

1 Einleitung

In der Fahrzeugsicherheit wird gemäß Seiffert (1992) nach Maßnahmen unterschieden, die der *Unfallvorbeugung* oder der *Unfallfolgemilderung* dienen. Im allgemeinen Sprachgebrauch der Kraftfahrzeugtechnik haben sich die Bezeichnungen *Aktive Sicherheit* (Unfallvorbeugung) und *Passive Sicherheit* (Unfallfolgemilderung) durchgesetzt. Maßnahmen, die beide Felder tangieren, werden der *Integralen Sicherheit* zugeordnet.

Die Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen hat in der Automobilindustrie eine sehr lange Tradition. Béla Barényi patentierte zum Beispiel bereits 1943 erste konstruktive Konzepte eines Plattformrahmens für einen besseren Seitenaufprallschutz, der 1953 im Mercedes-Benz W 120 erstmals in Serie umgesetzt wurde (Daimler AG, 2015). Eine entsprechend lange Erfahrung besteht auch in der Wirksamkeitsbewertung von Maßnahmen der Passiven Sicherheit. Durch FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode) in der Entwicklung und standardisierte Crash-Versuche in der Absicherung kann die spätere Wirkung einer Sicherheitsmaßnahme auf das reale Unfallgeschehen heute bereits sehr genau prognostiziert werden. Das zugrundeliegende, standardisierte Regelwerk wird von Entwicklern und Verbraucherschützern gleichermaßen angewendet und gilt als weltweit anerkannt. Ein Beispiel ist das FMVSS-Regelwerk (Federal motor vehicle safety standards and regulations) der NHTSA (National highway traffic safety administration) (vgl. NHTSA, 1999).

Im Vergleich dazu ist die Aktive Sicherheit von Kraftfahrzeugen ein noch recht junges Themengebiet. Im Grunde kann ein breiterer Serieneinsatz mit der Einführung von Fahrwerkregelsystemen wie ABS (Antiblockiersystem) und ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) erst Ende der 1980er bis Mitte der 1990er Jahre verzeichnet werden.

Da sich das Entwicklungspotenzial von Maßnahmen der Passiven Sicherheit mit zunehmendem Fortschritt immer weiter erschöpfte, waren Ende der 1990er Jahre neue Innovationen gefragt, um im Zuge stetig steigender Verkehrsdichten die Straßenverkehrssicherheit weiterhin zu verbessern. Dies hat zur Entwicklung zahlreicher FAS (Fahrerassistenzsysteme) geführt, die im Gegensatz zu den Fahrwerkregelsystemen proaktiv und nicht nur reaktiv der Unfallvorbeugung dienen sollen. Das heißt kritische Verkehrssituationen sollen durch den Einsatz dieser Systeme idealerweise gar nicht erst entstehen. Inzwischen sind daher auch FAS der Aktiven Sicherheit wie Kollisionswarnungen, Spurwechsel- und Notbremsassistenten in den breiteren Serieneinsatz gelangt.

Aufgrund der noch recht jungen Historie dieser Systeme existieren bisher nur wenige vergleichbare und vor allem standardisierte Methoden zur Wirksamkeitsbewertung wie in der Passiven Sicherheit (siehe oben). In der Entwicklung und Absicherung seitens der Hersteller, aber auch in der Bewertung durch Verbraucherschutzorganisationen wie dem Euro NCAP (European new car assessment programme), dem IIHS (Insurance institute for highway safety) oder der NHTSA, steht nach wie vor die funktionale Sicherheit im Vordergrund. So ist die ISO 26262 (2011; Road vehicles – Functional safety) derzeit das einzige existierende Regelwerk, das für die Systementwicklung bindend ist. Gleichzeitig beschränkt sich beispielsweise der Euro NCAP in seinen Bewertungsmethoden von Kollisionsvermeidungssystemen für den Längsverkehr derzeit nur auf die AEB-Funktion (Autonomous emergency braking). Etwaige HMI-Elemente (Human-Machine-Interface) werden nur auf Vorhandensein bewertet (Euro NCAP, 2014a). Reine Kollisionswarnungen werden hingegen mit Hilfe eines Fahrroboters geprüft. Dieser simuliert nach einer *festen* Gesamtreaktionszeit von 1.200 ms (gemessen ab Ausgabe der *akustischen* Warnung) eine weg-/kraftgesteuerte Bremsreaktion, die zuvor auf einen stationären Endwert der Bremsbeschleunigung von -4 m/s^2 bei einem maximalen Gradienten des Bremspedalweges von 300 mm/s appliziert wird (Euro NCAP, 2014b). Dass dies nicht die Gesamtheit aller realen Fahrer abbildet und auch nicht abbilden soll, liegt auf der Hand. Beide Methoden sorgen im Grunde nur für eine Sicherstellung, dass die Systeme die technischen Funktionen erfüllen, für die sie entwickelt wurden.



beziehungsweise ermöglichen sie den Vergleich verschiedener Systemkonfigurationen untereinander. Die Wirkung auf das Unfallgeschehen (z.B. in Form von vermiedenen Unfällen) kann damit prospektiv nicht bewertet werden.

Die Beschränkung auf die rechtsverbindliche Bewertung der funktionalen Sicherheit liegt darin begründet, dass sich die Wirkung eines FAS auf das Unfallgeschehen aufgrund des proaktiven Systemverhaltens auch nur dann richtig prognostizieren lässt, wenn die Reaktionen von Fahrer und Verkehrs-umgebung auf die Systemfunktionen mitberücksichtigt werden. Für einen solchen Bewertungsansatz existiert derzeit noch kein standardisiertes Verfahren.

Seitens der Systementwickler und Fahrzeughersteller wurde die Wirksamkeitsbewertung bisher meist mit Hilfe von Probandenstudien im Fahrsimulator vollzogen. Der begrenzte Umfang an Probanden und die damit verbundene geringe Anzahl an durchführbaren Versuchsläufen stellen jedoch eher eine Wirksamkeitsabschätzung als eine wirkliche -bewertung dar. Zudem beschränken sich diese Untersuchungen aufgrund des recht hohen Aufwands meist auf die Phase der Vorentwicklung, sodass derzeit keine standardisierten Methoden der Wirksamkeitsbewertung für die Serienentwicklung und -absicherung existieren. Der Systemnutzen kann erst nach einer ausreichenden Felddurchdringung aus den Veränderungen der Unfallstatistiken abgelesen werden.

Ein *ganzheitlicher* Ansatz für die prospektive Wirksamkeitsbewertung von FAS der Aktiven Sicherheit ist weder beim Verbraucherschutz, noch bei den Entwicklern vorhanden. Eine mögliche Methode soll daher nachfolgend skizziert werden. Deren schematische Darstellung liefert zunächst Abbildung 1.1.

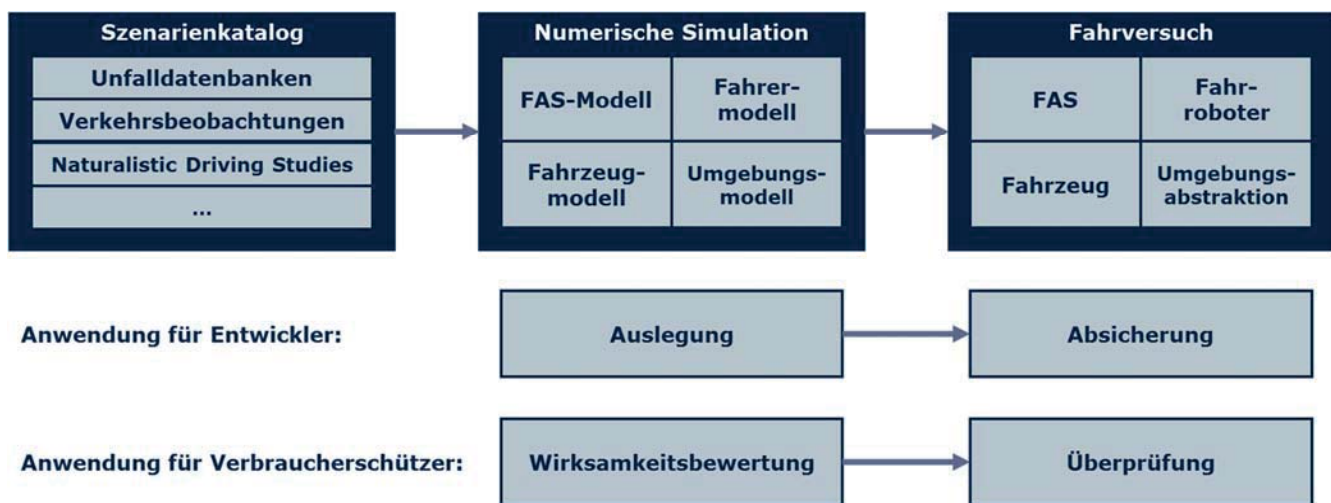


Abbildung 1.1: Skizze einer möglichen, ganzheitlichen Wirksamkeitsbewertung für Fahrerassistenzsysteme der Aktiven Sicherheit und deren Anwendungsmöglichkeiten

Der erste Schritt besteht in der Definition eines Szenarienkatalogs. Die Identifikation der Bewertungsszenarien muss anhand des realen Verkehrs- und Unfallgeschehens erfolgen. Quellen hierfür können Unfalldatenbanken, Verkehrsbeobachtungen und *Naturalistic Driving Studies* sein. Die Erstellung und die fortlaufende Pflege dieses Szenarienkatalogs ist ein elementarer Bestandteil einer ganzheitlichen Bewertungsmethode der Aktiven Sicherheit, um stets den Bezug zum realen, sich verändernden Verkehrsgeschehen zu wahren. Dies soll jedoch nicht Gegenstand der folgenden Betrachtungen sein.

Ein ganzheitlicher Bewertungsansatz verlangt, dass neben dem zu analysierenden FAS alle beteiligten Verkehrselemente zu betrachten sind, die durch den Einsatz dieses Systems beeinflusst werden. Bei einer systemzentrierten Sicht (es wird die punktuelle Wirkung eines einzelnen FAS und nicht die Wirkung einer FAS-Population betrachtet) betrifft dies das (Ego-)Fahrzeug als Träger des FAS, den assistierten Fahrer und die Umgebung inklusive anderer Verkehrsteilnehmer.

Für die Durchführung einer Wirksamkeitsbewertung sind prinzipiell drei Methoden denkbar:

1. Numerische Simulation
2. Probandenstudie im Fahrsimulator
3. Fahrversuch mit dem realen Fahrzeug

Die Reihenfolge ist hierbei nicht zufällig gewählt, da sie dem gängigen Methodeneinsatz entlang des Fahrzeugentwicklungsprozesses entspricht. In der frühen Entwicklungsphase bietet der Einsatz von simulativen Werkzeugen meist die einzige Möglichkeit der Evaluierung, da noch keine Prototypen für Versuche zur Verfügung stehen. Wie bereits erwähnt, wurden hierfür im Kontext der Wirksamkeitsbewertung von FAS bisher vor allem Fahrsimulatorstudien genutzt, deren Nachteile oben bereits aufgezeigt wurden. In den vergangenen Jahren kamen daher zunehmend auch numerische Simulationsmethoden zum Einsatz. Allerdings beschränkten sich diese überwiegend auf Bewertungsansätze, bei denen einzelne Situationen aus Unfalldatenbanken simuliert werden und der in *diesen* konkreten Situationen erreichbare Sicherheitsgewinn durch ein FAS bewertet wird (Busch, 2004; Methodik des Werkzeugs *rateEFFECT* des VW-Konzerns, vgl. Wille und Zatloukal, 2012). Fahrversuche mit dem realen Fahrzeug sind entsprechend erst in der Absicherungsphase möglich und beschränken sich heute auf Aspekte der funktionalen Sicherheit (siehe oben). Reale Fahrer kommen hier aus ethischen und gesundheitsgefährdenden Gründen in der Regel nicht zum Einsatz.

Ein stärkerer Einsatz rein numerischer und vor allem stochastischer Simulationsmethoden weist demnach einige Vorteile auf. In der frühen Entwicklungsphase lässt sich der Betrachtungshorizont einer Simulatorstudie massiv erweitern. Das betrifft nicht nur den Umfang der zu untersuchenden Szenarien und der für die Auswertung verfügbaren Versuchsläufe, sondern auch die Analysemöglichkeit der Interaktionen mehrerer Verkehrsteilnehmer. Gleichzeitig lässt sich der Aufwand im Vergleich zu einer Probandenstudie extrem reduzieren. Eine derartige Evaluierung während der Entwicklung liefert zugleich auch die systemkritischen Fälle, die wiederum als Grundlage für eine gezielte Absicherung auf der Gesamtfahrzeugebene dienen können. Unter systemkritischen Fällen sind hierbei die Situationen zu verstehen, in denen das FAS laut Simulation den größten Sicherheitsgewinn erzielt. Diese Prognose muss in der Absicherung zwingend an der realen Hard- und Software überprüft werden. Simulatorstudien wären in diesem integralen Ansatz dann nur noch für die Validierung der Verhaltensmodelle notwendig.

Dieses Vorgehen ist unabhängig vom Entwicklungsstand des FAS anwendbar. Es ist demnach auch denkbar, dass die Wirksamkeit eines Systems im Serieneinsatz durch Verbraucherschützer nach demselben Vorgehen bewertet werden kann:

1. Bewertung der Wirksamkeit in der Simulation
2. Überprüfung der kritischen Fälle am realen Fahrzeug

Abgesehen vom Szenarienkatalog ist bei den genannten Teilsystemen der Testszenarien auf simulativer Ebene der Bereich des Fahrerverhaltens als größte Lücke zu identifizieren, um eine solche Bewertungsmethodik direkt umzusetzen. Dies soll nachfolgend anhand des Stands der Forschung zur numerischen Fahrerverhaltensmodellierung verdeutlicht werden.



1.1 Stand der Forschung zur numerischen Fahrerverhaltensmodellierung

Auf dem Gebiet der numerischen Fahrerverhaltensmodellierung lassen sich nach Bellet, et al. (2007) zunächst zwei grundlegende Kategorien von Modellansätzen unterscheiden.

Die erste Kategorie kann als *predictive models* bezeichnet werden und charakterisiert sich durch die Nachbildung menschlichen Verhaltens auf Grundlage empirischer Beobachtungen. Diese Modelle bilden somit das menschliche Verhalten direkt ab und simulieren nicht die Prozesse, die dieses begründen. Sie erlauben einfachere Modellstrukturen und Modellierungsansätze, sind rechenzeiteffizienter und lassen sich in der Regel auch besser validieren.

Die zweite Kategorie kann als *explicative models* bezeichnet werden und charakterisiert sich durch die Abbildung kognitiver Prozesse und Zustände des Fahrers. Diese Modelle simulieren somit die Vorgänge, die menschliches Verhalten erzeugen. Sie können somit zwar auch als *predictive models* verwendet werden, dienen aber eher dem Verständnis menschlichen Verhaltens und nicht dessen Prädiktion. Dies erfordert zumeist die Verwendung kognitiver Architekturen¹, was in der Regel sehr komplexe Modellstrukturen zur Folge hat. Beispiele für *explicative models* sind:

- ACT-R integrated driver model (Adaptive control of thought – rational; Salvucci, 2006)
- SOAR DRIVER (State, operator and result; Aasman, 1995)
- COSMODRIVE (Cognitive simulation model of the driver; Bellet, et al., 2007)
- QN-MHP Driver Model (Queuing network – model human processor; Liu, et al., 2006)

Explicative models bilden menschliches Verhalten über ein weites Einsatzfeld hinweg ab. Die komplexen Modellstrukturen sind jedoch meist rechenzeitintensiv und nur schwer parametrierbeziehungsweise validierbar (Krajewicz, 2005). Aus Sicht der Anforderungen für den Einsatz als transparentes und leicht verständliches Bewertungswerkzeug ist die Kategorie der *explicative models* somit ungeeignet. Von daher beschränken sich die Ausführungen dieses Kapitels auf Fahrerverhaltensmodelle, die sich in die Kategorie der *predictive models* einordnen lassen.

Da diese Modellkategorie vor allem aus dem Bereich der Verkehrssimulation hervorgeht, bietet sich eine weiterführende Kategorisierung nach dem Abstraktionsgrad des zu simulierenden Verkehrsszenarios an. Innerhalb dieser Kategorisierung wird mit zunehmender Detailierung die Anzahl der simulierbaren Fahrer-Fahrzeug-Einheiten im Verkehrsfluss aufgrund der Rechenzeitanforderungen immer geringer. Die nachfolgend eingeführten Definitionen sind mit den Einteilungen von Diekamp (1995) und Krauß (1998) vergleichbar:

- *Makroskopische Modelle* dienen zur Ermittlung des Verkehrsaufkommens auf einem simulierten Straßennetz, ohne dabei zwingend einzelne Fahrzeuge abzubilden, indem sie beispielsweise Ansätze aus der Gaskinetik und Fluidodynamik nutzen.
- *Mesoskopische Modelle* betrachten detaillierte Verkehrsströme durch die Abbildung einzelner Fahrzeuge, wobei der Abstraktionsgrad der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten meist sehr groß ist (z.B. Punktmassen und einfache Regelalgorithmen für Längs- und Querführung).
- *Mikroskopische Modelle* bilden einzelne Aspekte innerhalb der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten stärker detailliert ab, um bestimmte Fragestellungen zu adressieren (z.B. Detailmodelle einzelner Fahrzeugkomponenten).

¹ Kognitive Architekturen beschreiben die menschliche Signalverarbeitung meist in Analogie zu einem Digitalrechner. Sie bieten Unterscheidungsmöglichkeiten der Gedächtnisleistung (Ultraschallzeit-, Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis), die sich mit Speichermodulen (Cache, Arbeitsspeicher und Festplatte) vergleichen lassen. Dies ermöglicht oftmals auch das Vergessen von Informationen. Die Informationsverarbeitung erfolgt durch eine zentrale Einheit, vergleichbar mit einer CPU.

Aus Sicht der Wirksamkeitsbewertung von FAS der Aktiven Sicherheit mit all ihren Wirkketten im System *Fahrer-Fahrzeug-Umwelt* sind demzufolge Modelle der mikroskopischen oder zumindest der mesoskopischen Ebene notwendig. Nachfolgend wird zunächst ein kurzer Überblick zur Historie der Fahrerhaltensmodellierung im Bereich der Kraftfahrzeugtechnik gegeben. Anschließend werden ausgewählte Fahrerhaltensmodelle zur mikroskopischen oder mesoskopischen Verkehrssimulation vorgestellt, die in der Literatur gut dokumentiert sind.

1.1.1 Fahrerhaltensmodelle der Kraftfahrzeugtechnik

Da die Entwicklungen der Kraftfahrzeugtechnik erst seit Ende der 1990er verstärkt Wirkketten im Gesamtsystem *Fahrer-Fahrzeug-Umwelt* adressieren, ist auch die Fahrerhaltensmodellierung in diesem Fachbereich vor allem durch Fragestellungen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion begründet. Die meisten Modelle wurden ursprünglich als Fahrdynamikregelmodelle zur Führung von Fahrzeugmodellen auf virtuellen Teststrecken entwickelt. Ein Beispiel hierfür ist das Fahrerhaltensmodell von Prokop (2001), das für die optimale Bahnplanung (vgl. Kapitel 2.1.2) nach verschiedenen Kriterien der Fahrzeugführung entwickelt wurde (z.B. *beschleunigungsminimal* für maximalen Komfort oder *wegoptimal* für minimale Reisezeit). Der Ansatz besteht in der Vektoroptimierung der formalisierten Kriterien anhand eines internen Fahrzeug-Straßen-Modells über einen bestimmten Vorausschauweg. Ein weiteres Beispiel ist das Fahrerhaltensmodell von Henze (2004), das für die Fahrdynamik-objektivierung von Kraftfahrzeugen entwickelt wurde. Der Ansatz besteht darin, die Parameter der Querdynamikregelung zu optimieren, sodass das Verhalten des Systems *Fahrer-Fahrzeug* konstant bleibt. Die optimierten Regelparameter werden dann einer Bewertung unterzogen. Beide Fahrermodelle sind nicht in der Lage, mit Elementen des Umgebungsverkehrs oder zusätzlichen Systemen des Egofahrzeugs zu interagieren, da dies nicht Gegenstand der Entwicklung war.

Die Historien vieler kommerzieller Fahrerhaltensmodelle in der Automobilindustrie haben ähnliche Ursprünge. Der Fokus der Weiterentwicklung lag oftmals auf Fahrzeugführung nach möglichst menschlichen Gesichtspunkten. Der VI-Driver der VI-grade GmbH beschränkt sich beispielsweise bis heute auf reine Fahrdynamiksimulationen (VI-grade GmbH, 2015). Die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern oder FAS der Aktiven Sicherheit sind Fragestellungen, die erst in den vergangenen Jahren relevant geworden sind. Einige kommerzielle Fahrerhaltensmodelle folgen diesem Trend. Ein Beispiel hierfür ist der IPGDriver der IPG Automotive GmbH. Neben der klassischen Fahrdynamiksimulation wurde das Fahrerhaltensmodell inzwischen hinsichtlich vieler Alltagsszenarien des *normalen* Straßenverkehrs weiterentwickelt. Bis 2010 wurde der IPGDriver von den Entwicklern auch publiziert. Den Veröffentlichungen lässt sich entnehmen, dass das Fahrerhaltensmodell keine validierte Wahrnehmungs- oder Entscheidungsmechanismen enthält. Auch komplexe Interaktionen mit FAS der Aktiven Sicherheit sind nicht möglich (Wurster und Schick, 2010). Der aktuellen Produktbeschreibung sind keine belegbaren Ansätze zu entnehmen, die auf eine wissenschaftlich fundierte Weiterentwicklung in Bezug auf die Verhaltenssimulation in kritischen Situationen oder die Interaktion mit FAS schließen lassen. Auch stochastische Ansätze zur Simulation einer ganzen Fahrerpopulation sind nicht vorhanden (IPG Automotive GmbH, 2016). Aus diesen Gründen kann selbst der IPGDriver als eines der komplexesten, kommerziellen Fahrerhaltensmodelle nicht als geeignet für die formulierte Fragestellung betrachtet werden.

1.1.2 PELOPS

PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) ist eine fahrzeugorientierte Verkehrsflusssimulation, die Anfang der 1990er Jahre von der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) und der BMW AG entwickelt wurde (Ludmann, 1989; Diekamp, 1995). Das darin enthaltene Fahrerhaltensmodell zur Steuerung der einzelnen Fahrzeuge besteht aus den beiden Teilen *Verhaltensmodell* und *Hand-*

lungsmo~~del~~l, wie Abbildung 1.2 veranschaulicht. Entgegen der Produktbezeichnung lässt sich dieses Fahrerverhaltensmodell eher in die Kategorie der mesoskopischen Modelle einordnen.

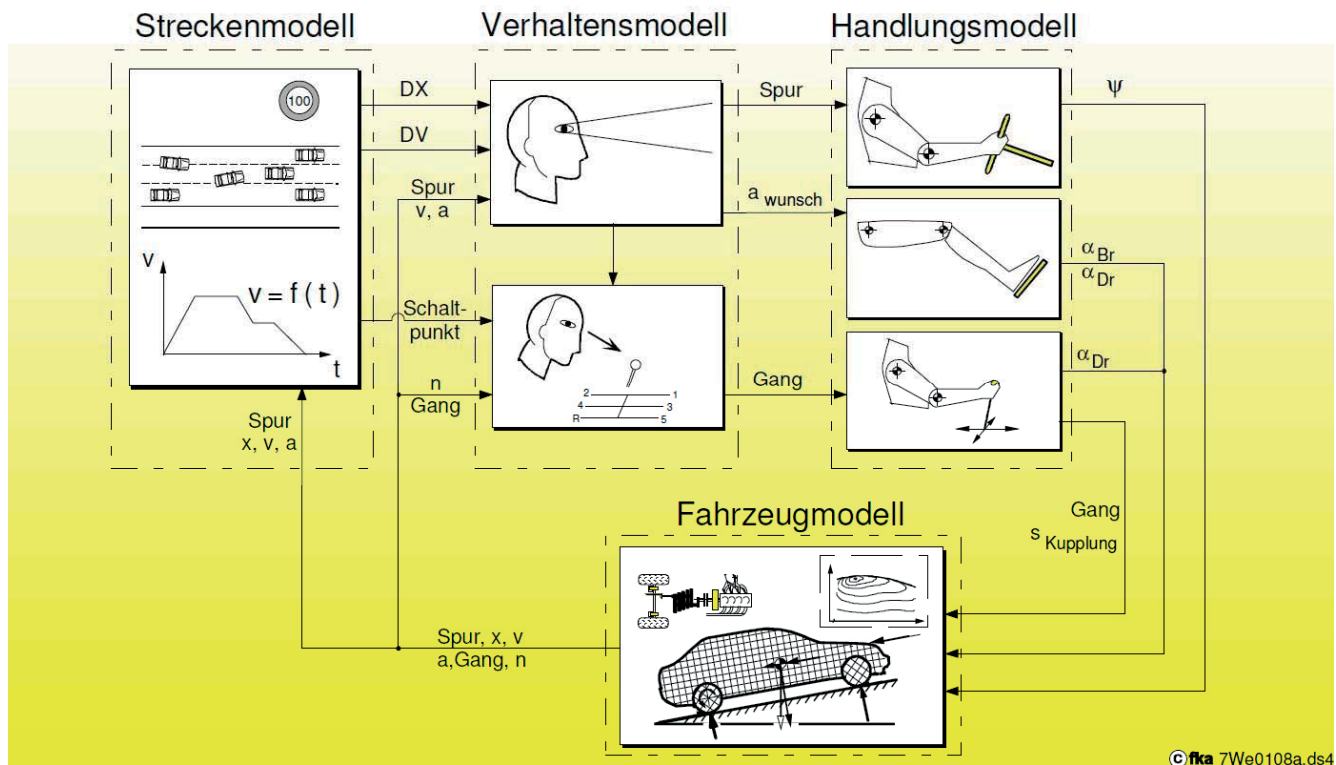


Abbildung 1.2: Schema des Fahrerverhaltensmodells und dessen Umgebung in PELOPS (Christen und Huang, 2008)

Das *Verhaltensmodell* bildet aufgrund der aktuellen Verkehrssituation und der Fahrstrategie des Fahrers Beschleunigungs- und Spurwechselintentionen (siehe unten), die durch das *Handlungsmodell* an den Bedienelementen des Fahrzeugs in diskrete Fahrmanöver umgesetzt werden. Die Informationsaufnahme erfolgt rein maschinell. Das heißt eine Blickbewegung oder die Modellierung sensorischer Modalitäten des Fahrers (vgl. Kapitel 2.3) sind nicht vorhanden, sodass sämtliche Umgebungsinformationen permanent und in absoluter Form (Abstände, Geschwindigkeiten) wahrgenommen werden. Das *Verhaltensmodell* nutzt für Längs- und Querführung jeweils separate Modellansätze, die verkehrsabhängig untereinander gekoppelt sind. Es ist jedoch auch möglich, einzelnen Fahrzeugen feste Trajektorien vorzugeben. (Christen und Huang, 2008)

Das longitudinale Folgeverhalten wurde gemäß dem Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann (1974) implementiert, stetig angepasst und erweitert. Die laterale Fahrzeugführung erfolgt mit Hilfe eines taktischen Spurwechselmodells nach Ehmanns (2002), das auf der Berechnung und Auswertung von Zufriedenheitswerten für alle verfügbaren Fahrspuren beruht. Die motivationale Grundlage für diese Zufriedenheitswerte ist überwiegend geschwindigkeitsbedingt. Das heißt das Modell ermittelt die verkehrsbedingten Abweichungen von der Wunschgeschwindigkeit über der Zeit und wählt die Fahrspur entsprechend der geringsten Beeinträchtigung. Das Modellverhalten wird zudem durch fahrerindividuelle Parameter gemäß Tabelle 1.1 beeinflusst.

Tabelle 1.1: Fahrerparameter in PELOPS (nach fka, 2014; Kategorisierung selbst gewählt)

Fahrzeuginteraktion	Umgebungsinteraktion	Fahrereigenschaften	Reaktionszeiten
Wunschgeschwindigkeit	Befolgungsgrad von Geschwindigkeitsbegrenzungen	Sicherheitsbedürfnis	Normale Reaktionszeit
Maximal mögliche Verzögerung	Befolgungsgrad von Überholverböten	Schätzvermögen	Bremsreaktionszeit
Ausnutzung der Fahrzeugbeschleunigung	Präferenzspur auf mehrspurigen Straßen	Tagesschwankungen	Spurwechselreaktionszeit
Gaspedalsensibilität			Anfahrreaktionszeit
Maximale Fußbremskraft			

Durch Manipulation dieser Verhaltensparameter lassen sich verschiedene Fahrertypen abbilden. Laut Christen und Huang (2008) wurde von Weilkes (2000) ein validierter Datensatz statistischer Verteilungen für die Abbildung mehrerer hundert Standardfahrertypen ermittelt. Die dimensionslosen Verhaltensparameter der *Fahrereigenschaften* in Tabelle 1.1 werden jedoch laut fka (2014) für die gesamte Fahrerpopulation als normalverteilt um einen Mittelwert von 0,5 *angenommen*.

Der Ansatz einer mesoskopischen Verkehrsflusssimulation zur Untersuchung der Verkehrssicherheit ist zunächst als zielführend zu bewerten. Betrachtungen im Bereich extremer Verhaltensweisen wurden mit PELOPS dahingehend auch bereits von Maag, et al. (2003) durchgeführt. Insgesamt ist die Entwicklungsgrundlage des Fahrerverhaltensmodells jedoch als sehr ingenieurstechnisch zu betrachten, sodass relevante Wirkketten, die sich beispielsweise aus der visuellen Wahrnehmung ergeben, gar nicht berücksichtigt werden können. Dazu zählt vor allem die selektive Informationsaufnahme durch die Blickbewegung, aber auch die indirekte Wahrnehmung von Abständen und Geschwindigkeiten (vgl. Kapitel 2.3). Durch künstliche Skalierungsfaktoren wie einem *Schätzvermögen* (die zudem nicht validiert sind), wird versucht, dem ingenieurstechnischen Modellansatz eine menschliche Verhaltensweise aufzuprägen, was im Rahmen von Normalfahrsituationen zweifelsohne auch ausreichend ist. Für eine detaillierte Betrachtung des Fahrerverhaltens in der Gefährdungs- und Pre-Crash-Phase unter dem Einfluss von FAS der Aktiven Sicherheit ist diese Fahrerverhaltensmodell jedoch als ungenügend zu bewerten, zumal die Interaktion mit eben diesen FAS nicht vorgesehen ist.

1.1.3 ACME Driver

Der ACME Driver (*A common mental environment*) ist eine Eigenentwicklung des Instituts für Verkehrsforschung (IVF) am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Er wurde für die mikroskopische Simulation von Verkehrsszenarien mit einigen Fahrzeugen bei guten Wetter- und Sichtbedingungen entwickelt. Besonderer Wert wurde auf die integrale Simulation der Längs- und Querführung gelegt. Die Modellstruktur setzt sich aus den drei Teilmodellen *Sensoren*, *Verarbeitungsinstanz* und *Körper* zusammen, wie Abbildung 1.3 veranschaulicht.

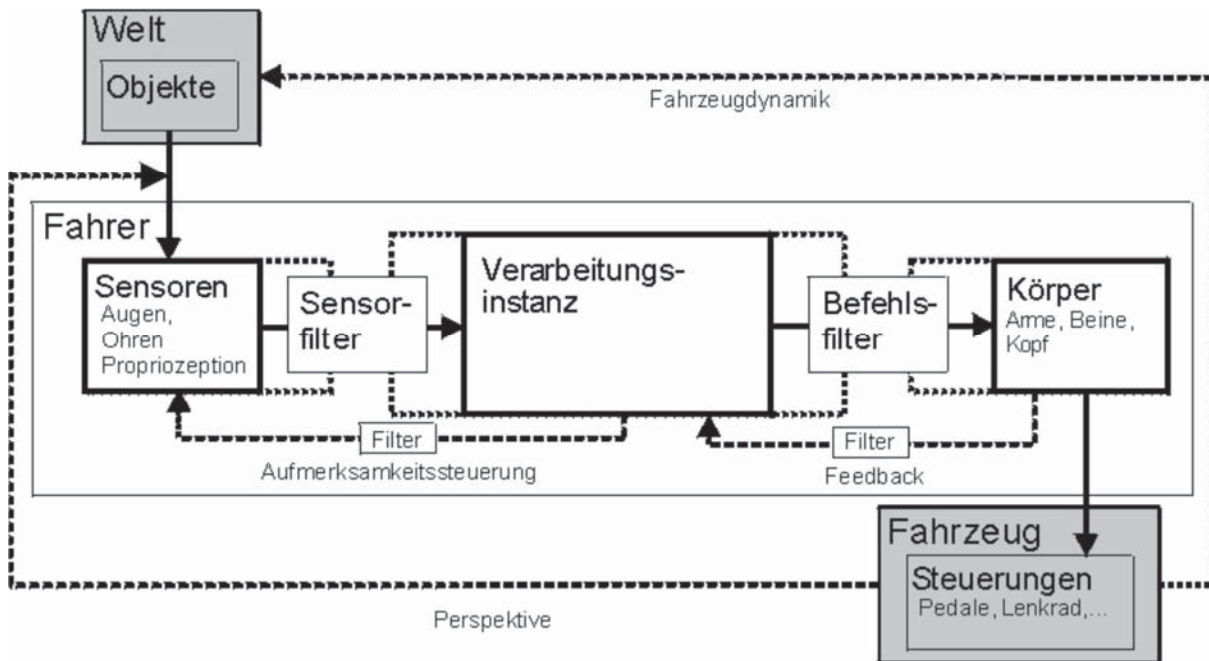


Abbildung 1.3: Schema des ACME Drivers und dessen Umgebung (Krajzewicz, 2005)

Im Teilmodell *Sensoren* werden die visuelle und die auditive Wahrnehmung des Fahrers modelliert, wobei Krajzewicz und Wagner (2002) und Krajzewicz (2005) nur auf die Modellierung des visuellen Sinneskanals eingehen. Dieser umfasst nicht näher spezifizierte Mechanismen zur Erkennung der Sichtbarkeit von Objekten und zur Bewertung von deren Wahrnehmungsgüte. Laut Krajzewicz und Wagner (2002) kommen hierfür beispielsweise Farbkontrastanalysen der Verkehrsumgebung zum Einsatz. Objekte, deren Wahrnehmungsgüte einen bestimmten Schwellwert überschreitet, werden in ein mentales Umgebungsmodell eingebettet, das im Teilmodell *Verarbeitungsinstanz* implementiert ist. Dieses mentale Umgebungsmodell führt zudem eine Verhaltensprognose für die wahrgenommenen Objekte durch und weist ihnen dementsprechend für die Fahrzeugführung bedeutende Rollen zu. Basierend auf den Inhalten des mentalen Umgebungsmodells und der gewünschten Eigentrajektorie werden im Teilmodell *Verarbeitungsinstanz* verschiedene Aktionen gemäß dem Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges geplant (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Umsetzung dieser Aktionen erfolgt unter der Berücksichtigung biomechanischer Randbedingungen im Teilmodell *Körper*, das mit Hilfe simulierter Extremitäten die Bedienelemente des Fahrzeugs steuert. Neben diesem sequentiellen Ablauf verfügt das Modell gemäß Abbildung 1.3 auch über verschiedene Rückkopplungen zwischen den drei Teilmodellen. So sorgt beispielsweise eine Aufmerksamkeitssteuerung innerhalb des mentalen Umgebungsmodells für eine Beeinflussung des Blickverhaltens. (Krajzewicz, 2005)

Die Modellbeschreibung von Krajzewicz und Wagner (2002) gibt weitere Details zu den einzelnen Teilmodellen, die den ACME Driver zunächst als vielversprechenden Ansatz für die Anforderungen einer mikroskopischen Wirksamkeitsbewertung von FAS der Aktiven Sicherheit erscheinen lassen. Jedoch wurde die Interaktion mit derartigen FAS in den bisherigen Entwicklungen nicht betrachtet, da zunächst nur das unbeeinflusste Fahrerverhalten im Vordergrund stand. Zudem bleibt die Frage nach der Variabilität des Fahrerverhaltens offen. Des Weiteren geben Krajzewicz und Wagner (2002) an, dass die Validierung des Modells nicht abgeschlossen ist.

Nach 2005 wurde das Modell seitens des DLR nicht weiter publiziert. Der bis durch Krajzewicz (2005) dokumentierte Entwicklungsstand ist aus den genannten Gründen somit als ungenügend für die Betrachtung des Fahrerverhaltens in der Gefährdungs- und Pre-Crash-Phase unter dem Einfluss von FAS der Aktiven Sicherheit zu bewerten.

1.1.4 SSDRIVE / SiMUD

SSDRIVE (Simple simulation of driver performance) wurde als Werkzeug für die mesoskopische Simulation der menschlichen Entscheidungsfindung und für die Fehlerprädiktion in echtzeitfähigen Fahrzeuganwendungen entwickelt. Neben dem *Fahrer* enthält es Modelle von *Umgebung* und *Egofahrzeug*, die über einen *Simulationsmanager* miteinander verbunden sind. Die beiden Umweltmodelle sind dabei selbst Teile des Prädiktionsalgorithmus und repräsentieren mentale Modellvorstellungen des Fahrers. Cacciabue und Carsten (2010) bezeichnen dies als verbundenes, kognitives System DVE (Driver-Vehicle-Environment). Die Struktur des DVE in SSDRIVE zeigt Abbildung 1.4.

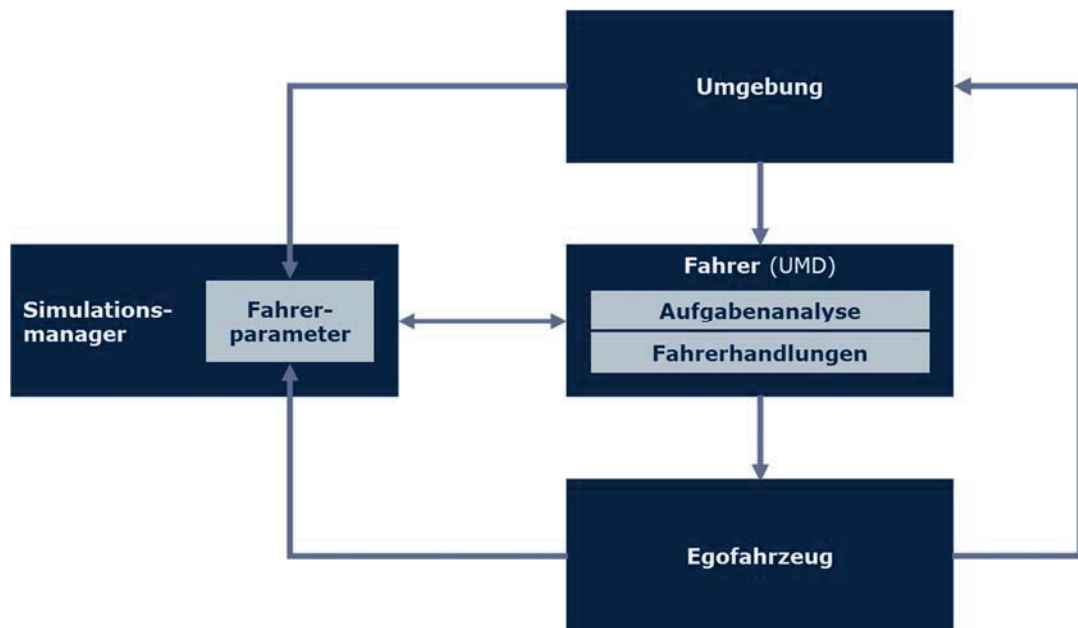


Abbildung 1.4: Aufbau des verbundenen kognitiven Systems in SSDRIVE / SiMUD (nach Cacciabue und Carsten, 2010)

Später wurde die Architektur weiterentwickelt und generalisiert, um nicht nur das Verhalten von Kraftfahrzeugführern, sondern auch das von Zug- und Bootsführern zu simulieren. Das Werkzeug wurde daher in SiMUD (Simulation of model of universal driver) umbenannt und die Komponente *Fahrer* erhielt die Bezeichnung UMD (Unified model of driver behaviour). (Cacciabue, et al., 2013)

Das UMD selbst besteht aus den beiden Teilmodellen *Aufgabenanalyse* und *Fahrerhandlungen*, wobei die Beeinflussung des generellen Fahrerverhaltens mit Hilfe von *Fahrerparametern* erfolgt, die Teil des *Simulationsmanagers* sind. Die *Fahrerparameter* unterscheiden sich in Bezug auf die Simulationszeit nach konstanten Parametern (*Erfahrung* und *Persönlichkeit*) und veränderlichen Parametern (*Beanspruchung*, *Beeinträchtigung* und *Situationsbewusstsein*) und werden wiederum durch Fahrervariablen beeinflusst (z.B. *Kilometerleistung pro Jahr* bei *Erfahrung* oder *Dauer der Fahrt* bei *Beeinträchtigung*). Die Informationsaufnahme erfolgt rein maschinell ohne die Modellierung von Blickbewegungen und sensorischen Modalitäten des Fahrers (vgl. Kapitel 2.3). (Cacciabue und Carsten, 2010)



Das Teilmodell *Aufgabenanalyse* beinhaltet ein Regelwerk verschiedener Tätigkeiten, die jeweils durch eine Reihe von Funktionen beschrieben werden. Eine *Aufgabe* wird durch bestimmte Bedingungen initiiert und durch die Erfüllung eines Ziels abgeschlossen. Dabei werden zwei Arten unterschieden:

- *Permanente Aufgaben* sind fertigkeitbasierte Tätigkeiten (vgl. Kapitel 2.1.1), die weder Bedingungen noch Ziele benötigen (z.B. Einhalten von Sicherheitsabständen).
- *Normale Aufgaben* sind regelbasierte Tätigkeiten (vgl. Kapitel 2.1.1), die das Ergebnis einer Entscheidungsfindung sind (z.B. Überholen, Spurwechsel).

Das Teilmodell *Fahrerhandlungen* enthält Mechanismen zur dynamischen Entfaltung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt. Die darin enthaltene Entscheidungsfindung generiert eine geplante Geschwindigkeit in Abhängigkeit einiger Variablen (Verkehrsfluss, Fahreigenschaften, zulässige Höchstgeschwindigkeit, etc.) und der *Fahrerparameter*. Die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung wird zudem durch eine Funktion der *Fahrerparameter* ermittelt. Der tatsächliche Fehlereintritt wird jedoch auch von der gegenwärtigen Situation und von vordefinierten Fehlermodi beeinflusst. Sämtliche Zusammenhänge des Modells basieren auf nichtverifizierten Studien und können vom Anwender frei modifiziert werden. (Cacciabue und Carsten, 2010)

Der Modellansatz entstammt einer stark psychologischen Betrachtungsweise und konzentriert sich vor allem auf kognitive und motivationale Aspekte der Fahrzeugführung. Physiologische Aspekte, die für die Interaktion mit FAS ebenso benötigt werden, sind in SSDDIVE beziehungsweise im UMD gar nicht vorhanden.

1.2 Motivation und Ziel der Arbeit

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass die derzeit verfügbaren Fahrerverhaltensmodelle nicht ausreichend detailliert beziehungsweise deren Mechanismen nicht belegbar dokumentiert sind, um für die Verhaltenssimulation in kritischen Verkehrssituationen und für die Interaktion mit FAS der Aktiven Sicherheit verlässlich geeignet zu sein. Um eine ganzheitliche Evaluierungsmethode für die Wirksamkeit von FAS der Aktiven Sicherheit entwickeln zu können, wie sie beispielsweise nach Abbildung 1.1 skizziert wird, sind solche Simulationsmodelle jedoch zwingend erforderlich. Zudem müssen diese stochastische Strukturen aufweisen, um die große Variabilität des möglichen Fahrerverhaltens zu adressieren. Auch diese Anforderung wird von den in Kapitel 1.1 aufgeführten Modelle entweder gar nicht oder nur unzureichend beachtet.

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines ersten numerischen Fahrerverhaltensmodells, das für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von FAS der Aktiven Sicherheit geeignet ist. Eine solche Bewertung wird abschließend prototypisch durchgeführt.

Da diese Aufgabe ein weites Feld an möglichen Szenarien adressiert, wurden zu Beginn der Arbeit einige Einschränkungen und Festlegungen mit den beteiligten Projektpartnern² getroffen. Zunächst musste ein Szenario gewählt werden, anhand dessen die Entwicklung betrieben werden konnte. Ziel war es, einen potenziell möglichst großen Nutzen der Aktiven Sicherheit quantifizierbar zu machen. Das heißt es sollte ein typisches Unfallszenario gewählt werden, bei dem aktuelle Maßnahmen der Passiven Sicherheit weniger zur Reduktion der Unfallfolgen beitragen können.

² Die Entwicklung des Fahrerverhaltensmodells war Teil eines kooperativen Forschungsprojekts im Rahmen des COMET K2-Forschungsprogramms *K2-Mobility – Sustainable Vehicle Technologies* des Staats Österreich und des Bundeslands Steiermark. Ziel war die Entwicklung einer numerischen Toolkette der Integralen Sicherheit. Beteiligt waren die BMW AG (München), das Kompetenzzentrum – Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH (Graz) und das Vehicle Safety Institute der TU Graz. Seitens der TU Dresden wurde die Entwicklung des Fahrerverhaltensmodells vom Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik und von der Professur für Verkehrspsychologie betrieben. Das Projekt gliederte sich in zwei Teile und wurde insgesamt von Juli 2011 bis Mai 2014 bearbeitet. Eine zusammenfassende Darstellung der Arbeiten an der TU Dresden kann Prokop, et al. (2012) und Prokop, et al. (2014) entnommen werden.

Abbildung 1.5 spiegelt die Entscheidungsgrundlage zum Projektstart wider. Sie zeigt die Entwicklung der Mortalitätsraten³ bei polizeilich erfassten Unfällen in Deutschland von 2007 bis 2010. Die Angaben entstammen dem Statistischen Bundesamt (2015).

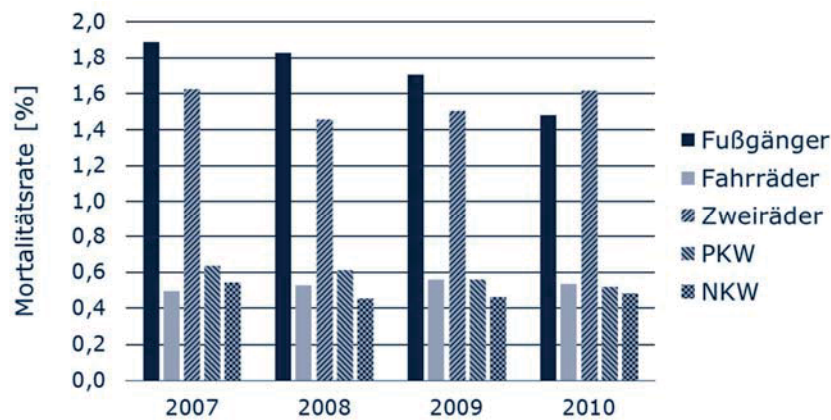


Abbildung 1.5: Mortalitätsraten polizeilich erfasster Unfälle in Deutschland von 2007 bis 2010

Wie sich zeigt, sind vor allem Fußgänger und Zweiradfahrer besonders häufig von tödlichen Unfallfolgen betroffen, wenn sie an einem Verkehrsunfall beteiligt sind. Da seitens der österreichischen Projektpartner neue Simulationsmethoden für die Abbildung von Bein- und Kopfverletzungen entwickelt wurden, fiel die Wahl auf die Zielgruppe der Fußgänger, auch wenn im Vier-Jahres-Trend nach Abbildung 1.5 bereits ein Rückgang der Mortalitätsrate dieser Gruppe zu erkennen ist.

Für die Entwicklung wurde ein entsprechendes Szenario definiert. Es handelt sich um einen Unfall mit Todesfolge, bei dem ein PKW innerorts mit einem Fußgänger kollidierte. Die Unfallrekonstruktion wurde vom Projektpartner VSI (Vehicle Safety Institute der TU Graz) aus der Unfalldatenbank ZEDATU (Zentrale Datenbank tödlicher Unfälle in Österreich) extrahiert und allen anderen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Abbildung 1.6 veranschaulicht die Anfangsbedingungen. Der Fußgänger wird bei einer *TTC* (*T*ime *t*o *c*ollision; vgl. Kapitel 2.1.5) von 4,0 s für den Fahrer des Egofahrzeugs sichtbar, indem er hinter dem Sichthindernis hervor auf die Fahrbahn tritt.

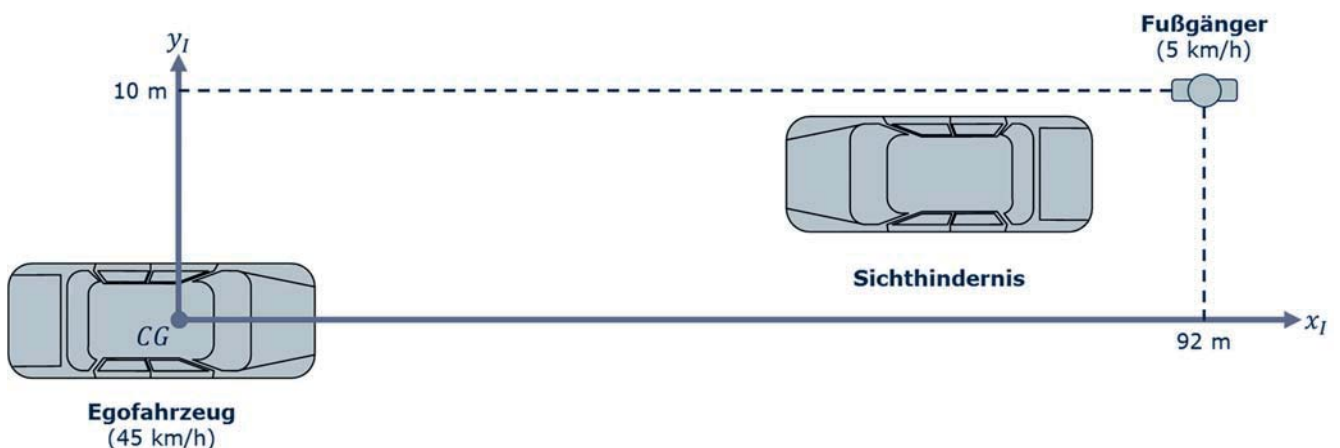


Abbildung 1.6: Veranschaulichung des Entwicklungsszenarios
(*CG* = Center of gravity = Schwerpunkt, *I* = Inertialsystem)

³ Verhältnis getöteter Verkehrsteilnehmer zur Anzahl der an Unfällen beteiligten Verkehrsteilnehmer in einer Gruppe.



Ferner wurde festgelegt, dass der Fahrer zunächst nur durch Bremsen reagiert, da die zusätzliche Betrachtung von Ausweichreaktionen eine wesentlich detailliertere Interaktion mit dem Verkehrsumfeld erforderlich macht. Der Schwerpunkt der ersten Modellentwicklung liegt zunächst auf der Wechselwirkung zwischen Fahrer und Hindernis.

Als zu evaluierendes FAS wurde exemplarisch eine kombinierte Kollisionswarnung mit Notbremsassistent gewählt, die einem früheren Entwicklungsstadium der BMW AG entstammt. Die wesentlichen Aspekte der Warnkaskade sind in Abbildung 1.7 veranschaulicht. Zusätzlich verfügt das System über eine Bremsassistentenfunktion, die bei Überschreiten einer bestimmten Betätigungsgeschwindigkeit des Bremspedals dafür sorgt, dass unabhängig von der tatsächlichen Bremspedalstellung umgehend der volle Bremsdruck in der Bremsanlage aufgebaut wird.



Abbildung 1.7: Warnkaskade des exemplarisch zu bewertenden Fahrerassistenzsystems ($TTC = \text{Time to collision}$)

Zur Erarbeitung der Zielstellung unter den genannten Randbedingungen wird nachfolgend in Kapitel 2 zunächst ein ausführlicher Literaturüberblick der wissenschaftlichen Kenntnisse zum Fahrerverhalten gegeben. Dieser Literaturüberblick dient als Grundlage für die Modellbildung und zur Identifikation der existierenden wissenschaftlichen Lücken, die anschließend in Kapitel 3 durch Probandenstudien adressiert werden. Das Fahrerverhaltensmodell kann mit Hilfe dieser gesammelten Erkenntnisse schließlich in Kapitel 4 aufgebaut werden. Im Anschluss wird das stochastische Verhalten des Modells in Kapitel 5 überprüft, indem das simulierte Verhalten mit dem realen Verhalten einer weiteren Probandenstudie verglichen wird. Abschließend wird eine Bewertungsmethode des generischen FAS in Kapitel 6 durch Einführung der *Virtuellen Probandenstudie* und unter Verwendung des entwickelten Fahrerverhaltensmodells vorgestellt und durchgeführt. Die *Virtuelle Probandenstudie* stellt eine prototypische Lösung für den Bereich *Numerische Simulation* in Abbildung 1.7 dar.

2 Wissenschaftlicher Hintergrund

Im vorliegenden Kapitel wird der Stand der Forschung zur Beschreibung des Menschen und menschlichen Verhaltens (nicht zwingend nur im Sinne der Fahrzeugführung) dargelegt, der für die Erstellung des zu entwickelnden Fahrerverhaltensmodells herangezogen wird. Ziel des Kapitels ist es, eine geeignete Modellstruktur zu definieren und für die einzelnen Teile dieser Struktur in der Literatur vorhandene Modellierungsansätze zu finden beziehungsweise die bestehenden Lücken zu identifizieren.

In Kapitel 2.1 wird zunächst ein ausgewählter Überblick bestehender Theorien zur Beschreibung des Fahrerverhaltens vermittelt, aus dem in Kapitel 2.2 die phänomenologische Modellstruktur des zu entwickelnden, numerischen Fahrerverhaltensmodells abgeleitet wird. In den Kapiteln 2.3 bis 2.5 werden den einzelnen Teilen dieser Modellstruktur bestehende Erkenntnisse und Modellierungsansätze aus der Literatur zugeordnet und existierende Lücken aufgezeigt.

2.1 Theoretische Beschreibungen des Fahrerverhaltens

Bereits innerhalb der bestehenden, phänomenologischen Modelle zur Beschreibung des Fahrerverhaltens lassen sich unterschiedliche Ausprägungen je nach adressiertem Verhaltensszenario unterscheiden.

Zu den generalisierten Formulierungen zählen das Drei-Ebenen-Modell menschlichen Verhaltens nach Rasmussen und das Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges, wobei Rasmussen sein Modell nicht explizit im Kontext des Fahrerverhaltens entwickelte. Beide Modelle sind phänomenologisch elementare Grundbestandteile der vorliegenden Arbeit und werden daher in den Kapiteln 2.1.1 und 2.1.2 vorgestellt.

Als theoretische Formulierungen, die sich bereits gezielter mit menschlichem Handeln in kritischen Situationen befassen, sind beispielsweise das Stufenmodell der Gefahrenkognition nach Schlag und das Bremsreaktionszeitmodell nach Burckhardt zu betrachten. Beide Modelle bilden die Grundlage für die phänomenologische Struktur des Fahrerverhaltensmodells und werden in den Kapiteln 2.1.3 beziehungsweise 2.1.4 vorgestellt.

Einen weiteren, theoretischen Ansatz, der sich vom phänomenologischen Hintergrund entfernt und bereits stärker mit der Frage beschäftigt, wie die Fahrer ihre Handlungen auf Grundlage visuell wahrgenommener Umgebungsinformationen ausführen, stellt die τ -Theorie nach Lee dar. Diese wird in verschiedenen Algorithmen des Fahrerverhaltensmodells angewendet (siehe Kapitel 2.3.1.1.3, 2.4.2 und 2.5.1). Die Grundlagen der τ -Theorie werden daher zunächst in Kapitel 2.1.5 erläutert.

2.1.1 Drei-Ebenen-Modell menschlichen Verhaltens nach Rasmussen

Das Drei-Ebenen-Modell menschlichen Verhaltens nach Rasmussen findet keine direkte Anwendung innerhalb der Algorithmen des Fahrerverhaltensmodells. Allerdings werden viele Zusammenhänge und Theorien im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand der Definitionen dieses Modells erläutert, sodass es an dieser Stelle kurz vorgestellt wird.

Rasmussen entwickelte sein Modell nicht explizit im Kontext der Fahrzeugführung; jedoch lassen sich deren Aspekte in dieses Modell sehr gut einordnen. Es besteht aus drei hierarchischen Ebenen, die die Erfüllung von Aufgaben mit unterschiedlichem, kognitivem Aufwand charakterisieren. Abbildung 2.1 veranschaulicht zunächst das Modell gemäß Rasmussen (1983).

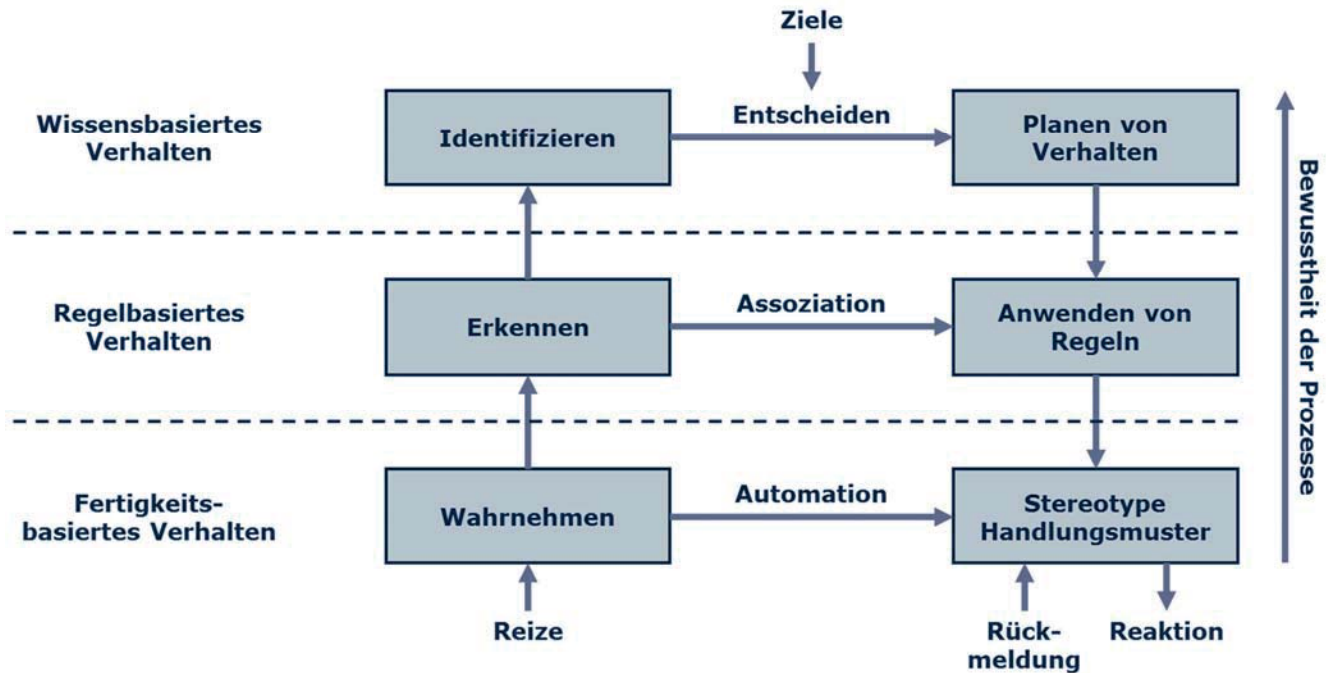


Abbildung 2.1: Drei-Ebenen-Modell menschlichen Verhaltens nach Rasmussen (1983)

Die unterste Modellebene wird als *Fertigkeitsbasiertes Verhalten* bezeichnet. Dieses ist gekennzeichnet durch sensomotorische Aktivitäten ohne bewusste Kontrolle. Die Leistungsfähigkeit ist stark abhängig vom Konditionierungsgrad der ausführenden Person. Das heißt je geübter der Mensch beim Ausführen der Aufgabe ist, desto leistungsfähiger ist er bei der Erfüllung des Aufgabenziels. Die Person kann die einzelnen Handlungsschritte und die zugrundeliegenden Informationen in der Regel nicht bewusst beschreiben. Die Handlungen sind durch geschmeidige, integrierte Bewegungen ohne selektive oder bewusste, sensorische Wahrnehmung charakterisiert. Letztere ist nur auf Aspekte der Umwelt gerichtet, die zur Aktualisierung und Orientierung des mentalen Umweltmodells notwendig sind. Typische Beispiele für *Fertigkeitsbasiertes Verhalten* sind das Spielen eines Musikinstruments oder das Ausregeln einer Seitenwindkraft bei ausreichender Fahrerfahrung.

Die mittlere Modellebene wird als *Regelbasiertes Verhalten* bezeichnet. Dieses kommt zur Anwendung, wenn die notwendige Konditionierung zur fertigkeitbasierten Erfüllung eines Aufgabenziels nicht vorhanden ist, der Mensch jedoch auf Sequenzen von Subroutinen in einem bekannten Arbeitsumfeld zurückgreifen kann. Er folgt bei der Abarbeitung der Aufgabe einem festen Know-how, dessen angewandte Regeln von ihm wiedergegeben werden können. *Regelbasiertes Verhalten* ist somit durch zielorientiertes Handeln charakterisiert, das schrittweise nach einem festen Vorgehen strukturiert ist. Das Aufgabenziel ist dabei oft nicht explizit formuliert, sondern implizit in der Situation enthalten, die die Regel hervorbringt. Die Auswahl der Regel erfolgt meist basierend auf früheren Erfahrungen. Nach häufiger Wiederholung der Regeln kann zudem eine Überführung des *Regelbasierten Verhaltens* ins *Fertigkeitsbasierte Verhalten* erfolgen. Typische Beispiele für *Regelbasiertes Verhalten* sind Aufgaben nach Tätigkeitsliste (z.B. Montieren, Kochen) oder das Interagieren mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Elementen der Verkehrsführung im Sinne der Straßenverkehrsordnung.

Die oberste Modellebene wird als *Wissensbasiertes Verhalten* bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine konzeptionelle Ebene, die zur Lösung von Aufgaben bemüht werden muss, für die keine bekannten Regeln vorliegen. Es existiert ein explizit formuliertes Aufgabenziel, das sich aus der Analyse der Situation ergibt. Nach Formulierung des Ziels werden in der Regel mehrere Pläne zur Realisierung der Lösung durch die Person erstellt und gegeneinander abgewogen, um schließlich

einen davon auszuwählen. *Wissensbasiertes Verhalten* erfordert ein mentales Modell der Situation, dessen Detaillierungsgrad abhängig von der Erfahrung, aber auch von der Problemstellung sein kann. Typische Beispiele für *Wissensbasiertes Verhalten* sind Entwicklungsaufgaben oder das Fahren in einem unbekannten Gebiet ohne Navigationssystem. (Rasmussen, 1983)

2.1.2 Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges

Donges entwickelte sein Modell zunächst als rein regelungstheoretischen Ansatz zur Nachbildung des menschlichen Spurführungsverhaltens (Donges, 1976). Dieses erste Modell war ein mehrstufiger Regelkreis mit Vorsteuerung und bestand lediglich aus zwei Ebenen. Erst später erweiterte Donges dieses Modell zu einer phänomenologischen Beschreibung des Fahrerverhaltens, wie es in Abbildung 2.2 dargestellt ist (der konkrete regelungstechnische Aufbau des Zwei-Ebenen-Modells der Fahrzeugquerführung wird weiter unten in diesem Kapitel beschrieben).

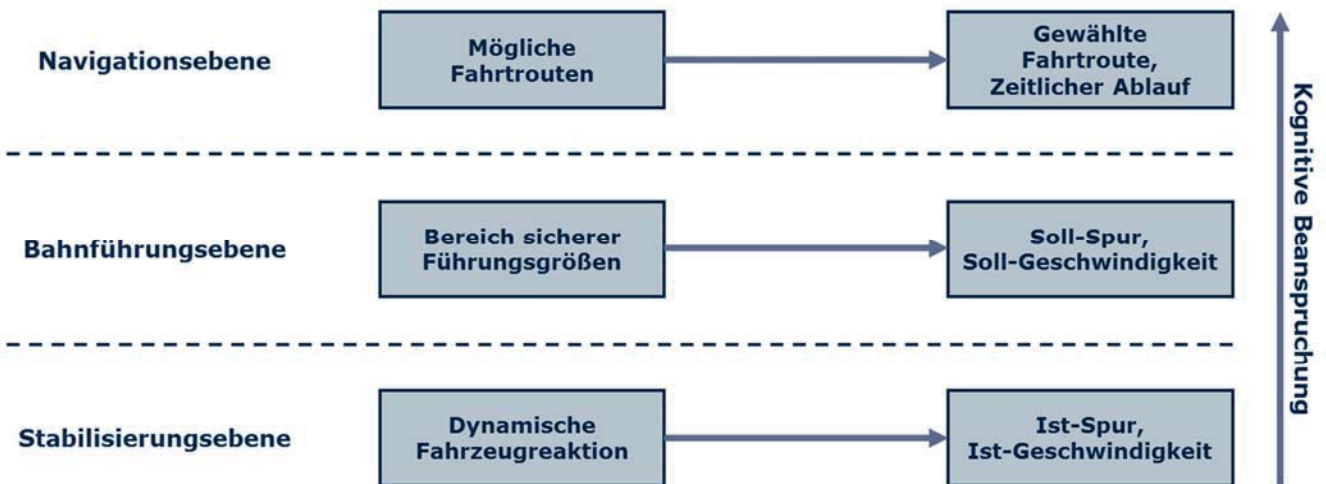


Abbildung 2.2: Das Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges (1982)

Die oberste Ebene wird als *Navigationsebene* bezeichnet. Sie umfasst sämtliche Prozesse, die die eigentliche Planung der Fahrt betreffen. Dazu zählen die Auswahl von Transportmittel und geeigneter Fahrtroute sowie die Abschätzung des Zeitbedarfs. Die Auswahl erfolgt nach persönlichen Kriterien wie Kosten, verfügbare Zeit und Streckenbekanntheit. Das Verhalten auf *Navigationsebene* bildet somit den motivationalen Hauptbestandteil der Fahraufgabe, wobei es regelungstechnisch kaum an der eigentlichen Fahrzeugführung beteiligt ist, da diese Prozesse entweder vor Fahrtantritt bereits abgeschlossen sind, oder während der Fahrt nur bei Änderung der Fahrtroute oder Navigation durch unbekanntes Gebiet erfolgen. Gleichzeitig erzeugen Handlungen auf *Navigationsebene* die höchste kognitive Beanspruchung.

Die eigentliche Umsetzung der (auf *Navigationsebene* bestimmten) Fahrtroute in Form einzelner Fahrmanöver erfolgt auf der mittleren Modellebene, die als *Bahnführungsebene* bezeichnet wird. Diese umfasst Prozesse wie die vorausschauende Wahrnehmung der Verkehrssituation und die Ableitung von Führungsgrößen der Fahrzeugbewegung im Sinne einer Bahnplanung (Soll-Spur, Soll-Geschwindigkeit). Des Weiteren obliegt dieser Ebene auch die Ausführung der notwendigen Fahrmanöver in Form antizipatorischer Eingriffe in die Fahrzeugbewegung im Sinne einer Steuerung. Die Planung der Fahrmanöver selbst erfolgt in diskreten Zeitschritten von einigen Sekunden, wohingegen der Prozess der Steuerung kontinuierlich abläuft. Die kognitive Beanspruchung bei der Ausführung dieser Handlungen ist wesentlich geringer als auf *Navigationsebene*.

Die unterste Modellebene wird als *Stabilisierungsebene* bezeichnet. Auf ihr werden die aktuellen Abweichungen von der Soll-Trajektorie der *Bahnführungsebene* erfasst und im Sinne einer kompensatorischen Regelung ausgeglichen. Dies ist notwendig, da das Systemverständnis des Fahrers über das Egofahrzeug in der Regel nur bedingt genau ist und auch Störgrößen nicht hinrei-