee u. a. (2008)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Fahrers im Umgang mit ACC in Übernahmesituationen
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC, max. Verzögerung $-2,5 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	60 (30/30)
<b>Altersverteilung</b>	30 bis 50 Jahre, Durchschnittsalter 41,7 Jahre
<b>Studiendauer</b>	105 Minuten je Proband
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erste Gruppe bestehend aus zwölf Probanden fährt mit Fahrzeug, das nur mit Forward Collision Warning System (FCW), das den Fahrer bei Gefahr visuell und akustisch warnt, ausgestattet ist</li> <li>- vier Gruppen zu je zwölf Probanden fahren mit Fahrzeug, das mit ACC und FCW ausgestattet ist</li> <li>- nach Trainingsfahrt, Folgefahrt mit ACC unterbrochen von Bremsmanövern (auf Landstraße)</li> <li>- während der Fahrten mussten Fahrer Nebentätigkeiten erfüllen</li> <li>- zusätzlich wurden vereinzelt Störungen der Assistenzsysteme simuliert (z. B. gestörte Bremsung durch das ACC-System)</li> </ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragebögen (u. a. NASA-TLX-Skala)</li> <li>- Erfassung von Kopf-, Fuß- und Augenbewegungen</li> <li>- Erfassung von Durchschnittsgeschwindigkeit, Abstand, Position des ACC-Fahrzeugs und Beschleunigungen bzw. Verzögerungen</li> </ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- minimale Werte für TTC nehmen mit ACC zu bzw. werden harmonisiert (Sicherheitsabstand wird größer)</li> <li>- Reaktionszeit der Fahrer erhöht sich mit ACC</li> <li>- diese beiden Werte verbessern sich mit einer zusätzlichen Warnung des Fahrers durch den Assistenten</li> <li>- ACC beeinflusst nicht die Ausführung bzw. Konzentration auf Nebentätigkeiten</li> </ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Rudin-Brown und Parker (2004)
<b>Studienziele</b>	Fahrerverhalten und Adaptionseffekte von ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug auf abgesperrtem Testgelände
<b>ACC-System</b>	- ACC-short: kleine Zeitlücke von ca. 1,4 s - ACC-long: große Zeitlücke von ca. 2,4 s
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	18 (12/6), mit ACC unerfahren aber mit konventionellem Tempomaten erfahren
<b>Altersverteilung</b>	21 bis 34 Jahre
<b>Studiendauer</b>	eine halbe Stunde ACC-Training und dreimal eine halbe Stunde Fahrversuche (kein ACC, ACC-short, ACC-long)
<b>Ablauf/Szenarien</b>	- Probanden müssen während der drei Fahrversuche Nebentätigkeiten ausführen (Bedienung eines kleinen LCD-Bildschirms) - Fehlersimulation des ACC-Systems (Übernahmesituation durch Fahrer)
<b>Messmethoden</b>	- Interview - Fragebogen (NASA-TLX-Skala, Stanford sleepiness scale) - Erfassung von Reaktionszeit des Fahrers, Geschwindigkeit, Abständen zu anderen Fahrzeugen und Spurhalte- bzw. Spurwechselverhalten)
<b>Studienergebnisse</b>	- Fahrer wird mit ACC zunehmend abgelenkt - dadurch steigt die Reaktionszeit in einer Gefahrensituation (Notbremsung) - in Übernahmesituationen übernimmt der Fahrer oft spät die Kontrolle - erhöhtes Spurwechsellaufkommen mit ACC - Vertrauensgewinn bei längerer Nutzung von ACC (unabhängig von der Fehlermeldung)

---

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Park u. a. (2006)
<b>Studienziele</b>	Analyse des Fahrerverhaltens bei Störungen des ACC-Systems
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	20 (15/5)
<b>Altersverteilung</b>	23 bis 40 Jahre
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- drei Versuchsfahrten auf Landstraßen mit drei ACC-Einstellungen: ACC deaktiviert, ACC aktiviert, ACC aktiviert</li> <li>- Folgefahrt (Fahrer mussten einem Fahrzeug folgen, das plötzlich seine Geschwindigkeit reduziert hat)</li> <li>- Simulation von Funktionsstörungen</li> </ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erfassung von Reaktionszeit des Fahrers, Daten bzgl. Bremsung und Lenkaufwand, Augenbewegungen des Fahrers und Abstand zum Vorderfahrzeug</li> <li>- statistische Auswertung der Messdaten</li> </ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Reaktionszeit der Fahrer erhöhte sich mit ACC (verspätete Bremsreaktion der Fahrer bei Bremsung des Vorderfahrzeugs)</li> <li>- Probanden leiteten nur Lenkmanöver (keine zusätzliche Bremsung) ein, um eine mögliche Kollision zu vermeiden (Vertrauen in das Bremsvermögen des ACC-Systems)</li> <li>- Abstand zwischen Fahrzeugen nimmt mit ACC leicht zu (wird jedoch durch erhöhte Reaktionszeit kompensiert)</li> <li>- bei Störungen des ACC-Systems erhöhte sich die Reaktionszeit nochmals (negative Verhaltensadaption seitens der Fahrer)</li> <li>- Abstand bei Störungen am geringsten (30% der Fahrer kollidierten mit Vorderfahrzeug)</li> </ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Weinberger (2001)
<b>Studienziele</b>	Der Einfluss von ACC auf das Fahrerverhalten
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC (30 bis 210 km/h), max. Verzögerung $-2 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	15 (15/0)
<b>Altersverteilung</b>	30 bis 62 Jahre
<b>Studiendauer</b>	vier Wochen, durchschnittliche Fahrstrecke 1300 km/Woche
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gemischte Fahrstrecken (Autobahnfahrt, Landstraße, Stadtbetrieb)</li> <li>- Alltagsfahrt (keine speziellen Szenarien)</li> </ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mündliche und schriftliche Befragungen der Probanden vor, während und nach der Fahrt</li> <li>- Überwachung von Verkehrsraum und anderen Verkehrsteilnehmern durch eine im Fahrzeug eingebaute Videokamera (ASSIST-System)</li> <li>- mitfahrender Versuchsleiter führte ein Fahrtprotokoll (Festhalten von Fahrerbeobachtungen)</li> <li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung, Abstand zum Zielobjekt, Zeitabstand zum Zielobjekt, Relativgeschwindigkeit zum Zielobjekt und TTC</li> </ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Übernahmesituationen (Fahrer übernimmt in kritischen Situationen die Kontrolle über das Fahrzeug) werden als unkritisch angesehen</li> <li>- Lernphase der Probanden bzgl. korrekter Bedienung des ACC-Systems betrug bei einer durchschnittlichen Fahrleistung von 1300 km/Woche etwa zwei Wochen</li> <li>- deutlicher Komfortgewinn durch Nutzung von ACC</li> <li>- hohes Aktivitätsniveau des Fahrzeugführers (d. h. keine Aufmerksamkeits- oder Vigilanzprobleme)</li> </ul>

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Neukum u. a. (2008)
<b>Studienziele</b>	Methodik und Ergebnisse einer Untersuchung zum Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen eines ACC-Stop&Go-Systems
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest mit Messfahrzeug
<b>ACC-System</b>	ACC-Stop&Go
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	48 (24/24)
<b>Altersverteilung</b>	25 bis 34 Jahre: 16 35 bis 59 Jahre: 16 ab 60 Jahre: 16
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trainingsablauf:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Einweisung (mündlich bzw. durch schriftliche Kurzbedienungsanleitung)</li> <li>2. Eingewöhnungsfahrt (Folgefahrt hinter einem Bezugsfahrzeug auf einer Landstraße)</li> <li>3. Fahrt auf einer Autobahn ohne instruiertes Bezugsfahrzeug</li> <li>4. Versuchsdurchführung im Stadtgebiet:                   <ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrt auf mindestens zweistreifigen Fahrbahnen im Stadtverkehr und mithilfe eines instruierten Bezugsfahrzeugs</li> <li>Folgefahrt hinter einem Bezugsfahrzeug</li> <li>Beschleunigen auf ein stehendes - und somit vom System nicht erkanntes - Vorderfahrzeug nach vorausgehendem Zielobjektverlust</li> </ul> </li> </ol> </li> </ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragebogen/Störungsbewertungsskala (subjektive Bewertungen der Kritikalität der Verkehrssituation durch den Fahrer)</li> <li>- Videoüberwachung der Verkehrsszenerie</li> <li>- Aufzeichnung der Bremsengriffe des Versuchsleiters und Bedientätigkeit des Fahrers</li> <li>- Erfassung von Abstandshaltung, Kritikalität der Auffahrsituationen und Wertebereiche von Notbremsungen (Längsverzögerungen, TTC-Werte)</li> </ul>

---

**Studienergebnisse**

- In allen Prüfsituationen erkennen die Fahrer bei zu geringer Bremswirkung des ACC-Systems die Notwendigkeit eines manuellen Bremsengriffs (Bremsengriff des Beifahrers zur Verhinderung eines Auffahrunfalls war in keinem Fall notwendig)
  - TTC-Werte nehmen bei mehrfacher Konfrontation mit der Situation zu
  - bei Längsverzögerungen zeigt sich ein deutlicher Lernverlauf
  - Betrachtet man die bei der ersten Konfrontation mit dem stehenden Hindernis aufgetretenen Längsverzögerungen und TTC-Parameter näher, ist auffällig, dass auch Ausprägungen erreicht werden, die durchgängig als Kennzeichen einer kritischen Fahrsituation gelten
  - Im weiteren Verlauf der Untersuchung treten diese extremen Verzögerungen deutlich seltener auf
  - Fahrer bewerten entstandene Situationen mit stehenden Hindernissen kritisch, jedoch wird mit zunehmender Zahl der Situationen die Sicherheitsrelevanz der Ereignisse weniger kritisch eingestuft (deutliche Lerneffekte)
  - lediglich ein Drittel der Fahrer konnte das Systemverhalten erklären und hatte verstanden, dass nach Verlust des Bezugsfahrzeugs bei Annäherung an ein stehendes Fahrzeug manuell gebremst werden muss
-





## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Rajaonah u. a. (2006)
<b>Studienziele</b>	Vertrauen und die Benutzung von ACC in kritischen Situationen
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC, max. Verzögerung $-3 \text{ m/s}^2$
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	23 (11/12)
<b>Altersverteilung</b>	19 bis 55 Jahre
<b>Studiendauer</b>	- Fünf Minuten Training, um sich an Simulator bzw. ACC zu gewöhnen - zweimal 25 Minuten Testfahrt bei schönen Wetterbedingungen - 25 Minuten Testfahrt bei Nebel
<b>Ablauf/Szenarien</b>	14 Szenarien (u. a. LKW schert ein) während der Testfahrten
<b>Messmethoden</b>	- drei Fragebögen - Erfassung von Geschwindigkeit, Abstand u. a.
<b>Studienergebnisse</b>	- überwiegend zwei Gruppen an Fahrerreaktionen 1. Gruppe: Übernahme der Kontrolle über das ACC-System bevor ACC-Regelung beginnt 2. Gruppe: Übernahme der Kontrolle über das ACC-System nachdem ACC-Regelung begonnen hat 2. Gruppe vertraut mehr dem ACC-System an sich 1. Gruppe vertraut mehr auf ein fehlerfreies Zusammenspiel von ACC und Fahrer (Vertrauen in eigene fahrerische Fähigkeiten)

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Takada und Shimoyama (2001)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der Fahrerbelastung bei Fahrerassistenzsystemen
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (dynamisch)
<b>ACC-System</b>	- ACC, max. Verzögerung $-2 \text{ m/s}^2$ - Collision-Warning System (CWS)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	6 (6/0)
<b>Altersverteilung</b>	k. A., Durchschnittsalter 39 Jahre
<b>Studiendauer</b>	ca. 20 Minuten pro Fahrt (Versuchsdurchführung über drei Tage)
<b>Ablauf/Szenarien</b>	- Hauptaufgabe: Folgefahrt - Vorderfahrzeug/Führungsfahrzeug verzögert bzw. beschleunigt - fremdes Fahrzeug schert auf gleiche Fahrspur ein und bremst bzw. beschleunigt und schert wieder aus - während Versuchsfahrt mussten Probanden Nebentätigkeiten erfüllen (Rechenaufgaben mit Eingabe des Ergebnisses in ein Keypad)
<b>Messmethoden</b>	- Auswertung von Nebentätigkeiten (Zahl der richtigen Berechnungen bzw. Dauer für Berechnungen) - Physiologische Größen (Elektrokardiogramm, Atmungsrate/-frequenz) - Fragebogen (NASA-TLX-Skala)
<b>Studienergebnisse</b>	- ACC reduziert die mentale Belastung des Fahrers und verbessert seine Leistungsfähigkeit - CWS reduziert tendenziell die mentale Fahrerbelastung

---

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Teilstudie aus Buld und Krüger (2002)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der Auswirkungen von ACC-Systemausfällen auf den Fahrer
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (dynamisch)
<b>ACC-System</b>	ACC mit Heading Control (HC)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	6 (k. A./k. A.)
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	viereinhalb Stunden
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. kurze Testfahrt, die als Baselinemessung diente</li><li>2. vier Fahrten auf Landstraße (drei mit ACC, eine manuell): Auffahren mit ACC-Fahrzeug auf Vorderfahrzeuge mit konstanter Differenzgeschwindigkeit (20 km/h) - Versuche mit Variation der Systemausfälle (keine Verzögerung) in den Stufen 5%, 25% und 50% (bzw. 2, 10, 15 Fehler)</li></ol>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fahrerbefragung/Fragebögen</li><li>- physiologische Daten (Lidschlussverhalten)</li><li>- abhängige Variable: Fehler (Kollision), falsche Alarme (unnötiges Bremsen), das Fahrverhalten (Variablen der Fahrsimulation)</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- je weniger Eingriffe notwendig sind, desto langweiliger waren die Fahrten und desto weniger aufmerksam und müder waren die Probanden</li><li>- ein Effekt über die Zeit wird nicht gefunden, d. h. die subjektive Skalierung ist hauptsächlich von der Fehlerwahrscheinlichkeit abhängig</li><li>- tendenziell wird das ACC als entlastend empfunden und dies umso mehr, je weniger Systemausfälle auftreten</li><li>- subjektive Beanspruchung des Fahrers nimmt mit zunehmender Automation ab</li></ul>



- ein Effekt in der Querführung besteht weder für die unterschiedlichen Fehlerwahrscheinlichkeiten noch für die zeitliche Abfolge
  - Vigilanz nimmt bei hoher Automation ab
-



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Young und Stanton (1997)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der mentalen Belastung des Fahrers durch ACC
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC mit Active Steering (AS)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	30 (17/13)
<b>Altersverteilung</b>	k. A., Durchschnittsalter 25,3 Jahre
<b>Studiendauer</b>	ca. 70 Minuten
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- vier Versuchsfahrten mit folgenden Assistenzkonfigurationen: Manuell, ACC, AS, ACC+AS</li><li>- Fahrfahrt bei gleichzeitiger Ausführung von Nebentätigkeiten (relativ konstanter Abstand und Geschwindigkeit)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fragebogen (NASA-TLX-Skala / Meinungsskala nach Nilsson)</li><li>- statistische Auswertung der Nebentätigkeiten (Wilcoxon Signed-Rank Test)</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug, Bremskraft und Beschleunigung</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Geschwindigkeitsunterschiede werden reduziert</li><li>- Abstand verringert sich mit ACC bzw. ACC+AS</li><li>- mentale Belastung des Fahrers geht mit ACC nur geringfügig zurück, jedoch bei Nutzung von ACC+AS wird der Fahrer stark entlastet</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Young und Stanton (2007) (basiert auf den Untersuchungen von Young und Stanton (2002))
<b>Studienziele</b>	- Auswirkungen der Erfahrungen und Kenntnisse des Fahrers bei einer assistierenden Fahrzeugführung - Entstehung der mentalen Belastung der Fahrer
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (statisch)
<b>ACC-System</b>	ACC mit Active Steering (AS)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	114 (64/50)
<b>Altersverteilung</b>	Durchschnittsalter 28,8 Jahre
<b>Studiendauer</b>	ca. 75 Minuten je Proband
<b>Ablauf/Szenarien</b>	- vier Versuchsfahrten mit folgenden Assistenzkonfigurationen: Manuell, ACC, AS, ACC+AS - Annäherung an Vorderfahrzeug - anschließend Folgefahrt bei gleichzeitiger Ausführung von Nebentätigkeiten (relativ konstanter Abstand und Geschwindigkeit)
<b>Messmethoden</b>	- Fragebogen - statistische Auswertung der Nebentätigkeiten (Wilcoxon Signed-Rank Test) - Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug, Bremskraft und Beschleunigung
<b>Studienergebnisse</b>	- Geschwindigkeitsunterschiede werden reduziert - Abstand verringert sich mit ACC bzw. ACC+AS - mentale Belastung des Fahrers geht mit ACC nur geringfügig zurück, jedoch bei Nutzung von ACC+AS wird der Fahrer stark entlastet

---

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Buld und Krüger (2003)
<b>Studienziele</b>	Untersuchung der Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahrverhalten
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (dynamisch)
<b>ACC-System</b>	ACC mit Heading Control (HC)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	24 (12/12)
<b>Altersverteilung</b>	22 bis 57 Jahre
<b>Studiendauer</b>	je Proband zwei Tage (keine genaueren Angaben)
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ausführliches Basis-Training im Simulator</li> <li>2. Versuchsdurchführung mit unterschiedlichen Fahrsituationen (Geschwindigkeitsanpassung, Kursanpassung, Führungsaufgabe u. a. im Slalomparcours und in Gefahrensituationen, Zusatzaufgaben/Navigation, Ablenkung des Fahrers durch Einspielungen auf einem Display)</li> </ol>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrerbefragung/Fragebögen</li> <li>- physiologischen Daten (Lidschlussverhalten, Puls)</li> <li>- abhängige Variable: Fahrparameter und Verhaltensmaße</li> </ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- der Fahrer zentriert beim Übergang in das Überwachen die Aufmerksamkeit auf wenige Hinweisreize (Hinweisreize, die zum Überwachen dieses speziellen Systems notwendig sind)</li> <li>- beim Fahren mit ACC wurde ein unvorhergesehenes starkes Bremsen des Führungsfahrzeugs immer erkannt und in die richtige Handlung umgesetzt (Übernahme durch den Fahrer)</li> <li>- jedoch wurden Reize, die für die Überwachung des Systems nicht relevant waren, nicht mehr in der angemessenen Art und Weise verarbeitet und umgesetzt</li> <li>- wenn die systembedingten Hinweisreize ausbleiben (das Führungsfahrzeugs brems nicht, obwohl es die Streckenführung verlangt), reagieren die Fahrer nicht (Situationsbewusstsein verringert sich deutlich/Mitzieheffekt)</li> </ul>



- verringerte mentale Beanspruchung des Fahrers mit ACC, jedoch wird Überwachungsaufgabe von Fahrern als langweilig und ermüdend angesehen
  - keine bzw. unzureichende Übernahme der Fahrzeugkontrolle durch den Fahrer in kritischen Situationen
  - die Kombination von ACC und HC kompensiert teilweise negative Effekte der reinen ACC-Steuerung (Mitzieheffekte werden verringert)
-



## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Hoedemaeker (2000)
<b>Studienziele</b>	Fahrverhalten mit ACC und die Akzeptanz durch den Fahrer
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (k. A.)
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	k. A.
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	vier Fahrergruppen (eingeteilt nach Fahrstil) mussten eine Folge von einzelnen, bestimmten Fahraufgaben (z. B. Folgefahrt, Auffahren auf Stauende, dichter Verkehr) ausführen
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interview</li><li>- Fragebogen (Skalenbewertung durch Fahrer)</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Fahrzeugposition, Abstand zum Vorderfahrzeug und Bremskraft</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Geschwindigkeit pendelt sich ein</li><li>- auf Landstraßen mit ACC riskanterer Fahrstil, auf Autobahnen jedoch nicht</li><li>- geringere physische Belastung des Fahrers mit ACC</li><li>- sportliche Fahrer schätzen eher den Komfortgewinn, vorsichtige Fahrer die Nützlichkeit von ACC</li></ul>

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Buld u. a. (2003)
<b>Studienziele</b>	Nutzen der Fahrsimulation zur Parametrisierung von Fahrerassistenzsystemen bei der Entwicklung
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Driver in the Loop (dynamisch)
<b>ACC-System</b>	ACC mit Heading Control (HC)
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	18 (9/9)
<b>Altersverteilung</b>	22 bis 57 Jahre
<b>Studiendauer</b>	sechs Fahrten von je 15 Minuten (je dreimal auf Landstraße und Autobahn)
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fahrer können aus drei möglichen Verzögerungsverläufen und verschiedenen Sekundenabständen auswählen</li><li>- Versuchsdurchführung:<ol style="list-style-type: none"><li>1. theoretische Einführung über die Funktionsweise und die Bedienung des Systems</li><li>2. Auffahren mit ACC-Fahrzeug auf Vorderfahrzeuge mit verschiedenen Differenzgeschwindigkeiten</li></ol></li></ul>
<b>Messmethoden</b>	k. A.
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fahrer wählen eine späte und starke Bremsung in Verbindung mit einem niedrigeren Sekundenabstand</li><li>- alle Probanden, die einen sehr großen Sekundenabstand bevorzugen (2,3 s bis 3,0 s), wählen auch den sanften Bremsverlauf</li><li>- verschiedene Bremsverläufe können von Probanden eindeutig unterschieden werden</li><li>- Tester stellen auf Autobahnen den Bremsverlauf eher stärker und den Sekundenabstand eher kürzer ein (auf Landstraßen entgegengesetzte Einstellungen)</li><li>- Alter und Geschlecht spielen in den Untersuchungen keine nennenswerte Rolle</li><li>- bei den Differenzgeschwindigkeiten 20 km/h und 30 km/h war der im ACC eingestellte Abstand bei 70% der Stichprobe kürzer als beim manuellen Fahren</li></ul>



## *B ACC-Studien*

- bei einer Differenzgeschwindigkeit von 50 km/h war bei der Mehrzahl der Fahrer der im ACC eingestellte Abstand größer als der manuelle (bei einer sehr großen Differenzgeschwindigkeit wird Gelegenheit zum Überholen abgewartet und dadurch dichter aufgefahen)

---

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Didier (2006)
<b>Studienziele</b>	Entwicklung eines Verfahrens zur Messung des Komforts von Abstandsregelsystemen (ACC-Systemen)
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest auf abgesperrtem Testgelände
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	36 (36/0)
<b>Altersverteilung</b>	36 bis 70 Jahre
<b>Studiendauer</b>	vier Messfahrten je 127 km
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fahrten mit zwei Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller mit unterschiedlichen ACC-Systemen (Komfortvergleich beider Fahrzeuge)</li><li>- verschiedene Szenarien (u. a. Einscherer und Bremsvorgänge)</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fragebögen</li><li>- Erfassung von Geschwindigkeit, Position auf der Straße und Abständen zu anderen Fahrzeugen</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Unterschiede bzgl. Fahrkomfort der beiden ACC-Systeme konnten durch eine subjektive Fahrerbeurteilung ermittelt werden</li><li>- mit objektiven Messungen war dies nicht möglich</li></ul>

---

## B ACC-Studien

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Schick u. a. (2007)
<b>Studienziele</b>	Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Funktion und Systemsicherheit von Fahrerassistenzsystemen
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Realtest auf abgesperrtem Testgelände
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	keine Probanden, Versuchsingenieure
<b>Altersverteilung</b>	k. A.
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Definition einer Versuchsmatrix anhand einer Fehlerbaumanalyse mit realistischen Testszenarien und verschiedenen Konfigurationen (Geschwindigkeiten, Abstandseinstellungen, Beschleunigungsstufen)</li><li>- Einsatz von Brems- und Lenkroboter um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Messung mittels Messsystem bestehend aus Inertial Measurement Unit und DGPS</li><li>- Erfassung von Abständen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen u.a.</li><li>- Videoaufzeichnungen</li><li>- Bewertungsbögen</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- sehr unterschiedliches Systemverhalten in den getesteten Fahrzeugen</li><li>- teilweise Aufdecken von Schwachstellen der Systeme</li></ul>

---

<b>Studienverfasser/-jahr</b>	Schick u. a. (2008)
<b>Studienziele</b>	Entwicklung einer Methode zur Bewertung der (Sicherheits-)Funktionen und Regelgüte von Fahrerassistenzsystemen
<b>Test- u. Simulationswerkzeug</b>	Rechnersimulation
<b>ACC-System</b>	ACC
<b>Zahl der Probanden (m/w)</b>	—
<b>Altersverteilung</b>	—
<b>Studiendauer</b>	k. A.
<b>Ablauf/Szenarien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Untersuchung des Fahrerassistenzsystems als Modell-, Software- oder Hardware in the Loop</li><li>- Testsznarien aus Versuchskatalog von Schick u. a. (2007)</li><li>- automatische Parametervariation</li></ul>
<b>Messmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Erfassung von Abständen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen</li></ul>
<b>Studienergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- automatische Generierung wichtiger Signalverläufe in tabellarischer und graphischer Form</li><li>- aus Momentanwerten, Minima und Maxima können Reaktionszeiten und -abstände, sowie das Über- und Unterschwingverhalten des Fahrerassistenzsystems abgeleitet werden</li></ul>


---





# C Dokumente aus den Fahrstudien



<b>Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr, München</b>	
<b>Projekt „Bewertung ACC“</b>	

Lieber Versuchsteilnehmer, liebe Versuchsteilnehmerin,

herzlichen Dank für Ihre Bereitschaft, uns bei diesem Forschungsprojekt zu unterstützen!

Mit Ihrer Teilnahme helfen Sie uns, zukünftige Autos noch komfortabler zu machen.

Bei dieser Studie geht es um einen Vergleich von verschiedenen Arten von ACC (ACC = Adaptive Cruise Control). Sie sollen unter realen Verkehrs-Bedingungen getestet werden.

Im Rahmen dieser Versuchsfahrt wollen wir nun Ihre Einschätzung zu diesen verschiedenen ACC-Arten erheben.

Zusätzlich werden die technischen Daten des Fahrzeugs, ein Videobild der Verkehrssituation, ein Videobild des Fußraums und ein Portraitvideo aufgezeichnet.

Der Versuch gliedert sich in folgende Abschnitte:

1. Fragebogen ausfüllen
2. Einweisung in das Versuchsfahrzeug
3. Fahrt auf unserem Testgelände
  - a. Gewöhnung an das Fahrzeug
  - b. Bedienung des ACC
4. Fahrt auf der Autobahn



5. Test der verschiedenen ACC-Versionen auf dem Testgelände
6. Abschlussbesprechung nach der Fahrt

Der Versuch wird ca. 2 Stunden dauern.

Bitte beachten Sie, dass Sie während dieser Zeit stets der verantwortliche Fahrzeugführer sind.

Wir testen bei diesem Versuch nicht Ihr fahrerisches Können.

Aber uns interessiert Ihre persönliche, individuell geprägte Handhabung eines Fahrzeuges, weshalb wir Sie bitten, sich wie mit Ihrem privaten Auto zu verhalten und auch so zu fahren.

Die gesammelten Daten werden zur weiteren Auswertung auf Datenträgern gespeichert. Ihre persönlichen Daten werden nicht mit den technischen Daten verknüpft und werden vor einer statistischen Auswertung gelöscht. Eine Weitergabe an Dritte findet nicht statt.

Sie können jederzeit den Versuch abbrechen, wenn Sie denken, dass die Aufgaben Sie zu sehr beanspruchen. Durch einen Abbruch entstehen Ihnen und uns keinerlei Nachteile.

Wir wünschen Ihnen ein gutes Gelingen!

<b>Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr, München</b>	
<b>Projekt ACC - neue Algorithmen</b>	

**Fragebogen:**

**Fahrt Nr.**

**Ein bisschen Statistik:**

1.  männlich  weiblich
2. **Führerschein (Pkw)** seit ..... Jahren
3. **Ich fahre regelmäßig** seit ..... Jahren
4. **Jahreskilometer**-Leistung im Durchschnitt  
ca. ....km
5. **Bisherige Kilometer-Gesamt-Leistung** ca. .... km
6. **Ich fahre zurzeit überwiegend mit einem Pkw der Marke:**  
.....
7. **Mein Alter:** ..... Jahre
8. **Mein Beruf:** .....
9. **Wie oft fahren Sie mit dem Auto?**  
 sehr oft (fast täglich)     oft (3x / Woche)     gelegentlich (6x / Monat)     selten     nie
10. **Wie oft fahren Sie mit dem Auto auf der Autobahn?**  
 sehr oft (fast täglich)     oft (3x / Woche)     gelegentlich (6x / Monat)     selten     nie



11. **Sind Sie schon mit Tempomat gefahren?**

- oft       gelegentlich       selten       nie

12. **Wie oft fahren Sie mit Automatik-Fahrzeugen?**

- oft       gelegentlich       selten       nie

13. **Sind Sie schon mit ACC (Adaptive Cruise Control) gefahren?**

- oft       gelegentlich       selten       nie

14. **Wie bezeichnen Sie Ihre Fahrweise?**

- sehr sportlich       sportlich       ausgewogen       Komfort betont

15. **Ich befinde mich gesundheitlich  
in einem fahrtüchtigen Zustand:**

- ja       nein

16. **Ich bin damit einverstanden**, dass meine Fahrdaten und Videobilder wissenschaftlich ausgewertet und in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung verwendet werden dürfen, selbstverständlich ohne Nennung meines Namens:

- ja       nein

**Vielen Dank für das Ausfüllen unseres Fragebogens.**

**Sie lernen nun das Versuchsfahrzeug kennen.**

**Ihr Versuchsteam von LRT 11**



C Dokumente aus den Fahrstudien

**Varianten {A1} und {A2}**

Vp				erst	dann	Vp				erst	dann		
1	m	jünger	A	A	1	2	2	m	jünger	A	A	1	3
7	w	jünger	A	A	1	3	3	m	jünger	A	A	2	3
8	w	jünger	A	A	2	3	9	w	jünger	A	A	1	2
13	m	mittel	A	B	3	1	14	m	mittel	A	B	3	2
15	m	mittel	A	B	3	2	19	w	mittel	A	B	2	1
20	w	mittel	A	B	2	1	21	w	mittel	A	B	3	1
25	m	älter	A	C	2	3	26	m	älter	A	C	1	2
27	m	älter	A	C	1	2	31	w	älter	A	C	3	2
32	w	älter	A	C	1	3	33	w	älter	A	C	1	3
				D	2	1					D	3	1
				D	3	1					D	2	3
				D	3	2					D	2	1

**Varianten {D1} und {D2}**

Vp				erst	dann	Vp				erst	dann		
4	m	jünger	D	D	1	2	5	m	jünger	D	D	1	3
10	w	jünger	D	D	1	3	6	m	jünger	D	D	2	3
11	w	jünger	D	D	2	3	12	w	jünger	D	D	1	2
16	m	mittel	D	C	3	1	17	m	mittel	D	C	3	2
18	m	mittel	D	C	3	2	22	w	mittel	D	C	2	1
23	w	mittel	D	C	2	1	24	w	mittel	D	C	3	1
28	m	älter	D	B	2	3	29	m	älter	D	B	1	2
30	m	älter	D	B	1	2	34	w	älter	D	B	3	2
35	w	älter	D	B	1	3	36	w	älter	D	B	1	3
				A	2	1					A	3	1
				A	3	1					A	2	3
				A	3	2					A	2	1



### Fragen während der Fahrt:

Vp:  
Vergleich: A



### Überhol-Situation:

Wir sind nun eine Weile mit ACC hinter einem Fahrzeug hergefahren. Dann haben Sie das Fahrzeug überholt. Dadurch hat das ACC den Vorfahrenden verloren und hat beschleunigt, um auf Ihre eingestellte Wunsch-Geschwindigkeit zu kommen.

Bitte vergleichen Sie nun die letzten beiden Fahrten:

#### 1. Sicherheitsbedürfnis

Entsprach das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt besser Ihrem Sicherheitsbedürfnis?

Meinem Sicherheitsbedürfnis entsprach mehr das ACC auf der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

#### 2. ACC komfortabel?

Fanden Sie das Verhalten des ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt komfortabler?

Ich fand das ACC komfortabler bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt



**3. Fahrstil**

Entspricht das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt mehr Ihrem eigenen Fahrstil?

Meinem Fahrstil entspricht eher das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**4. Dynamik**

Fanden Sie die Dynamik des ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt besser?

Ich fand die Dynamik des ACC besser bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**5. Sportlichkeit**

Fanden Sie das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt sportlicher?

Sportlicher war das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**6. Insgesamt besser - Ihre Meinung**

Welche ACC-Version hat Ihnen insgesamt besser gefallen, die von der 1. oder der 2. Fahrt?

Mit hat die ACC-Version besser gefallen bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt



**Fragen während der Fahrt:**

Vp:

Vergleich: B

**Einscherer:**

Wir sind nun eine Weile mit ACC hinter einem Fahrzeug hergefahren. Dann kam von der rechten Spur ein Einscherer. Das ACC musste auf den Einscherer reagieren und langsamer fahren.

Bitte vergleichen Sie nun die letzten beiden Fahrten:

**1. Sicherheitsbedürfnis**

Entsprach das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt besser Ihrem Sicherheitsbedürfnis?

Meinem Sicherheitsbedürfnis entsprach mehr das ACC auf der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**2. ACC komfortabel?**

Fanden Sie das Verhalten des ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt komfortabler?

Ich fand das ACC komfortabler bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt





**3. Fahrstil**

Entspricht das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt mehr Ihrem eigenen Fahrstil?

Meinem Fahrstil entspricht eher das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**4. Dynamik**

Fanden Sie die Dynamik des ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt besser?

Ich fand die Dynamik des ACC besser bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**5. Sportlichkeit**

Fanden Sie das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt sportlicher?

Sportlicher war das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**6. Insgesamt besser - Ihre Meinung**

Welche ACC-Version hat Ihnen insgesamt besser gefallen, die von der 1. oder der 2. Fahrt?

Mit hat die ACC-Version besser gefallen bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt



### Fragen während der Fahrt:

Vp:

Vergleich: C

### Auffahren auf eine Kolonne:

Wir sind nun eine Weile mit ACC gefahren.

Dann sind wir auf ein vor uns fahrendes Fahrzeug getroffen,  
das deutlich langsamer war, als wir.

Das ACC musste auf das Fahrzeug vor uns reagieren und  
langsamer fahren.

Bitte vergleichen Sie nun die letzten beiden Fahrten:

#### 1. Sicherheitsbedürfnis

Entsprach das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt  
besser Ihrem Sicherheitsbedürfnis?

Meinem Sicherheitsbedürfnis entsprach mehr das ACC auf der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

#### 2. ACC komfortabel?

Fanden Sie das Verhalten des ACC bei der  
1. oder der 2. Fahrt komfortabler?

Ich fand das ACC komfortabler bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt



**3. Fahrstil**

Entspricht das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt mehr Ihrem eigenen Fahrstil?

Meinem Fahrstil entspricht eher das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**4. Dynamik**

Fanden Sie die Dynamik des ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt besser?

Ich fand die Dynamik des ACC besser bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**5. Sportlichkeit**

Fanden Sie das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt sportlicher?

Sportlicher war das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**6. Insgesamt besser - Ihre Meinung**

Welche ACC-Version hat Ihnen insgesamt besser gefallen, die von der 1. oder der 2. Fahrt?

Mit hat die ACC-Version besser gefallen bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt



Institut für Arbeitswissenschaft,  
Universität der Bundeswehr, München.  
Projekt ACC

### Fragen während der Fahrt:

Vp:

Vergleich: D

### Ausscherer:

Wir sind nun eine Weile mit ACC hinter einem Fahrzeug hergefahren. Dann hat das vorausfahrende Fahrzeug die Spur gewechselt.

Dadurch hat das ACC den Vorausfahrenden verloren und hat beschleunigt, um auf Ihre eingestellte Wunsch-Geschwindigkeit zu kommen.

Bitte vergleichen Sie nun die letzten beiden Fahrten:

#### 1. Sicherheitsbedürfnis

Entsprach das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt besser Ihrem Sicherheitsbedürfnis?

Meinem Sicherheitsbedürfnis entsprach mehr das ACC auf der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

#### 2. ACC komfortabel?

Fanden Sie das Verhalten des ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt komfortabler?

Ich fand das ACC komfortabler bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt



**3. Fahrstil**

Entspricht das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt mehr Ihrem eigenen Fahrstil?

Meinem Fahrstil entspricht eher das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**4. Dynamik**

Fanden Sie die Dynamik des ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt besser?

Ich fand die Dynamik des ACC besser bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**5. Sportlichkeit**

Fanden Sie das ACC bei der 1. oder der 2. Fahrt sportlicher?

Sportlicher war das ACC bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt

**6. Insgesamt besser - Ihre Meinung**

Welche ACC-Version hat Ihnen insgesamt besser gefallen, die von der 1. oder der 2. Fahrt?

Mit hat die ACC-Version besser gefallen bei der

- 1. Fahrt
- 2. Fahrt



## Messprotokoll:

Version A

Proband  
Nr.

Versuchsleiter: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_ Beginn: \_\_\_\_\_

- Haben Sie bis hierher Fragen?
- Brille? Haben Sie diese dabei?
- Führerschein dabei?

**Fahrbahn ist**             trocken             feucht             nass

**Wetter:**             sonnig             bewölkt             diesig             Regen

		erst Version	dann Version	Vergleich
A	Überholen	1	3	
A		2	3	
A		1	2	
B	Einscherer	3	2	
B		2	1	
B		3	1	
C	Auffahren auf Kolonne	1	2	
C		3	2	
C		1	3	
D	Ausscherer	3	1	
D		2	3	
D		2	1	

### Abschließende Frage:

Soll man die Eigenschaften des ACC individuell anpassen können?

- ja     nein     weiß nicht

### Einschätzung des Versuchsleiters nach der Fahrt:

**Fahrstil:**             ruppig             sportlich             ausgewogen             komfortabel

**Versuchsleiter fühlt sich:**             sicher             mittel             unsicher



## C Dokumente aus den Fahrstudien

### Messprotokoll:

Version D

Proband  
Nr. \_\_\_\_\_

Versuchsleiter: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_ Beginn: \_\_\_\_\_

- Haben Sie bis hierher Fragen?
- Brille? Haben Sie diese dabei?
- Führerschein dabei?

**Fahrbahn ist**             trocken             feucht             nass

**Wetter:**             sonnig             bewölkt             diesig             Regen

		erst Version	dann Version	Vergleich
D	Ausscherer	1	3	
D		2	3	
D		1	2	
C	Auffahren auf Kolonne	3	2	
C		2	1	
C		3	1	
B	Einscherer	1	2	
B		3	2	
B		1	3	
A	Überholen	3	1	
A		2	3	
A		2	1	

#### Abschließende Frage:

Soll man die Eigenschaften des ACC individuell anpassen können?

- ja     nein     weiß nicht

#### Einschätzung des Versuchsleiters nach der Fahrt:

**Fahrstil:**             ruppig             sportlich             ausgewogen             komfortabel

**Versuchsleiter fühlt sich:**             sicher             mittel             unsicher



# **D Statistische Auswertung der Fragebögen**



D Statistische Auswertung der Fragebögen

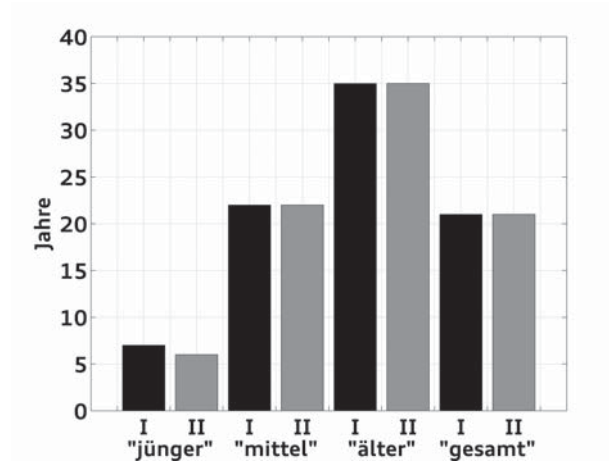


Abbildung D.1: Wie lange haben Sie schon Ihren Führerschein?

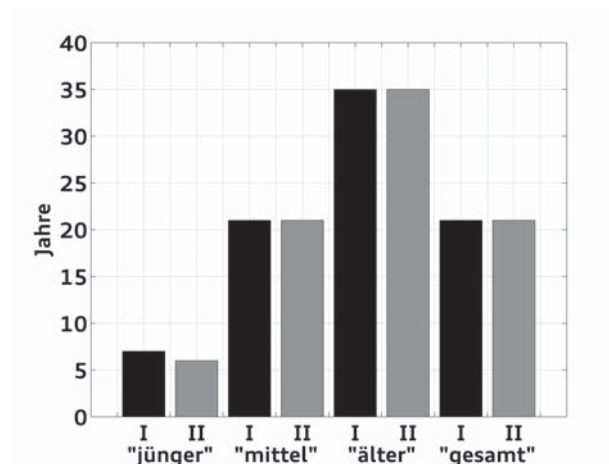


Abbildung D.2: Seit wie vielen Jahren fahren Sie regelmäßig?

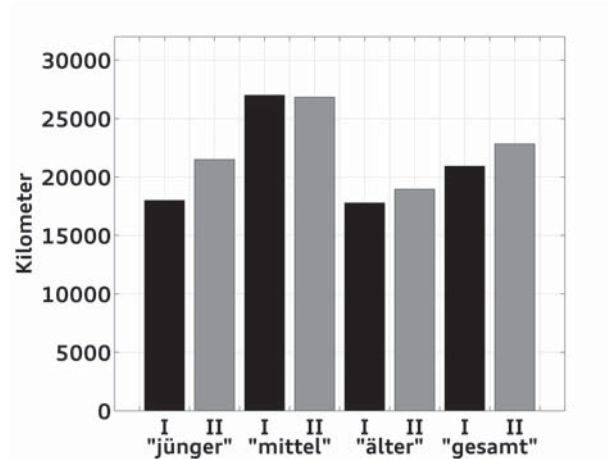


Abbildung D.3: Wie viele Kilometer fahren Sie pro Jahr?

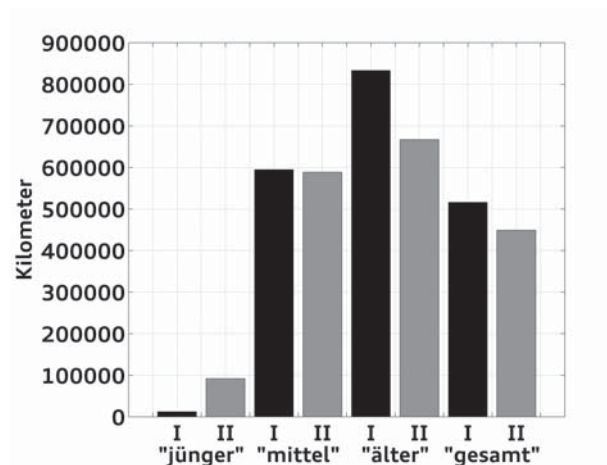


Abbildung D.4: Wie viele Kilometer sind Sie insgesamt schon gefahren?

D Statistische Auswertung der Fragebögen

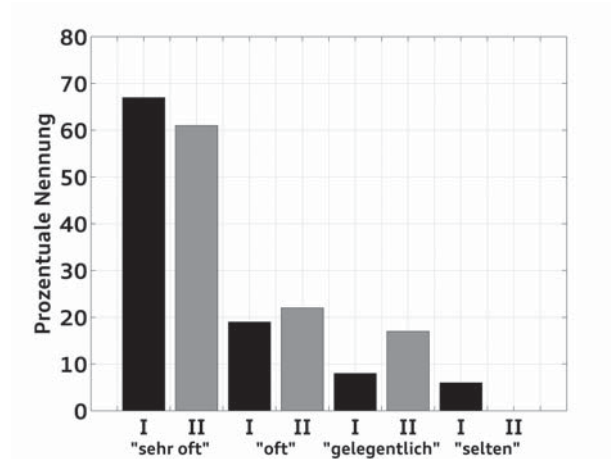


Abbildung D.5: Wie oft fahren Sie mit dem Auto?

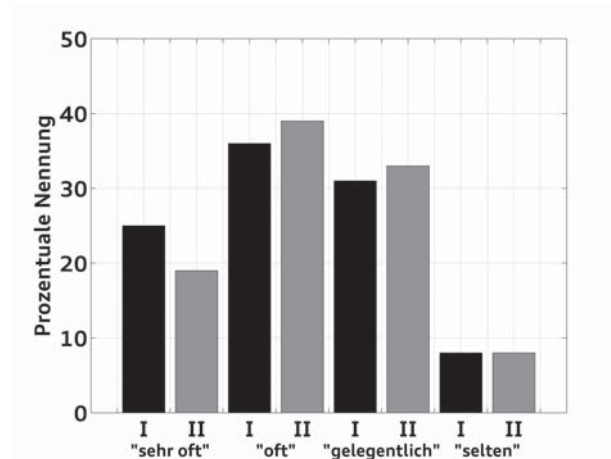


Abbildung D.6: Wie oft fahren Sie mit dem Auto auf der Autobahn?

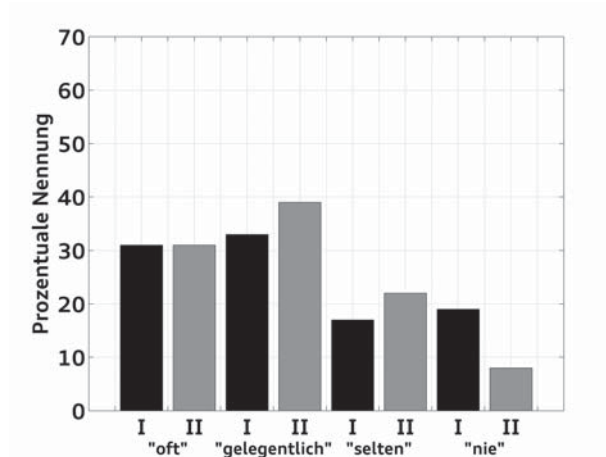


Abbildung D.7: Sind Sie schon mit Tempomat gefahren?

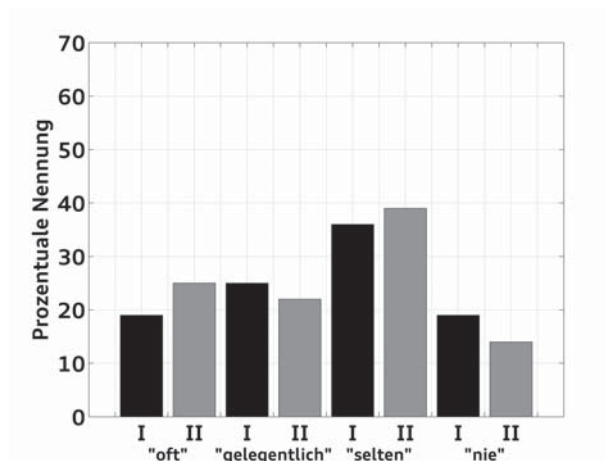


Abbildung D.8: Wie oft fahren Sie mit Automatik-Fahrzeugen?

D Statistische Auswertung der Fragebögen

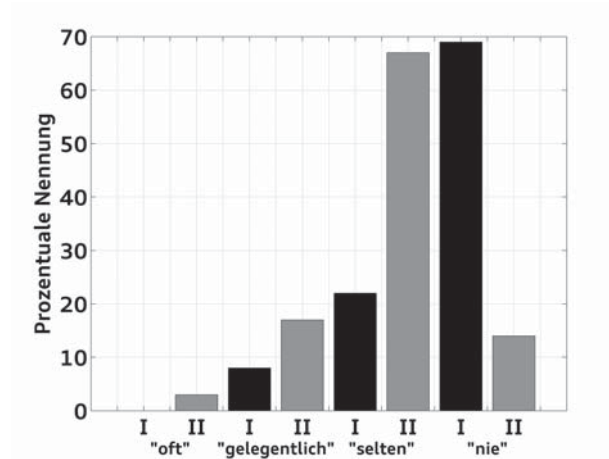


Abbildung D.9: Sind Sie schon mit ACC gefahren?

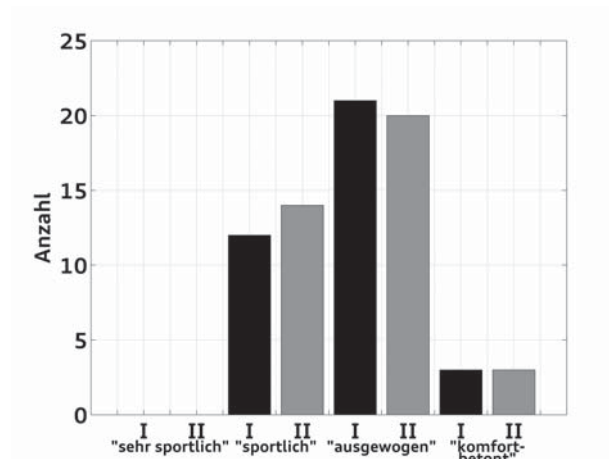


Abbildung D.10: Wie bezeichnen Sie Ihre Fahrweise?

## E Statistische Auswertung der objektiven Messgrößen

Tabelle E.1: Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Auffahren auf Kolonne

	F		dF		Signifikanzkoeffizient	
	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Reaktionsabstand	155,32	257,55	2	2	0,000	0,000
Minimalabstand	92,44	153,32	2	2	0,000	0,000
Detektionsabstand	254,16	314,77	2	2	0,000	0,000
Max. Verzögerung	2310,61	844,12	2	2	0,000	0,000
Min. Verzögerung	48,98	132,44	2	2	0,000	0,000

Tabelle E.2: Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Überholen

	F		dF		Signifikanzkoeffizient	
	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Max. Beschleunigung	1655,31	1055,64	2	2	0,000	0,000
Überholzeit	404,29	31,40	2	2	0,000	0,000
Reaktionszeit	112,95	40,83	2	2	0,000	0,000

Tabelle E.3: Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Reaktion auf Einscherer

	F	dF	Signifikanzkoeffizient
	Studie I	Studie I	Studie I
Reaktionsabstand	676,67	2	0,000
Minimalabstand	1726,55	2	0,000
Reaktionszeit	474,01	2	0,000
Max. Verzögerung	233,51	2	0,000



*E Statistische Auswertung der objektiven Messgrößen*

Tabelle E.4: Prüfgröße, Freiheitsgrade und Signifikanz des Manövers Reaktion auf Ausscherer

	F		dF		Signifikanzkoeffizient	
	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Max. Beschleunigung	1261,13	608,31	2	2	0,000	0,000
Überholzeit	1369,89	15,02	2	2	0,000	0,000
Reaktionszeit	474,23	32,58	2	2	0,000	0,000

Abhängige Variable	Applikation (I)	Applikation (J)	Mittlere Differenz (I-J)		Standardfehler		Signifikanzkoeffizient	
			Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Reaktionsabstand	moderat	vorausschauend	-32,45	-18,81	4,21	2,99	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	41,30	44,00	4,16	2,97	0,000	0,000
	vorausschauend	dynamisch	73,74	62,81	4,20	2,84	0,000	0,000
Minimalabstand	moderat	vorausschauend	-5,26	-10,69	0,39	0,62	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	-3,25	-7,73	0,39	0,62	0,000	0,000
	vorausschauend	dynamisch	2,02	2,96	0,39	0,59	0,000	0,000
Detektionsabstand	moderat	vorausschauend	-35,40	-31,69	3,44	3,31	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	41,72	46,60	3,40	3,29	0,000	0,000
	vorausschauend	dynamisch	77,12	78,29	3,43	3,14	0,000	0,000
Max. Verzögerung	moderat	vorausschauend	-0,01	0,29	0,03	0,05	1,000	0,000
	moderat	dynamisch	1,85	1,69	0,03	0,05	0,000	0,000
	vorausschauend	dynamisch	1,86	1,40	0,03	0,04	0,000	0,000
Min. Geschwindigkeit	moderat	vorausschauend	-4,55	-0,10	0,47	0,30	0,000	1,000
	moderat	dynamisch	-1,37	3,99	0,47	0,30	0,011	0,000
	vorausschauend	dynamisch	3,18	4,10	0,47	0,28	0,000	0,000

Tabelle E.5: Mehrfachvergleich des Manövers Auffahren auf Kolonne nach Bonferroni



E Statistische Auswertung der objektiven Messgrößen

Abhängige Variable	Applikation (I)	Applikation (J)	Mittlere Differenz (I-J)		Standardfehler		Signifikanzkoeffizient	
			Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Max. Beschleunigung	moderat	träge	0,11	0,11	0,01	0,02	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	-0,66	-0,68	0,01	0,02	0,000	0,000
	träge	dynamisch	-0,77	0,79	0,01	0,02	0,000	0,000
Überholzeit	moderat	träge	-1,51	-1,32	0,14	0,58	0,000	0,072
	moderat	dynamisch	2,52	3,20	0,14	0,58	0,000	0,000
	träge	dynamisch	4,03	4,52	0,14	0,58	0,000	0,000
Reaktionszeit	moderat	träge	-0,71	-0,51	0,10	0,25	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	0,91	1,71	0,11	0,26	0,000	0,000
	träge	dynamisch	1,61	2,23	0,11	0,26	0,000	0,000

Tabelle E.6: Mehrfachvergleich des Manövers Überholen nach Bonferroni

Abhängige Variable	Mittlere Differenz (I-J)		Standardfehler		Signifikanzkoeffizient	
	Applikation (I)	Applikation (J)	Studie I	Studie I	Studie I	Studie I
Reaktionsabstand	moderat	sicherheitsbetont	-14,30	0,56	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	5,99	0,57	0,000	0,000
	sicherheitsbetont	dynamisch	20,29	0,57	0,000	0,000
Minimalabstand	moderat	sicherheitsbetont	-13,82	0,37	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	8,36	0,38	0,000	0,000
	sicherheitsbetont	dynamisch	22,19	0,38	0,000	0,000
Reaktionszeit	moderat	sicherheitsbetont	2,80	0,12	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	-0,69	0,12	0,000	0,000
	sicherheitsbetont	dynamisch	-3,49	0,12	0,000	0,000
Max. Verzögerung	moderat	sicherheitsbetont	0,61	0,28	0,000	0,000
	moderat	dynamisch	0,27	0,03	0,000	0,000
	sicherheitsbetont	dynamisch	-0,34	0,03	0,000	0,000

Tabelle E.7: Mehrfachvergleich des Manövers Reaktion auf Einscherer nach Bonferroni

E Statistische Auswertung der objektiven Messgrößen

Abhängige Variable	Applikation (I)	Applikation (J)	Mittlere Differenz (I-J)		Standardfehler		Signifikanzkoeffizient	
			Studie I	Studie II	Studie I	Studie II	Studie I	Studie II
Max. Beschleunigung	träge	dynamisch	-0,66	-0,96	0,02	0,02	0,000	0,000
	träge	vorausschauend	0,01	-0,01	0,01	0,02	1,000	1,000
	dynamisch	vorausschauend	0,67	0,68	0,02	0,02	0,000	0,000
Überholzeit	träge	dynamisch	5,63	3,70	0,11	0,69	0,000	0,000
	träge	vorausschauend	3,87	2,52	0,11	0,68	0,000	0,001
	dynamisch	vorausschauend	-1,76	-1,18	0,11	0,67	0,000	0,240
Reaktionszeit	träge	dynamisch	2,95	2,74	0,11	0,41	0,000	0,000
	träge	vorausschauend	3,05	2,91	0,11	0,40	0,000	0,000
	dynamisch	vorausschauend	0,11	0,17	0,11	0,39	0,000	0,000

Tabelle E.8: Mehrfachvergleich des Manövers Reaktion auf Ausscherer nach Bonferroni

# Literaturverzeichnis

- [Acarman u. a. 2006] ACARMAN, T. ; LIU, Y. ; ÖZGÜNER, Ü.: Intelligent cruise control stop and go with and without communication. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *American Control Conference: Tagung Minneapolis, USA, 2006*, S. 4356–4361
- [ACEA 2009] ACEA: *European Automobile Manufacturers' Association: Development Tool - Response 3 - Code of Practice (CoP) for ADAS*. 2009.  
– URL [http://www.acea.be/images/uploads/files/20090909\\_ADAS\\_Code\\_of\\_Practice\\_Development\\_Tool.xls](http://www.acea.be/images/uploads/files/20090909_ADAS_Code_of_Practice_Development_Tool.xls)
- [Alkim u. a. 2007] ALKIM, P. T. ; BOOTSMA, G. ; HOOGENDOORN, P. S.: Field Operational Test “The Assisted Driver”. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium: Tagung Istanbul, Turkey*, IEEE Computer Society Press, 2007, S. 1198–1203
- [Bär 2008] BÄR, M.: *Konzeption und Umsetzung eines echtzeitfähigen Fahrzeugmodells*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für technische Mechanik, Diplomarbeit, 2008
- [Benmimoun 2006] BENMIMOUN, F.: *Das Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS zur Entwicklung und Auslegung von Fahrerassistenzsystemen: Mit PELOPS lernen, wie Staus entstehen und Unfälle geschehen*. 2006
- [Bergholz u. a. 2008] BERGHOLZ, J. ; HENZE, R. ; KÜÇÜKAY, F.: Objektivierung des Fahrerleistungsvermögens. In: TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.) ; LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN (Hrsg.): *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz: Tagung München, 2008*
- [Bock 2005] BOCK, T.: *Vehicle in the Loop - Prüfaufbau: Lastenheft*. 2005
- [Bock 2008] BOCK, T.: *Vehicle in the Loop - Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme*. München, Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme, Dissertation, 2008



## LITERATURVERZEICHNIS

- [Bock u. a. 2008] BOCK, T. ; MAURER, M. ; MEEL, F. van ; MÜLLER, T.: Vehicle in the Loop - Ein innovativer Ansatz zur Kopplung virtueller mit realer Erprobung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 110 (2008), Nr. 01, S. 2–8
- [Bose und Ioannou 2000] BOSE, A. ; IOANNOU, P.: Environmental evaluation of intelligent cruise control (ICC) vehicles. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE Intelligent Transportation Systems: Tagung Dearborn, USA*, IEEE Computer Society Press, 2000, S. 352–357
- [Bose und Ioannou 2001] BOSE, A. ; IOANNOU, P.: *Analysis of Traffic Flow with Mixed Manual and Intelligent Cruise Control Vehicles: Theory and Experiments*. 2001
- [Bouzouraa und Hofmann 2010] BOUZOURAA, E. M. ; HOFMANN, U.: Fusion of occupancy grid mapping and model based object tracking for driver assistance systems using laser and radar sensors. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV): Tagung San Diego, USA, 21 bis 24 Juni 2010*, IEEE, 2010, S. 294–300. – ISBN 9781424478682
- [Brahmi 2010] BRAHMI, M.: *Entwicklung, Implementierung und Validierung eines Sensormodells für zukünftige Radarsensorik*. München, Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Diplomarbeit, 2010
- [Bruin u. a. 2007] BRUIN, D. ; KROON, J. ; KLAVEREN, R. ; NELISSE, M.: Design and test of a cooperative adaptive cruise control system. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium: Tagung Istanbul, Turkey*, IEEE Computer Society Press, 2007, S. 392–396
- [Bubb 2008] BUBB, H.: *Menschliche Zuverlässigkeit: Skript zur Vorlesung*. 2008
- [Bubb und Schmidtke 1993] BUBB, H. ; SCHMIDTKE, H.: Systemstruktur. In: SCHMIDTKE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. München : Hanser, 1993, S. 305–333. – ISBN 3-446-16440-5
- [Bühner und Ziegler 2009] BÜHNER, M. ; ZIEGLER, M.: *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München : Pearson Studium, 2009. – ISBN 9783827372741

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Buld und Krüger 2002] BULD, S. ; KRÜGER, H.-P.: *Wirkung von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit: Projekt: EMPHASIS. Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen.* 2002
- [Buld und Krüger 2003] BULD, S. ; KRÜGER, H.-P.: Die Auswirkung von Teilautomation auf das Fahrverhalten. In: GRANDT, M. (Hrsg.): *Entscheidungsunterstützung für die Fahrzeug- und Prozessführung DGLR-Bericht 2003-04*, 2003, S. 241–253
- [Buld u. a. 2003] BULD, S. ; KRÜGER, H.-P. ; HOFFMANN, S. ; TOTZKE, I.: Die Fahrsimulation als Methode bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten: Tagung Hamburg*, VDI-Verlag, 2003 (VDI-Berichte Nr. 1745), S. 153–175. – ISBN 3-18-091745-8
- [concurrent 2010] CONCURRENT: *Homepage der Firma Concurrent Computer GmbH.* 2010. – URL <http://www.concurrent.de/>. – Zugriffsdatum: 17.12.2010
- [Cremer u. a. 1998] CREMER, M. ; DEMIR, C. ; DONIKIAN, S. ; ESPIE S. ; MCDONALD, M.: Investigating the Impact of AICC Concepts on Traffic Flow Quality. In: *5th World Congress on Intelligent Transport Systems: Tagung Seoul, South Korea*, 1998
- [Davis 2004] DAVIS, C. L.: Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow. In: *Physical Review E* 69 (2004), Nr. 6, S. 1–8
- [Davis 2007] DAVIS, C. L.: Effect of adaptive cruise control systems on mixed traffic flow near an on-ramp. In: *Physica A* 379 (2007), Nr. 1, S. 274–290
- [Destatis 2009] DESTATIS: *Statistisches Bundesamt Deutschland: Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2008.* 2009
- [Destatis 2010] DESTATIS: *Statistisches Bundesamt Deutschland: Polizeilich erfasste Unfälle.* 2010. – URL [www.destatis.de](http://www.destatis.de). – Zugriffsdatum: 29.04.2010
- [Deuschle 2005] DEUTSCHLE, S.: Wer fährt? - Der Fahrer oder das System? - Technische Grundlagen von Fahrerassistenzsystemen. In: *SVR - Straßenverkehrsrecht. Zeitschrift für die Praxis des Verkehrsjuristen* 6 (2005), S. 201–206
- [Dick 2007] DICK, M.: Einsatz virtueller Techniken in der Audi-Produktentwicklung. In: *11. Automobiltechnische Konferenz: Virtual Vehicle Creation 2007: Internationaler Kongress Stuttgart*, 2007

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Didier 2006] DIDIER, M.: *Ein Verfahren zur Messung des Komforts von Abstandsregelsystemen (ACC-Systemen): Bericht aus dem Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt*. Stuttgart : Ergonomia Verlag, 2006
- [Donges 2008] DONGES, E.: *Fahrerverhalten und Fahrerassistenz - Gastvorlesung Dynamik der Straßenfahrzeuge*. 2008
- [Dragutinovic u. a. 2005] DRAGUTINOVIC, N. ; BROOKHUIS, A. K. ; HAGENZIEKER, P. M. ; MARCHAU, A. V.: Behavioural Effects of Advanced Cruise Control Use - a meta-analytic approach. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 5 (2005), Nr. 4, S. 267–280
- [dSpace 2010a] DSPACE: *dSpace GmbH: AutoBox / Tandem-AutoBox: Produktübersicht*. 2010. – URL <http://www.dspace.de/ww/de/gmb/home/products/hw/accessories/autobox.cfm>. – Zugriffsdatum: 14.07.2010
- [dSpace 2010b] DSPACE: *dSpace GmbH: MicroAutoBox: Produktübersicht*. 2010. – URL <http://www.dspace.de/ww/de/gmb/home/products/hw/micautob.cfm>. – Zugriffsdatum: 14.07.2010
- [Ehmans u. a. 2000] EHMANN, D. ; WALLENTOWITZ, H. ; GELAU, C. ; NICKLISCH, F.: Zukünftige Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. In: WALLENTOWITZ, H. (Hrsg.) ; PISCHINGER, S. (Hrsg.): 9. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, RWTH, 2000
- [Eick und Debus 2005] EICK, E.-M. ; DEBUS, G.: Adaptation effects in an automated car following scenario. In: UNDERWOOD, G. (Hrsg.): *International Conference of Traffic and Transport Psychology: Tagung Amsterdam, Netherlands, 2005*, S. 243–255
- [Eisemann und Beine 2007] EISEMANN, U. ; BEINE, M.: Werkzeugeinsatz in der Entwicklung von Automotive-Software. In: *Automobil-Elektronik* 1 (2007), S. 48–49
- [Entin 2010] ENTIN, V.: *Datenbank-gestützte Prozessautomatisierung bei Software-Tests*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Department Informatik, Lehrstuhl für Informatik 6 (Datenmanagement), Dissertation, 2010
- [Euro NCAP 2010] EURO NCAP: *The Official Site Of The European New Car Assessment Programme*. 2010. – URL [www.euroncap.com](http://www.euroncap.com). – Zugriffsdatum: 30.07.2010

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Fancher u. a. 1998] FANCHER, P. ; ERVIN, R. ; SAYER, J. ; HAGAN, M. ; BOGARD, S. ; BAREKET, Z. ; MEFFORD, M. ; HAUGEN, J.: *Intelligent Cruise Control Field Operational Test*. 1998
- [Fancher u. a. 2001] FANCHER, P. ; PENG, H. ; BAREKET, Z. ; ASSAF, C. ; ERVIN, R.: Evaluating the Influences of Adaptive Cruise Control Systems on the Longitudinal Dynamics of Strings of Highway Vehicles. In: *International Association for Vehicle System Dynamics Symposium: Tagung Copenhagen, Denmark* Bd. 37, 2001, S. 125–136
- [Fastenmeier 1995] FASTENMEIER, W. (Hrsg.): *Mensch-Fahrzeug-Umwelt*. Bd. 33: *Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Köln : TÜV Rheinland, 1995
- [Fecher u. a. 2008] FECHER, N. ; REGH, F. ; HABENICHT, S. ; HOFFMANN, J. ; WINNER, H.: Test- und Bewertungsmethoden für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene. In: *at - Automatisierungstechnik* 56 11 (2008), S. 592–600
- [Fey und Stürmer 2007] FEY, I. ; STÜRMER, I.: Quality Assurance Methods for Model-based Development: A Survey and Assessment. In: *SAE 2007 Transactions Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems* 116-6 (2007), S. 374–380
- [Filzek 2002] FILZEK, B.: *Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Dissertation, 2002
- [fka 2005] FKA: *Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen: Teststrecke*. 2005. – URL [http://www.ika.rwth-aachen.de/pdf\\_eb/gb1-11teststrecke.pdf](http://www.ika.rwth-aachen.de/pdf_eb/gb1-11teststrecke.pdf). – Zugriffsdatum: 11.06.2010
- [Freyer 2008] FREYER, J.: *Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC*. Neubiberg bei München, Universität der Bundeswehr, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Arbeitswissenschaft, Dissertation, 2008
- [Freyer u. a. 2007] FREYER, J. ; DEML, B. ; MAURER, M. ; FÄRBER, B.: ACC with enhanced situation awareness to reduce behavior adaptations in lane change situations. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium: Tagung Istanbul, Turkey*, IEEE Computer Society Press, 2007, S. 999–1004





## LITERATURVERZEICHNIS

- [Gelau u. a. 2006] GELAU, C. ; SCHULZE, H. ; KROJ, G.: *Verkehrsmedizin - Fahreignung, Fahrsicherheit, Unfallrekonstruktion*. Köln : Deutscher Ärzte-Verlag, 2006. – ISBN 978-3-7691-0490-5
- [Genesys 2009] GENESYS: *Genesys GmbH: Produktbeschreibung ADMA-G*. 2009. – URL <http://www.genesys-adma.de>. – Zugriffsdatum: 04. August 2010
- [Gründl 2005] GRÜNDL, M.: *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Regensburg, Universität, Philosophische Fakultät II (Psychologie und Pädagogik), Dissertation, 2005
- [Grünweg 2006] GRÜNWEG, T. ; SPIEGEL ONLINE (Hrsg.): *VW Golf GTI 53+1: Geisterfahrt im Dienst der Forschung*. 2006. – URL <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,424288,00.html>. – Zugriffsdatum: 16.06.2010
- [Gühmann 2002] GÜHMANN, C.: *Modellbildung und Testautomatisierung für die Hardware-in-the-Loop Simulation*. In: *IIR Tagung Versuch, Test und Simulation*, URL <http://www.mdt.tu-berlin.de>, 2002
- [Gundlach 1993] GUNDLACH, H. ; ALBERT, D. (Hrsg.) ; PAWLIK, K.-H. (Hrsg.) ; STAPF, K. (Hrsg.) ; STROEBE, W. (Hrsg.): *Entstehung und Gegenstand der Psychophysik*. 1993
- [Hargutt 23.1.2001] HARGUTT, V.: *Urteilsverfahren im Überblick: Law of Categorical Judgement; Law of Comparative Judgement*. 23.1.2001. – URL [http://www-user.uni-bremen.de/~henning/Lehre/Methseminar/LV\\_Stunden\\_Inhalte/ThurstoneSk\\_Hargutt\\_Uni\\_Wuerzburg.pdf](http://www-user.uni-bremen.de/~henning/Lehre/Methseminar/LV_Stunden_Inhalte/ThurstoneSk_Hargutt_Uni_Wuerzburg.pdf)
- [Hartmann 2001] HARTMANN, N.: *Automation des Tests eingebetteter Systeme am Beispiel der Kraftfahrzeugelektronik*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Technik der Informationsverarbeitung, Dissertation, 2001
- [Heißing 2008] HEISSING, B.: *Dynamik der Straßenfahrzeuge: Skript zur Vorlesung*. 2008
- [Heißing und Brandl 2002] HEISSING, B. ; BRANDL, H. J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. 1. Würzburg : Vogel, 2002. – ISBN 3 8023 1903 6

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Henle u. a. 2009] HENLE, L. ; REGENSBURGER, U. ; DANNER, B. ; HENTSCHEL, E. ; HÄMMERLING, C.: Fahrerassistenzsysteme. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2009), Nr. 01, S. 56–62
- [Hochstädter und Ludmann 1999] HOCHSTÄDTER, A. ; LUDMANN, J.: Stabilität von Fahrzeugkolonnen und verkehrliche Auswirkungen der Abstandsregelung. In: HAUS DER TECHNIK (Hrsg.): *Seminar E-30-016-056-9 Abstandsregelung*, 1999
- [Hochstädter u. a. 2000] HOCHSTÄDTER, A. ; ZAHN, P. ; BREUER, K.: Ein universelles Fahrermodell mit den Einsatzbeispielen Verkehrssimulation und Fahrsimulator. In: WALLENTOWITZ, H. (Hrsg.) ; PISCHINGER, S. (Hrsg.): *9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, RWTH, 2000
- [Hoedemaeker 2000] HOEDEMAEKER, M.: Driving behaviour with ACC and the acceptance by individual drivers. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *2000 IEEE Intelligent Transportation Systems*, IEEE Computer Society Press, 2000, S. 506–509
- [Hoedemaeker und Brookhuis 1998] HOEDEMAEKER, M. ; BROOKHUIS, A. K.: Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 1 (1998), S. 95–106
- [Hoffmann und Winner 2008] HOFFMANN, J. ; WINNER, H.: EVITA - Die Prüfmethode für Antikollisionssysteme. In: MAURER, M. (Hrsg.) ; STILLER, C. (Hrsg.): *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS2008: Workshop Walting im Altmühltal*, 2008, S. 116–130
- [Holzmann 2005] HOLZMANN, H.: Anwendungsorientierte Übersicht kommerzieller Fahrzeug-Simulations-Systeme. In: HAUS DER TECHNIK (Hrsg.): *Tagung "Modellbildung, Simulation und Regelung von Kraftfahrzeugen"*, 2005
- [Hwang u. a. 2006] HWANG, T. ; ROH, J. ; PARK, K. ; HAWANG, J. ; LEE, K. H. ; LEE, K. ; LEE, S.-J. ; KIM, Y.-J.: Development of HIL Systems for Active Brake Control Systems. In: *International Joint Conference SICE-ICASE*, 2006, S. 4404–4408
- [iABG 2009] IABG: *V-Modell XT: Version 1.3*. 2009. – URL <http://v-modell.iabg.de/>
- [iMAR 2009] iMAR: *iMAR GmbH: Produktdatenblatt iTraceRT-F200*. 2009. – URL [http://www.imar.de/downloads/TraceRT-F200\\_de.pdf](http://www.imar.de/downloads/TraceRT-F200_de.pdf). – Zugriffsdatum: 04.07.2010

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Ioannou und Chien 1993] IOANNOU, A. P. ; CHIEN, C. C.: Autonomous intelligent cruise control. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 42 (1993), Nr. 4, S. 657–672
- [Ioannou und Stefanovic 2005] IOANNOU, A. P. ; STEFANOVIC, M.: Evaluation of ACC vehicles in mixed traffic: lane change effects and sensitivity analysis. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 6 (2005), Nr. 1, S. 79–89
- [IPG 2010] IPG: *IPG Automotive GmbH: Produktinformationen zu CarMaker*. 2010. – URL <http://www.ipg.de/carmaker.html>. – Zugriffsdatum: 13.06.2010
- [ISO 1999] ISO ; INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG (Hrsg.): *Passenger cars — Test track for a severe lane-change manoeuvre — Part 1: Double lane-change*. 1999
- [ISO 2002] ISO ; INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG (Hrsg.): *Transport information and control systems — Adaptive Cruise Control systems — Performance requirements and test procedures*. 2002
- [ISO 2004] ISO ; INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG (Hrsg.): *Intelligent Transport Systems - All Speed Following Systems - Performance requirements and test procedures*. 2004
- [ISO 2006] ISO ; INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG (Hrsg.): *Intelligent Transport Systems - Low Speed Following Systems - Performance requirements and test procedures*. 2006
- [ISO 2007] ISO ; INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG (Hrsg.): *Intelligent Transport Systems – Full Speed Range Adaptive Cruise 5 Control Systems - Performance requirements and test procedures*. 2007
- [Jenness u. a. 2008] JENNESS, W. J. ; LERNER, D. N. ; MAZOR, S. ; OSBERG, S. J. ; TEFFT, C. B.: *Use of Advanced In-Vehicle Technology by Young and Older Early Adopters. Survey Results on Adaptive Cruise Control Systems*. 2008
- [Kochem und Holzmann 2006] KOCHEM, M. ; HOLZMANN, H.: Einsatz der Road-Lab-Math Strategie bei der simulationsbasierten Entwicklung von Fahrdynamikregelsystemen. In: VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (Hrsg.): *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2006: Tagung Wiesloch*, VDI-Verlag, 2006 (VDI-Berichte Nr. 1931), S. 695–704. – ISBN 3-18-091931-0

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Kopf und Simon 2001] KOPF, M. ; SIMON, J.: A Concept for a Learn-Adaptive Advanced Driver Assistance System. In: ONKEN, R. (Hrsg.): *8th Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control: CSAPC '01: Konferenz Neubiberg*, 2001
- [Kovordányi 2005] KOVORDÁNYI, R.: When will Advanced Driver Support Systems be User-Adaptive? The Case of Adaptive Cruise Control. In: *AAAI Spring Symposium*, 2005
- [Kraftfahrt-Bundesamt 2009a] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Fahrzeugzulassungen: Bestand, Fahrzeugklassen und Aufbauarten: 1. Januar 2009*. 2009. – URL [www.kbashop.de](http://www.kbashop.de). – Zugriffsdatum: 30.04.2010
- [Kraftfahrt-Bundesamt 2009b] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *KBA-Glossar*. 2009. – URL [www.kba.de](http://www.kba.de)
- [Lamberg 2003] LAMBERG, K.: Durchgängiges, automatisiertes Testen bei der Entwicklung von Automobilelektronik. In: *Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobilelektronik: Tagung Berlin*, 2003
- [Lamberg und Beine 2005] LAMBERG, K. ; BEINE, M.: Testmethoden und -tools in der modellbasierten Funktionsentwicklung. In: DSPACE (Hrsg.): *dSpace GmbH: ASIM, Fachtagung Simulations- und Testmethoden für Software in Fahrzeugsystemen*, 2005
- [Lange 2008] LANGE, C.: *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. München, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Dissertation, 2008
- [Lange u. a. 2008] LANGE, C. ; BUBB, H. ; TÖNNIS, M. ; KLINKER, G.: Sicherheitspotential und Verbrauchsreduzierung durch ein intelligent geregeltes aktives Gaspedal. In: TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.) ; LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN (Hrsg.): *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz: Tagung München*, 2008
- [Lee u. a. 2008] LEE, D. J. ; MCGEHEE, V. D. ; BROWN, L. T. ; MARSHALL, C. D.: *Rear-End Crash Avoidance System (RECAS) Algorithms and Alerting Strategies: Effects of Adaptive Cruise Control and Alert Modality on Driver Performance*. 2008



## LITERATURVERZEICHNIS

- [Lee und Nam 2007] LEE, W.-S. ; NAM, H.-K.: A study on driver acceptance of adaptive cruise control using a driving simulator. In: THE UNIVERSITY OF IOWA (Hrsg.): *Driving Simulation Conference: North America 2007: Tagung Iowa City, USA, 2007*, S. 1–9
- [Leica 2011] LEICA: *Homepage der Firma Leica Geosystems GmbH*. 2011. – URL <http://www.leica-geosystems.de/>. – Zugriffsdatum: 25.05.2011
- [Limbacher und Färber 2010] LIMBACHER, R. ; FÄRBER, B.: Kombination von Abstandsregelsystem und Stop&Go-Funktion im Audi A8. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2010), Nr. 02, S. 30–35
- [Lindemann und Gühmann 2003] LINDEMANN, M. ; GÜHMANN, C.: VeLoDyn - Ein Werkzeug zur Triebstrangsimulation von Kraftfahrzeugen. In: *Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung für die Automobilelektronik: Tagung Berlin, 2003*
- [Lucas 2009] LUCAS, B.: *BOSCH Radar Road Map-Customer Information*. 2009
- [Ma und Kaber 2005] MA, R. ; KABER, B. D.: Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 35 (2005), Nr. 10, S. 939–953
- [Marsden u. a. 2001] MARSDEN, G. ; MCDONALD, M. ; BRACKSTONE, M.: Towards an understanding of adaptive cruise control. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 9 (2001), Nr. 1, S. 33–51
- [Maurer 2009] MAURER, M.: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, H. (Hrsg.) ; HAKULI, S. (Hrsg.) ; WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 1. Auflage. Wiesbaden : Hanser, 2009 (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 43–54. – URL [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2870486&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2870486&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm). – ISBN 3-446-16440-5
- [Maurer 2010] MAURER, M.: *Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug: Skript zur Vorlesung*. 2010
- [Mayer u. a. 2007] MAYER, M. ; LI, H. ; KATAEV, V.: *Projektgruppe Multiprocesser-in-the-Loop*. 2007

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Meinhardt und Persike 2005] MEINHARDT, G. ; PERSIKE, M.: *Entwicklung eines Online-Evaluationssystems*. 2005. – URL <http://www.psych.unimainz.de/abteil/met/lehre/WS20052006/SemEval/Scripte/LCJSKAL.pdf>
- [Mercer 2006] MERCER: *Mercer Management Consulting: Elektronik setzt die Impulse im Auto: Mercer Studie Automobilelektronik*. 2006. – URL [http://www.presseportal.de/pm/17052/914936/mercer\\_management\\_consulting](http://www.presseportal.de/pm/17052/914936/mercer_management_consulting). – Zugriffsdatum: 13.06.2010
- [Mesow 2008] MESOW, L.: *Multisensorielle Datensimulation im Fahrzeugumfeld für die Bewertung von Sensorfusionsalgorithmen*, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2008
- [Miegler u. a. 2009] MIEGLER, M. ; SCHIEBER, R. ; KERN, A. ; GANSLMEIER, T. ; NENTWIG, M.: Hardware-in-the-Loop-Test von vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen. In: *ATZelektronik* 4 (2009), Nr. 05, S. 14–19
- [Neukum u. a. 2008] NEUKUM, A. ; LÜBBEKE, T. ; KRÜGER, H.-P. ; MAYSER, C. ; STEINLE, J.: ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In: MAURER, M. (Hrsg.) ; STILLER, C. (Hrsg.): *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS2008: Workshop Walting im Altmühltal*, 2008, S. 141–150
- [von Neumann-Cosel u. a. 2009] NEUMANN-COSEL, K. von ; DUPUIS, M. ; WEISS, C.: Virtual test drive - provision of a consistent tool-set for [d,h,s,v]-in-the-loop. In: DSC EUROPE (Hrsg.): *Driving Simulation Conference 2009: Tagung Monaco*, 2009. – ISBN 978-3-18-092000-9
- [Neunzig und Breuer 2000] NEUNZIG, D. ; BREUER, K.: Analysis of longitudinal vehicle control systems with minimised emissions and optimised driving comfort. In: *7th World Congress on ITS: Tagung Turin, Italy*, 2000
- [Niedermayr 2005] NIEDERMAYR, C.: Testen, Rapid Prototyping und X-in the loop. In: *Hauptseminar Automotive Software Engineering*, 2005
- [Nirschl 1995] NIRSCHL, G.: *Fahrer- und situationsspezifische Einflußfaktoren bei AICC-Fahrerassistenzsystemen*. 1995
- [Oei und Polak 2002] OEI, H.-L. ; POLAK, H. P.: Intelligent Speed Adaptation (ISA) and Road Safety. In: *IATSS Research* Bd. 26, 2002, S. 45–51



## LITERATURVERZEICHNIS

- [Ohno 2001] OHNO, H.: Analysis and modeling of human driving behaviors using adaptive cruise control. In: *Applied Soft Computing* 1 (2001), S. 237–243
- [Ojeda und Nathan 2006] OJEDA, L. ; NATHAN, F. ; BROUWER, F. T. R. (Hrsg.) ; HOEDEMAEKER, M. D. (Hrsg.): *Driver support and information systems: Experiments on learning, appropriation and effects of adaptiveness*. 2006
- [Otterbach und Schütte 2004] OTTERBACH, R. ; SCHÜTTE, F.: Effiziente Funktions- und Software-Entwicklung für mechatronische Systeme. In: *VDI-Berichte Nr. 1842*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004, S. 119–126
- [Oxford 2009] OXFORD: *Oxford Technical Solutions: Produktdatenblatt RT3000*. 2009. – URL [http://www.oxts.com/downloads/RT3000\\_DE.pdf](http://www.oxts.com/downloads/RT3000_DE.pdf). – Zugriffsdatum: 04. August 2010
- [Park u. a. 2006] PARK, J. ; SUNG, D. ; LEE, W.-S.: A Driving Simulator Study on Adaptive Cruise Control Failure. In: *International Joint Conference SICE-ICASE: Tagung Bexco, Korea, 2006*, S. 2138–2141
- [Popiv u. a. 2008] POPIV, D. ; LANGE, C. ; BUBB, H.: Driving with and without ACC: evaluated Differences. In: *54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Tagung München, 2008*, S. 141–145
- [Rajaonah u. a. 2006] RAJAONAH, B. ; ANCEAUX, F. ; TRICOT, N. ; PACAUX-LEMOINE, M.-P.: Trust, cognitive control, and control: the case of drivers using an Auto-Adaptive Cruise Control. In: *13th European conference on Cognitive ergonomics: ECCE '06: Tagung Zürich, Switzerland, 2006*, S. 17–24
- [Rakha u. a. 2001] RAKHA, H. ; HANKEY, J. ; PATTERSON, A. ; VAN AERDE, M.: Field Evaluation of Safety Impacts of Adaptive Cruise Control. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* 6 (2001), Nr. 3, S. 225–259
- [Reif 2009] REIF, K.: *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure: Mit 267 Abbildungen und 36 Tabellen*. 3., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag — GWV Fachverlage GmbH, 2009 (STUDIUM / ATZ/MTZ-Fachbuch). – URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9306-2>. – ISBN 9783834893062
- [Rohling 2007] ROHLING, H.: *Radartechnik- und Signalverarbeitung*. 2007

- [Rothmund 2004] ROTHMUND, T.: Bedeutung von Hardware in the Loop in der Automobilindustrie. In: *Arbeitskreis Mechatronik an der FH Pforzheim: Tagung Pforzheim*, 2004
- [Rudin-Brown und Parker 2004] RUDIN-BROWN, M. C. ; PARKER, A. H.: Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 7 (2004), S. 59–76
- [Saad u. a. 2005] SAAD, F. ; HJÄLMDAHL, M. ; CAÑAS, J. ; ALONSO, M. ; GARAYO, P. ; MACCHI, L. ; NATHAN, F. ; OJEDA, L. ; PAPA KOSTOPOULOS, V. ; PANOU, M. ; BEKIARIS, E.: *Literature review of behavioural effects*. 2005
- [Sacher und Bubb 2006a] SACHER, H. ; BUBB, H.: Was bedient der Fahrer? Feldversuche zu Erfassung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. In: *Internet-Journal, MMI Interaktiv* (2006), Nr. 11
- [Sacher und Bubb 2006b] SACHER, H. ; BUBB, H.: Wie nutzen Fahrzeugführer das adaptive cruise control (ACC)? In: TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.) ; LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN (Hrsg.): *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz: Tagung München*, 2006
- [Sayer u. a. 1997] SAYER, R. J. ; MEFFORD, L. M. ; FANCHER, S. P. ; ERVIN, E. R. ; BOGARD, E. S.: An experimental design for studying how driver characteristics influence headway control. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE Conference on Intelligent Transportation System: ITSC 1997*, IEEE Computer Society Press, 1997, S. 870–875
- [Schäppi u. a. 2005] SCHÄPPI, B. ; ANDRESEN, M. M. ; KIRCHGEORG, M. ; RADERMACHER, F.-J.: *Handbuch Produktentwicklung*. München : Hanser, 2005. – URL <http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/386653542.PDF>. – ISBN 3446228381
- [Schäuffele und Zurawka 2006] SCHÄUFFELE, J. ; ZURAWKA, T.: *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen: Mit 277 Abbildungen*. 3., verbesserte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag — GWV Fachverlage GmbH, 2006 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9085-6>. – ISBN 9783834890856



## LITERATURVERZEICHNIS

- [Schenk 2007] SCHENK, J.: *Prüfplattform für mechatronisch ausgestattete Fahrzeuge in Entwicklung und Produktion*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2007
- [Schick 2008] SCHICK, B. ; IPG AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.): *Szenarien unter Kontrolle: Eventbasiertes Testen von Fahrerassistenzsystemen mit CarMaker*. 2008. – URL <http://www.ipg.de/542.html>. – Zugriffsdatum: 16.12.2008
- [Schick u. a. 2007] SCHICK, B. ; BÜTTNER, R. ; BALTRUSCHAT, K. ; MEIER, G.: Methoden zur Bewertung von Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen. In: VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK (Hrsg.): *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung: Tagung Würzburg*, VDI-Verlag, 2007 (VDI-Berichte Nr. 1990), S. 375–390. – ISBN 3-18-091960-4
- [Schick u. a. 2008] SCHICK, B. ; KREMER, B. ; HENNING, J. ; ZUR HEIDEN, M.: Simulation Methods to Evaluate and Verify Functions, Quality and Safety of Advanced Driver Assistance Systems. In: IPG AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.) ; UNIVERSITÄT KARLSRUHE (Hrsg.) ; AVL (Hrsg.) ; TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.): *IPG Technology Conference 2008: "apply and innovate!"*: Konferenz Ettlingen bei Karlsruhe, 2008
- [Schneider 2010] SCHNEIDER, H.: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation, 2010
- [Scholz 2005] SCHOLZ, P.: *Softwareentwicklung eingebetteter Systeme: Grundlagen, Modellierung, Qualitätssicherung*. Berlin : Springer, 2005 (Xpert.press). – URL <http://www.gbv.de/dms/bsz/toc/bsz116605685inh.pdf>. – ISBN 3540234055
- [Schwaiger 2008] SCHWAIGER, K. ; HENHAPL, W. (Hrsg.) ; KAMINSKI, A. (Hrsg.): *Software Engineering: Requirements Engineering: SS2008*. 2008
- [Schwarz 2006] SCHWARZ, J.: Code of Practice for development, validation and market introduction of ADAS. In: TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.) ; LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN (Hrsg.): *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz: Tagung München*, 2006

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Seppelt u. a. 2005] SEPPELT, D. B. ; LEES, N. M. ; LEE, D. J.: Driver distraction and reliance: Adaptive cruise control in the context of sensor reliability and algorithm limits. In: *Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design: Tagung Rockport, USA, 2005*, S. 255–261
- [Simat 2007] SIMAT, T.: *Cheometrik I: Statistische Tests - nicht parametrisch*. 2007.  
– URL [http://www.chm.tu-dresden.de/lc/lehre/chemometrie/verfahren/nicht\\_parametrische\\_tests.pdf](http://www.chm.tu-dresden.de/lc/lehre/chemometrie/verfahren/nicht_parametrische_tests.pdf)
- [Skolnik 2007] SKOLNIK, I. M.: *Introduction to radar systems*. 3. ed., internat. ed., [Nachdr.]. Boston : McGraw-Hill, 2007 (McGraw-Hill electrical engineering series).  
– URL <http://www.gbv.de/dms/bowker/toc/9780071181891.pdf>.  
– ISBN 007118189X
- [Sonntag 2005] SONNTAG, E.: *Was ich dir wünsche...einen Engel*. 1. Groh Verlag GmbH & Co. KG, 2005
- [Spitzer 2001] SPITZER, B.: *Modellbasierter Hardware-in-the-Loop Test eingebetteter elektronischer Systeme*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Technik der Informationsverarbeitung, Dissertation, 2001
- [Stanton und Marsden 1996] STANTON, A. N. ; MARSDEN, P.: From Fly-by-Wire to Drive-by-Wire: Safety implications of automation in vehicles. In: *Safety Science* 24 (1996), Nr. 1, S. 35–49
- [Stanton u. a. 1997] STANTON, A. N. ; YOUNG, M. ; MCCAUDLER, B.: Drive-by-Wire: the case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control. In: *Safety Science* 27 (1997), Nr. 2/3, S. 149–159
- [Strasser u. a. 2010] STRASSER, B. ; SIEGEL, A. ; SIEDERSBERGER, K.-H. ; MAURER, M. ; BUBB, H.: Vernetzung von Test- und Simulationenmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS). In: TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH (Hrsg.) ; LEHRSTUHL FÜR FAHRZEUGTECHNIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN (Hrsg.): *4. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz: Tagung München, 2010*
- [Takada und Shimoyama 2001] TAKADA, Y. ; SHIMOYAMA, O.: Evaluation of Driving-Assistance Systems Based on Drivers' Workload. In: *Driving Assessment 2001: The First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, 2001*, S. 208–213

## LITERATURVERZEICHNIS

- [TESIS 2006] TESIS: *TESIS DYNAware GmbH: ve-DYNA. Overview, Simulation Packages, Model: Model Basics, Manoeuvre, Preprocessing, Postprocessing, Add-Ons.* 2006. – URL <http://www.thesis.de/download.php?id=113999633839>. – Zugriffsdatum: 14.06.2010
- [TESIS 2008] TESIS: *TESIS DYNAware GmbH: veDYNA - Driver Simulators.* 2008. – URL [http://www.fttronik.de/files/vedyna\\_driver\\_simulator.pdf](http://www.fttronik.de/files/vedyna_driver_simulator.pdf). – Zugriffsdatum: 27. Juli 2010
- [Thompson u. a. 2006a] THOMPSON, K. L. ; TÖNNIS, M. ; LANGE, C.: Using Glance Behaviour to evaluate ACC Driver Controls in a Driving Simulator. In: *Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting: Tagung San Francisco, USA, 2006*, S. 2448–2452
- [Thompson u. a. 2006b] THOMPSON, K. L. ; TÖNNIS, M. ; LANGE, C. ; BUBB, H. ; KLINKER, G.: Effect of active cruise control design on glance behaviour and driving performance. In: *IEA 2006 16th World Congress on Ergonomics: Tagung Maastricht, Netherlands, 2006*
- [Tricot u. a. 2004] TRICOT, N. ; RAJAONAH, B. ; PACAUX, M.-P. ; POPIEUL, J.-C.: Driver's behaviors and human-machine interactions characterization for the design of an advanced driving assistance system. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics: Tagung The Hague, Netherlands Bd. 4*, IEEE Computer Society Press, 2004, S. 3976–3981
- [TÜV 2008] TÜV: *TÜV Süd Automotive GmbH: Dynamic Chassis Simulator: Progress for the real and virtual worlds.* 2008. – URL [http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1207295928518787820927/TS-AM\\_Broschuere%20DCS\\_6-Seiter\\_E.pdf](http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1207295928518787820927/TS-AM_Broschuere%20DCS_6-Seiter_E.pdf). – Zugriffsdatum: 11.06.2010
- [Viti u. a. 2007] VITI, F. ; HOOGENDOORN, P. S. ; ALKIM, P. T. ; BOOTSMA, G.: Driving behavior interaction with ACC: results from a Field Operational Test in the Netherlands. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (IEEE) (Hrsg.): *IEEE Intelligent Vehicles Symposium: Tagung Istanbul, Turkey*, IEEE Computer Society Press, 2007, S. 745–750
- [Voigtländer 2008] VOIGTLÄNDER, P.: ADTF: Framework for driver assistance and safety systems. In: ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS (VDI) (Hrsg.): *FISITA*

## LITERATURVERZEICHNIS

- 2008 *World Automotive Congress: Tagung München*, Springer Automotive Media; GWV Fachverlage GmbH, 2008
- [Wältermann u. a. 2004] WÄLTERMANN, P. ; SCHÜTTE, H. ; DIEKSTALL, K.: Hardware-in-the-Loop-Test verteilter Kfz-Elektroniksysteme. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2004), Nr. 05
- [Weinberger 2001] WEINBERGER, M.: *Der Einfluss von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten*. München, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Dissertation, 2001
- [Werf u. a. 2002] WERF, J. ; SHLADOVER, E. S. ; MILLER, A. M. ; KOURJANSKAIA, N.: Evaluation of the Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity and Implications for Deployment of Future Automated Systems. In: *81st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2002
- [Wiedemann 1974] WIEDEMANN, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen, Habilitation, 1974
- [Wildemann 2010] WILDEMANN, H.: *Leitfaden / TCW, Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management*. Bd. 76: *Anlaufmanagement: Leitfaden zur Optimierung der Anlaufphase von Produkten, Anlagen und Dienstleistungen*. 9. Aufl. München : TCW Transfer-Centrum, 2010. – ISBN 9783934155527
- [Winner 2002] WINNER, H.: Die lange Entwicklung von ACC. In: MAURER, M. (Hrsg.) ; STILLER, C. (Hrsg.): *2. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS2002: Workshop Waiting im Altmühltal*, 2002, S. 1–4
- [Wisselmann 2008] WISSELMANN, D.: *Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit*. 2008
- [Wüst 2004] WÜST, C.: Automobile - Elektronischer Beifahrer vertreibt den Stau. In: *Der Spiegel* 30 (2004), S. 110
- [Young und Stanton 1997] YOUNG, S. M. ; STANTON, A. N.: Automotive automation: Investigating the impact on drivers' mental workload. In: *International Journal of Cognitive Ergonomics* 1 (1997), Nr. 4, S. 325–336
- [Young und Stanton 2002] YOUNG, S. M. ; STANTON, A. N.: Malleable Attentional Resources Theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. In: *Human Factors* 44 (2002), Nr. 3, S. 365–375



## LITERATURVERZEICHNIS

[Young und Stanton 2007] YOUNG, S. M. ; STANTON, A. N.: What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. In: *Ergonomics* 50 (2007), Nr. 8, S. 1324–1339



