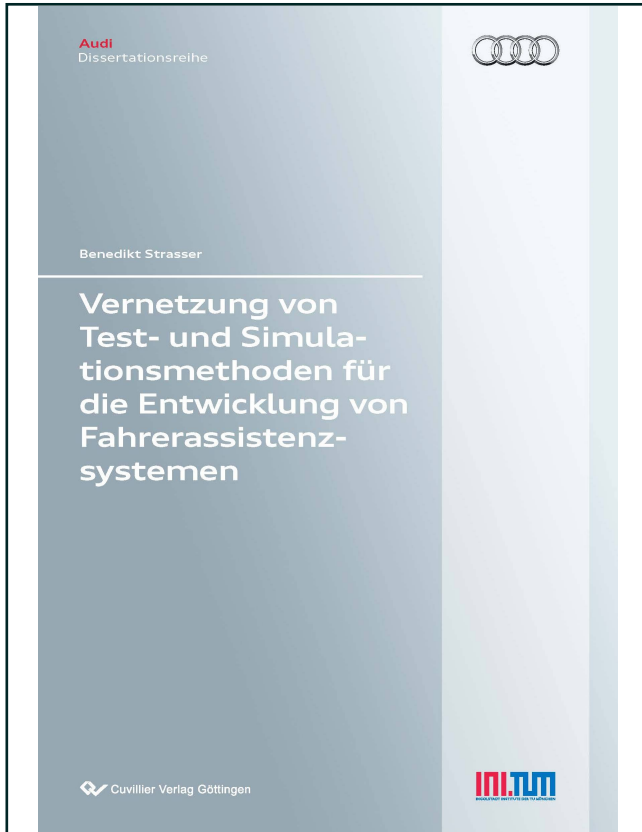




Benedikt Strasser (Autor)

Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6223>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

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)¹. 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.

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

1 Einleitung

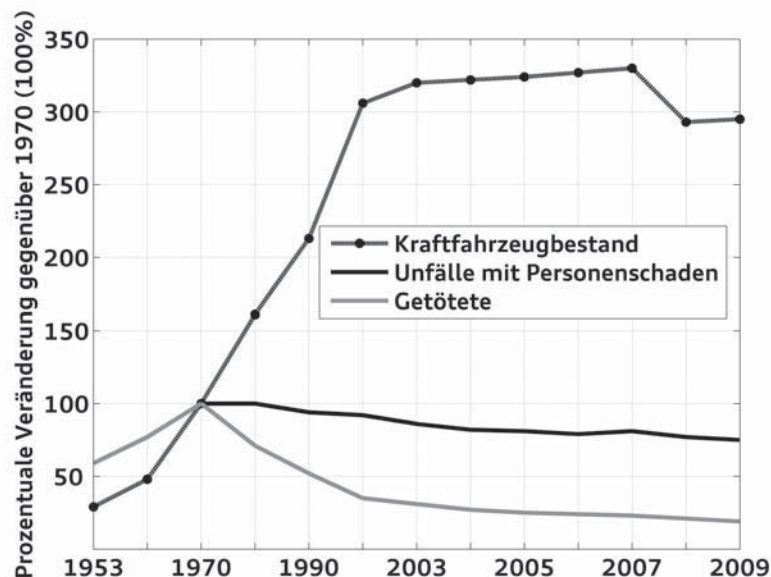


Abbildung 1.1: Verkehrs- und Unfalldaten

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.

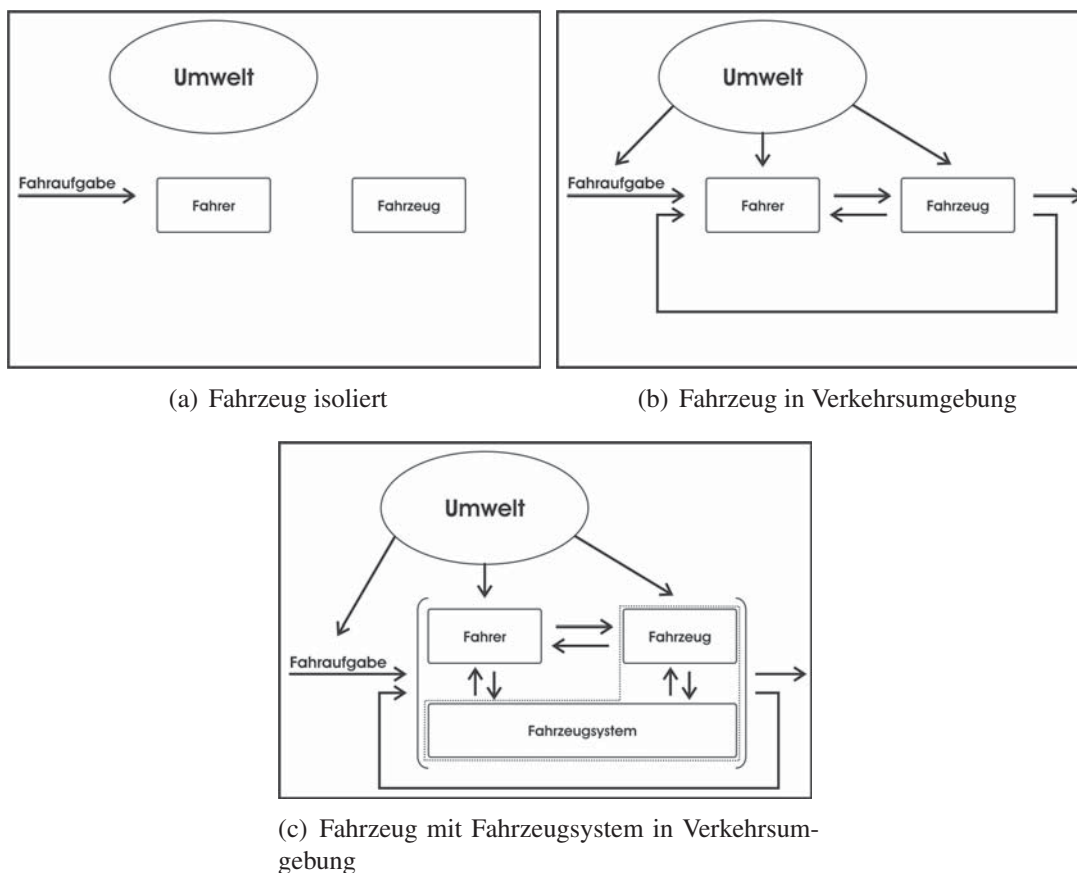


Abbildung 1.2: Veränderung der Wechselbeziehungen im Mensch-Maschine-Modell

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.

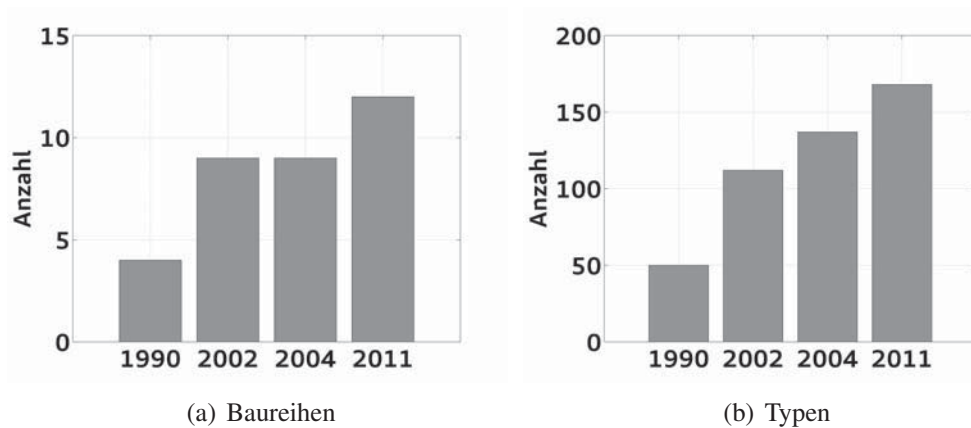


Abbildung 1.3: Steigende Anzahl von Modellvarianten

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-Test¹ (Modell und Code) oder einen Blackbox-Test² (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.

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

²„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

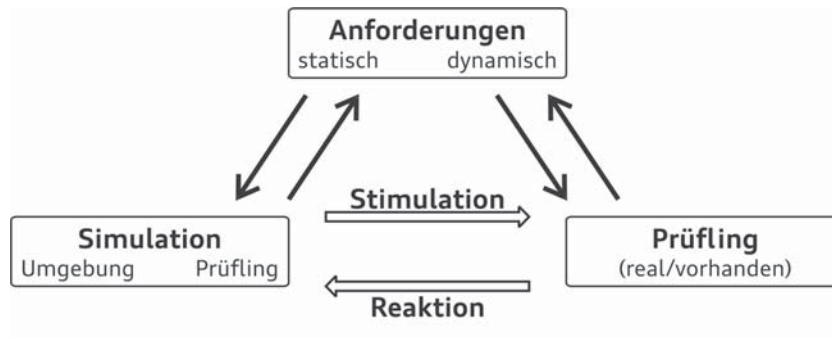


Abbildung 2.1: Erprobungsumgebung für FAS nach Schenk (2007)

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

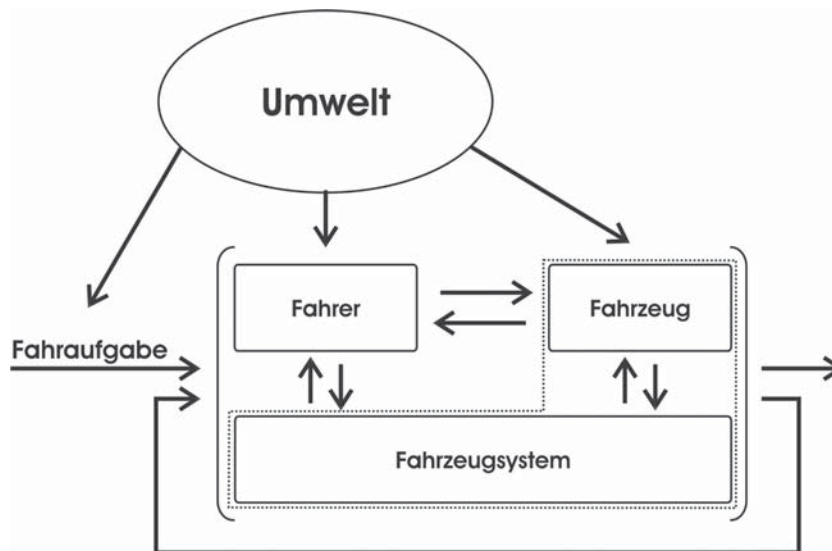


Abbildung 2.2: Struktur des Mensch-Maschine-Systems in Anlehnung an Bubb und Schmidtke (1993)

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).

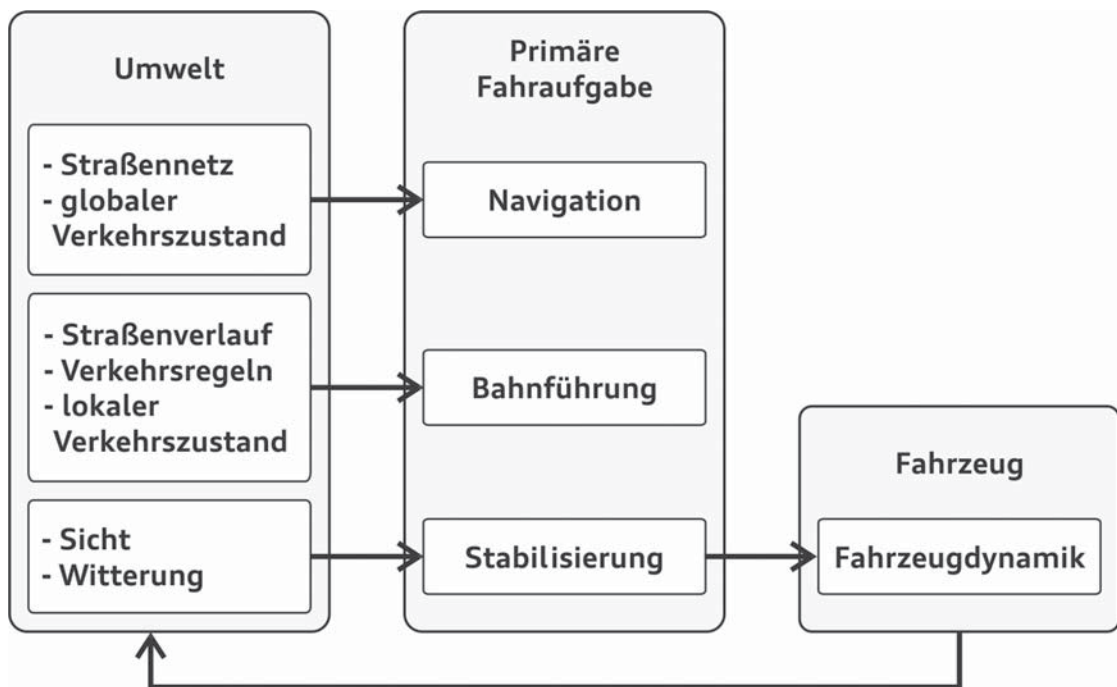


Abbildung 2.3: 3-Ebenen-Modell nach Donges

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 Umgebung; (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 Echtzeitfähigkeit³ 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-

³„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.

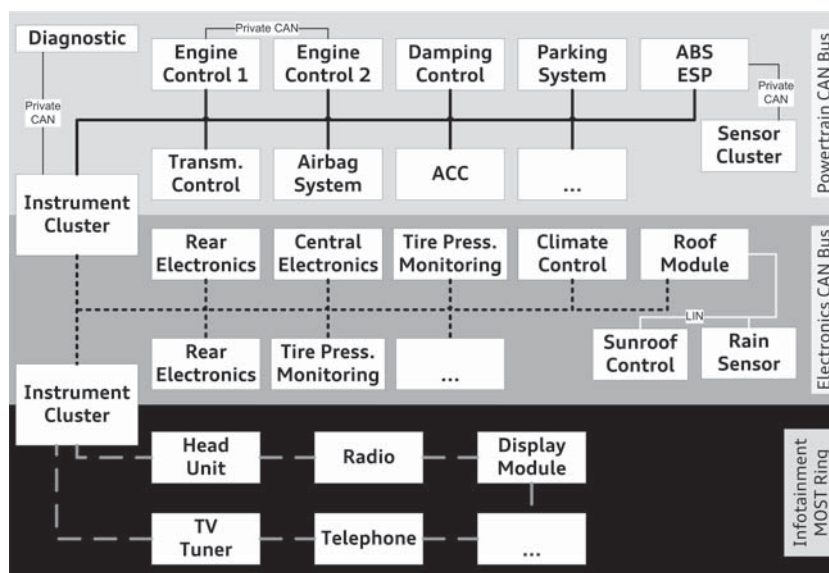


Abbildung 2.5: Steuergerätearchitektur eines Oberklassefahrzeugs

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 MicroAuto-Box 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 2.6⁴ wiedergegeben. Bei einem Software in the Loop-Prüfauf-

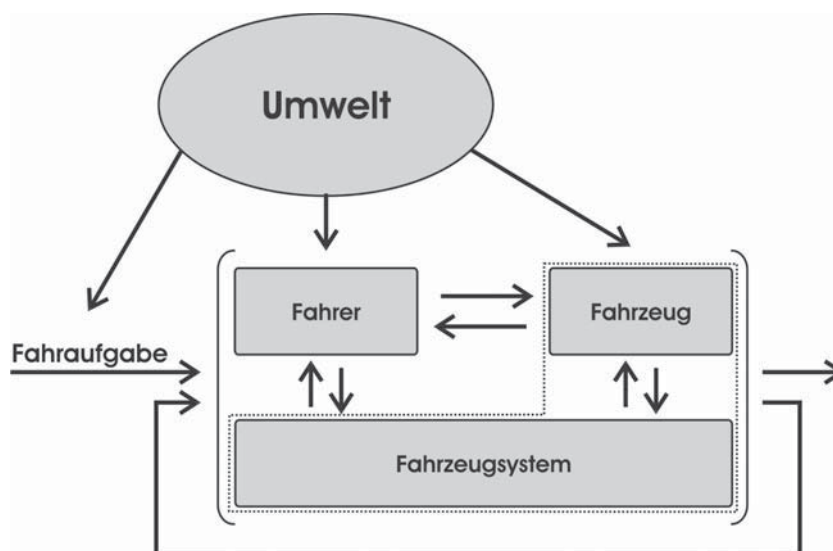


Abbildung 2.6: Funktionaler Aufbau eines Software in the Loop-Prüfaufbaus

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

⁴farbliche 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 2.7⁵ wiedergegeben. Beim Hardware in the Loop Prüfaufbau

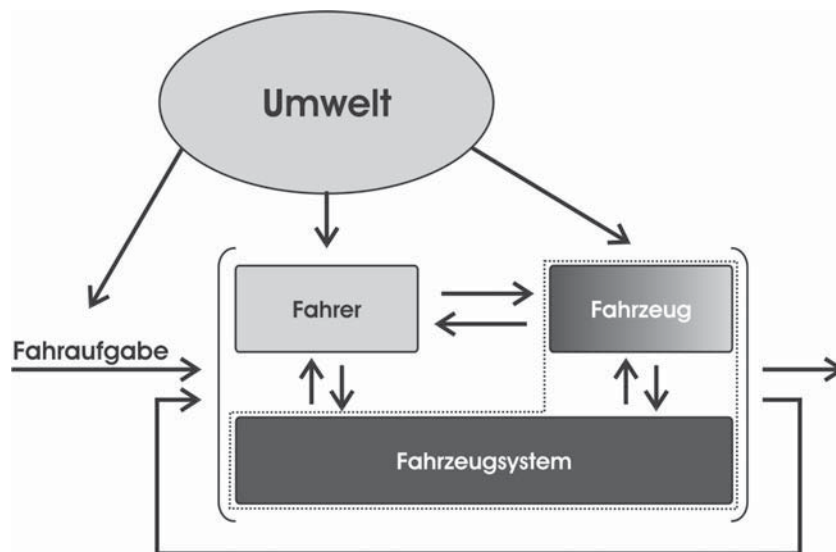


Abbildung 2.7: Funktionaler Aufbau eines Hardware in the Loop-Prüfaufbaus

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*

⁵farbliche 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 2.8⁶ 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

⁶farbliche Kodierung: grau \Rightarrow *simuliert*; schwarz \Rightarrow *real*

2.1 Test- und Simulationwerkzeuge der Fahrzeugsystem-Entwicklung

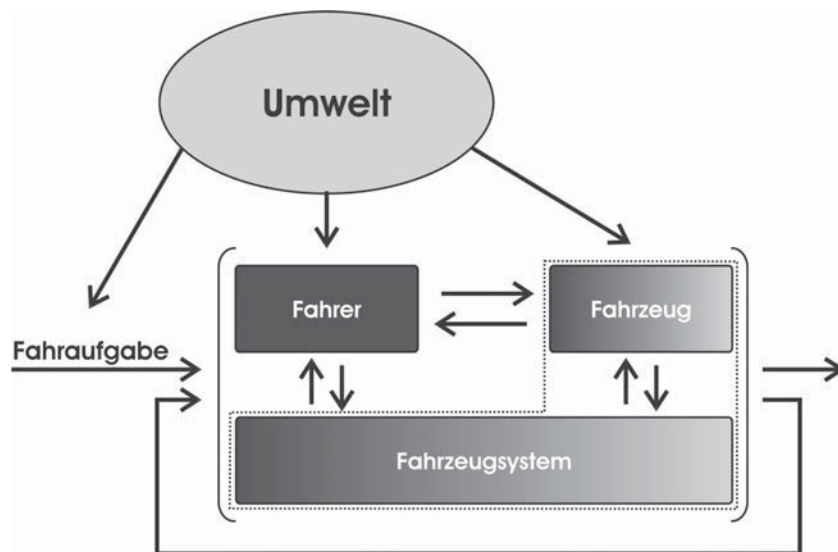


Abbildung 2.8: Funktionaler Aufbau eines Driver in the Loop-Prüfaufbaus

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 2.9⁷ zu entnehmen ist, wird lediglich der für die Fahrzeugsysteme relevante Fremdverkehr simuliert. Das *Fahrzeugsystem* ist wie in Kapitel

⁷farbliche Kodierung: grau \Rightarrow simuliert; schwarz \Rightarrow real

2 Stand der Technik in der Fahrzeugsystem-Entwicklung

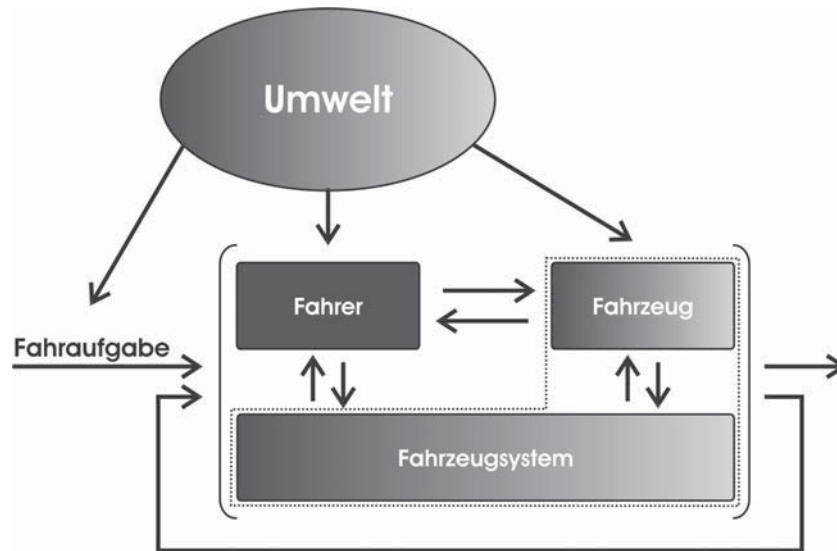


Abbildung 2.9: Funktionaler Aufbau eines Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus

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 2.10⁸ zu entnehmen. Beim Realtest können in Bezug auf das *Fahrzeugsystem* zwei Untergruppen

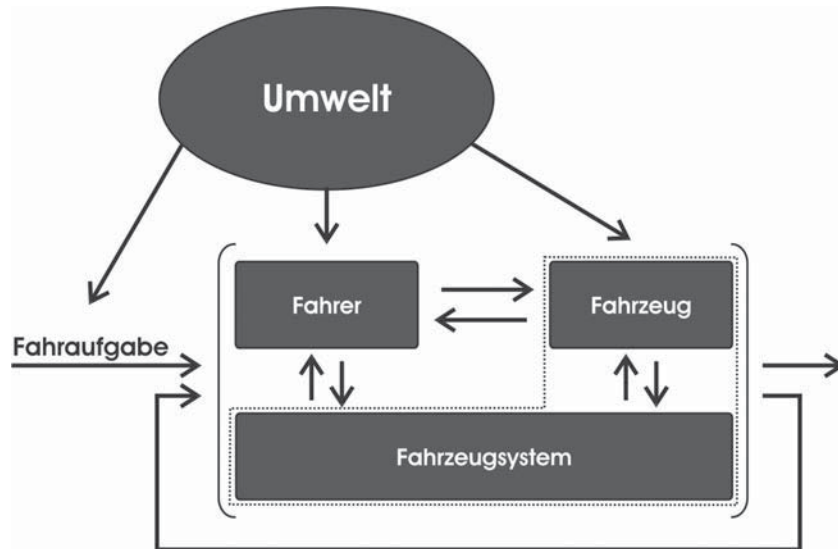


Abbildung 2.10: Funktionaler Aufbau eines Realtest-Prüfaufbaus

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.

⁸farbliche 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.

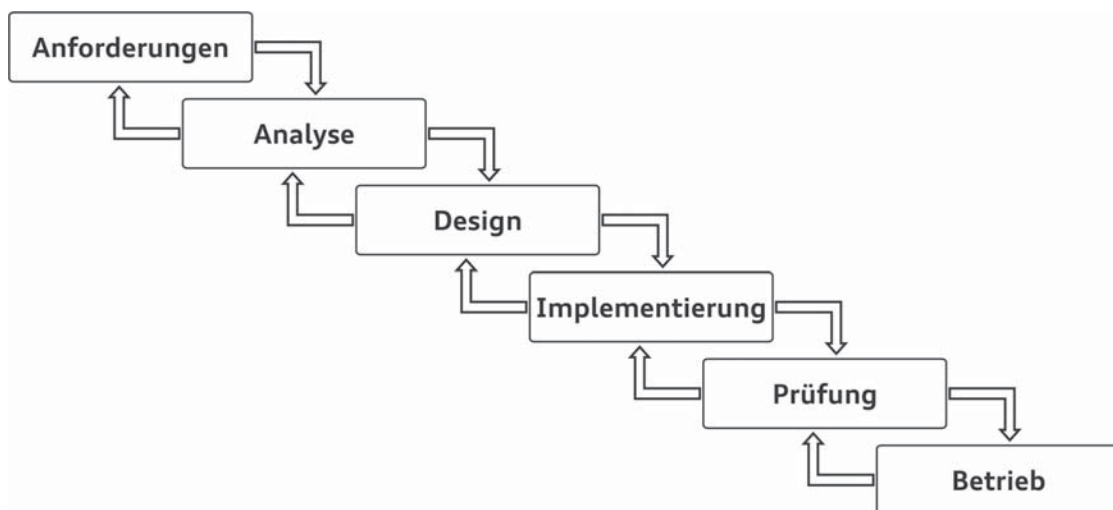


Abbildung 2.11: Wasserfallmodell nach Dr. Winston W. Royce aus Schwaiger (2008)

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-

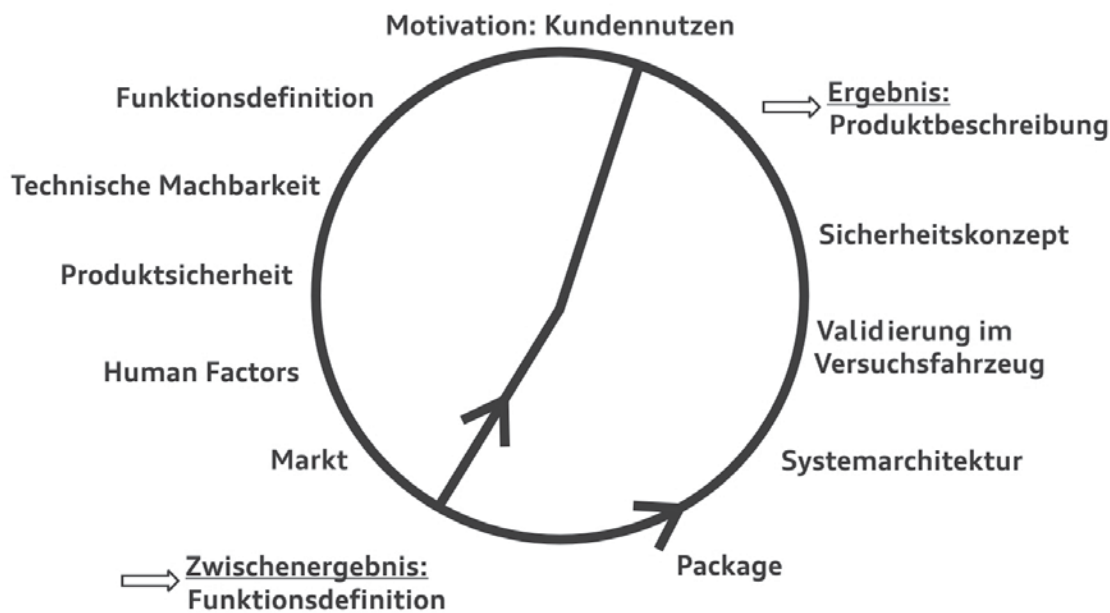


Abbildung 2.12: Systematischer Systementwurf in Forschung und Vorentwicklung

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

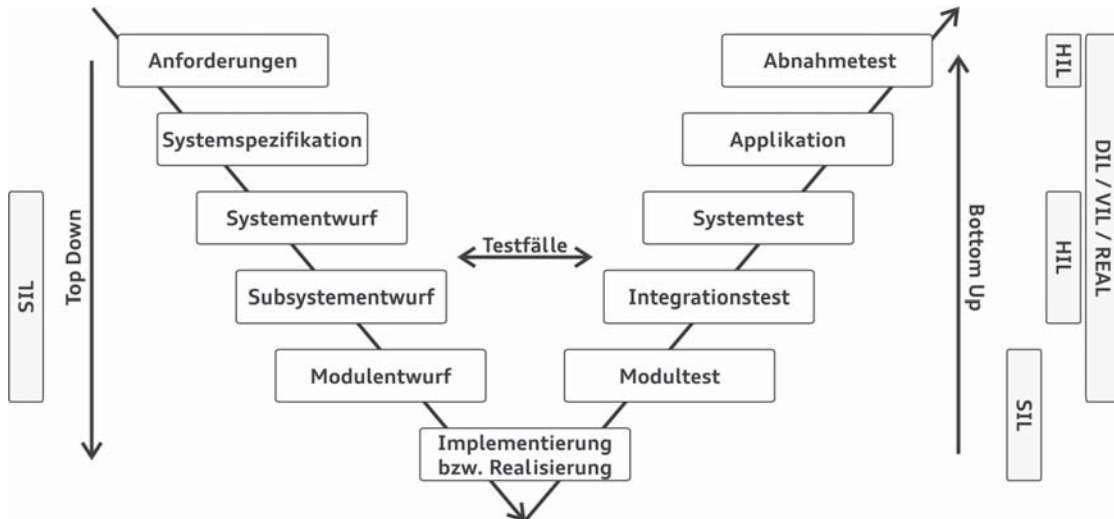


Abbildung 2.13: V-Modell zur Fahrzeugsystementwicklung

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

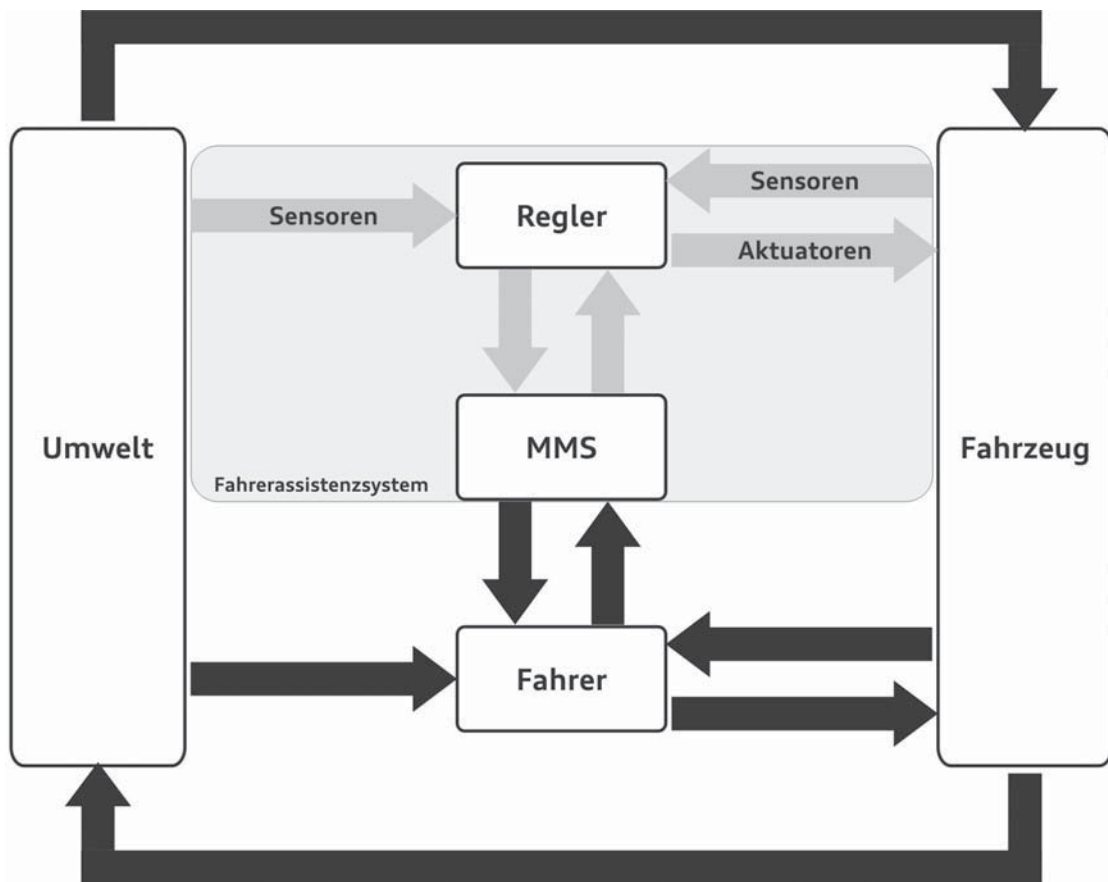


Abbildung 3.1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt mit integriertem Fahrerassistenzsystem nach Deutsche (2005)

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

Navigation:	Navigationssystem Radiodienste (RDS-TMC)
Bahnführung:	Adaptive Cruise Control (ACC) Automatische Notbremsung (ANB) Lane Departure Warning (LDW) Lane Keeping Assist (LKA) Lane Change Assist (LCA)
Stabilisierung:	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 (Radar¹) genutzt werden. Als „Primärsensoren“ kommen bei aktuellen Fahrzeugen Radar- oder Lidar²-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.

¹Radio Detection and Ranging

²Light Detection and Ranging

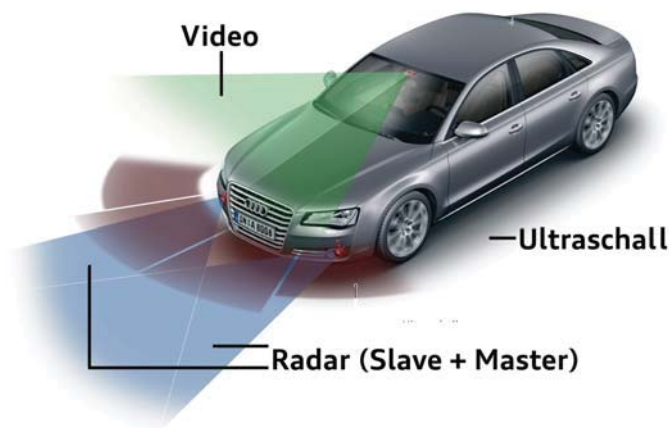


Abbildung 3.2: Umfeldsensoren für ACC im Audi A8

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 σ , 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 λ 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.

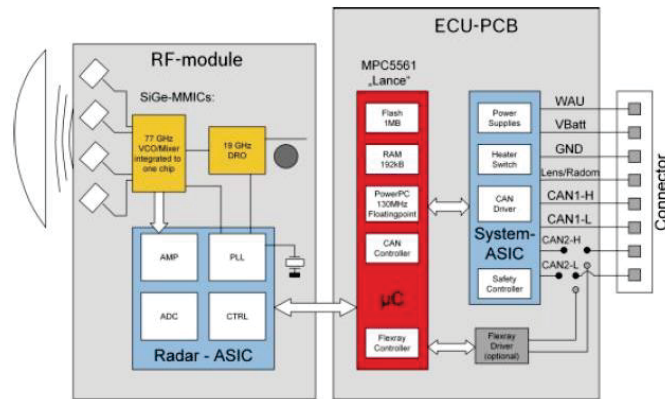


Abbildung 3.4: Blockschaltbild des LRR3 aus Lucas (2009)

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. Einscherner 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 Radomheizung³ eingesetzt.

³Radom 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 Fahr Simulator-Studie 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“⁴ 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

⁴Fahren 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-Collision⁵ (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

⁵Die Berücksichtigung der Kollisionszeit als Kriterium im Straßenverkehr hat sich bei unterschiedlichen Untersuchungen bewährt (vgl. Ehmanns 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 Risikohomöostase⁶, 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.

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