1 Einleitung

Weltweit sterben jährlich 1,35 Millionen Menschen an den Folgen eines Verkehrsunfalls (WHO, 2018). Laut einer aktuellen Statistik der Europäischen Kommission kamen dabei im Jahr 2017 allein in der Europäischen Union 25.300 Menschen ums Leben (European Commission, 2019). Bei jungen Menschen zwischen 15 und 29 Jahren sind Verkehrsunfälle die weltweit häufigste Todesursache der Bevölkerung (WHO, 2018; OECD, 2016). Die Erhöhung der Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer[5] durch die Entwicklung und Einführung neuer Fahrerassistenzsysteme (FAS) und automatisierter Fahrfunktionen ist ein zentrales und gemeinsames Bestreben aller relevanten Beteiligten (u.a. der Automobilindustrie sowie von Kunden, Zulieferern, unabhängigen Forschungsinstituten und Gesetzgebern). Die Integration automatisierter Fahrfunktionen in die Gesamtfahrzeugarchitektur und die kontinuierliche Entwicklung dieser Systeme sowie deren Beobachtung im Markt hat insbesondere zum Ziel, die oben aufgeführten Zahlen der jährlich tödlich Verunglückten und Schwerverletzten weiter zu senken. Die Wirksamkeit von Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen muss dabei sowohl im frühen Prozess der Entwicklung geprüft, bewertet und zeitnah vor deren Einführung in den Markt umfassend getestet als auch nach deren Markteinführung fortlaufend überwacht werden.

Zur Überprüfung und gesamthaften Bewertung der Wirksamkeit automatisierter Fahrfunktionen auf die Sicherheit im Straßenverkehr werden neben der Durchführung von Versuchen auf dem Testfeld oder im Fahrsimulator Daten aus Unfalldatenbanken sowie aus FOT-Studien (= Field Operational Test) herangezogen. Im Rahmen eines FOT werden Versuchsfahrzeuge im Serienstand mit aktuellen FAS und automatisierten Fahrfunktionen und Messtechnik (u.a. für die Aufzeichnung und Speicherung von Video- und Fahrdaten) ausgestattet. Diese Fahrzeuge werden über einen bestimmten Zeitraum (i.d.R. nicht länger als drei Monate) an Kunden ausgeliehen, die mit oder ohne explizite Anweisung zur Art und Weise sowie Häufigkeit der Nutzung der verbauten Assistenzsysteme das Fahrzeug ohne Begleitung eines Versuchsleiters fahren dürfen. Dabei besteht neben der Aufzeichnung von Video- und Fahrdaten auch die Möglichkeit zu Vor- und Nachbefragungen sowie zwischenzeitlichen Interviews der Kunden. Die erhobenen Daten können anschließend zur Analyse von Felddaten und Extraktion sicherheitsrelevanter Verkehrssituationen herangezogen werden. Eine weitere Möglichkeit für eine effiziente Testung von FAS bietet die virtuelle Verkehrssimulation. In der Simulation kann innerhalb kurzer Zeit eine hohe Anzahl an Szenarien getestet und die Wirksamkeit der dabei betrachteten Funktionen bewertet werden. Die prospektive Wirksamkeitsanalyse von Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen ist ein effizientes und vielseitig anwendbares Werkzeug zur gesamthaften Bewertung dieser Funktionen, u.a. auch unter Berücksichtigung potenzieller Fehlauslösungen des betrachteten Systems (vgl. Kompaß et al., 2015; Eckstein & Zlocki, 2013). In der Simulation ist es möglich, sowohl Dauerlaufsimulationen mit unspezifischem Verkehrsgeschehen durchzuführen als auch gezielt einzelne relevante Szenarien aus Feldbeobachtungen (v.a. Unfallszenarien oder Beinaheunfälle sowie kritische Verkehrssituationen) nachzubilden. Dies bietet die Möglichkeit den Verlauf dieser Ereignisse mit und ohne System zu testen und damit den Verkehr mit und ohne FAS und automatisierten Fahrfunktionen zu vergleichen. In der Simulation kann dabei entweder der unfallbasierte oder der verkehrsbasierte Ansatz verfolgt werden. Mithilfe des unfallbasierten Ansatzes werden aus bestehenden Unfalldaten einzelne Unfallszenarien extrahiert und in der Simulation resimuliert. Dabei wird untersucht, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich die Situation wie entwickelt hätte, wenn ein Systemeingriff einer Fahrerassistenzfunktion erfolgt wäre. Ein System mit einer guten Wirksamkeit führt dazu, dass ein Unfall in einer kritischen Verkehrssituation durch einen korrekten Systemeingriff vermieden wird oder im Falle von physikalisch unvermeidlichen Unfällen

[5] Aus Gründen der Lesbarkeit wurde im Text bei Personenbezeichnungen die männliche Form gewählt, nichtsdestoweniger beziehen sich die Angaben auf Angehörige aller Geschlechter. Entgegen der üblichen Praxis zur Verfassung wissenschaftlicher Arbeiten werden englische Fachbegriffe aus der differentialen und Persönlichkeitspsychologie verwendet (z.B. Sensation Seeking, Driving Anger), die auch im deutschen Sprachraum i.d.R. in englischer Sprache verwendet werden. Auf eine deutsche Übersetzung wird deshalb auch in dieser Abschrift verzichtet.

deren Folgen für Fahrzeuginsassen sowie für alle anderen Unfallbeteiligten gemindert werden, z.B. durch eine frühe Auslösung aktiver Rückhaltesysteme und maximalen Bremseingriff durch eine aktive Sicherheitsfunktion. Beim verkehrsbasierten Ansatz werden aus Verkehrsdaten relevante Szenarien extrahiert, rekonstruiert und in der Simulation mit und ohne Systemeingriff gezielt getestet und miteinander verglichen. Dabei werden nicht nur Unfälle betrachtet, sondern auch kritische Situationen, Beinaheunfälle und unkritischer Verkehr, in dem potenzielle Systemeingriffe erfolgen können, z.B. sanftes Gegenlenken des Spurhalteassistenten bei unbeabsichtigtem Verlassen des eigenen Fahrstreifens mit Rückführung zur Fahrstreifenmitte.

Für eine korrekte und gesamthafte virtuelle Bewertung des Systemverhaltens sind valide Modelle für die Umgebung, das Fahrzeug sowie insbesondere auch für den Fahrer erforderlich (vgl. Helmer et al., 2015; Wachenfeld & Winner, 2015; Wang et al., 2017). Für die Simulation der virtuellen Fahrer (= Agenten)[6] ist ein Fahrermodell erforderlich, das menschliche Verhaltensmuster und Kognitionsprozesse beinhaltet und diese in der Simulation möglichst realistisch abbildet. Eine grobe Einteilung und Modellierung menschlicher Kognition umfasst dabei alle Prozesse von der Informationsaufnahme (während der Fahraufgabe primär über den visuellen Sinneskanal, vgl. Crundall et al., 2003 und Schlag et al., 2008) über die Informationsverarbeitung bis hin zur Entscheidungsfindung und Auswahl einer konkreten Handlung. Dieser Prozess läuft sowohl in der Realität als auch in der Simulation während der Fahraufgabe in einer iterativen Schleife mit potenziellen Rückkopplungen aufgrund von bewusst gesteuerten Top-down-Prozessen ab.[7] Basierend auf diesen kognitiven Prozessen resultiert letztendlich ein Fahrerverhalten, welches im verkehrsbasierten Ansatz sowohl den allgemeinen Verkehrsfluss als auch den Verlauf ausgewählter Verkehrssituationen bestimmt. Objektiv beobachtbares Verhalten der Agenten bei der Fahrzeugführung bezogen auf die Längs- und Querführung wird durch die Integration einer Vielzahl an Verhaltensparameter simuliert, z.B. der Wunschgeschwindigkeit oder der Abstandshaltung während der Folgefahrt. Diese unterliegen im realen Verkehr stochastischen Verteilungen und sind abhängig von den individuellen Voraussetzungen des Fahrers, von kognitiven Prozessen und situativen Bedingungen. Das bedeutet Kognition und Verhalten unterscheiden und verändern sich sowohl situationsabhängig als auch in Abhängigkeit von den individuellen Eigenschaften des Fahrers. Dazu zählen neben demographischen Eigenschaften, wie z.B. dem Alter oder dem Geschlecht, auch Persönlichkeitseigenschaften, wie z.B. Risikobereitschaft oder Ängstlichkeit. Situationsabhängige Unterschiede können sich nicht nur aufgrund der Verkehrsumgebung, sondern auch aufgrund des aktuellen Zustands des Fahrers ergeben (z.B. aufgrund von erhöhter Müdigkeit oder Stress). In vielen Fahrerverhaltensmodellen werden diese inter- und intraindividuellen Fahrerverhaltensunterschiede[8] kaum oder nur unzureichend berücksichtigt. Zum Teil sind für Abweichungen vom Verhalten eines durchschnittlichen Fahrers in einem neutralen Gemütszustand lediglich deterministische Parameter ohne Berücksichtigung natürlicher stochastischer Varianz hinterlegt. Eine Ausführung und Beschreibung ausgewählter Fahrerverhaltensmodelle erfolgt in Kapitel 2.1.2. Für eine möglichst exakte Nachbildung menschlichen Verhaltens in der Simulation ist es allerdings erforderlich, dass dem implementierten Fahrerverhaltensmodell nicht nur eine kognitive Architektur zugrunde liegt, die möglichst alle menschlichen Prozesse umfasst, sondern auch ein Modul existiert, das den Agenten zufällig bestimmte Fahrereigenschaften und Zustände zuweist und dadurch das Verhalten der Agenten basierend auf stochastischen Parametern variiert. Natürlich vorhandene Unterschiede in der Fahrerpopulation müssen in der Simulation zur Bewertung von FAS ebenfalls berücksichtigt werden, damit basierend auf Ergebnissen von Verkehrssimulationen belastbare Aussagen zur Sicherheit der darin getesteten Systeme getroffen

[6] Ein Agent bezeichnet eine einzelne Fahrer-Fahrzeug-Einheit in der Simulation. Wenn in der vorliegenden Arbeit von Agenten gesprochen wird, ist jedoch nur das Fahrermodell ohne Berücksichtigung des Fahrzeugmodells gemeint.

[7] Top-down Prozesse sind bewusst gesteuerte Handlungen, die aufgrund der intrinsisch motivierten Intention des Fahrers durchgeführt werden (z.B. bewusste Blickzuwendungen in den linken Außenspiegel vor der Durchführung eines Fahrstreifenwechsels nach links).

[8] Interindividuelle Unterschiede beziehen sich auf den Vergleich zwischen verschiedenen Fahrern, während intraindividuelle Unterschiede innerhalb einer Person zu unterschiedlichen Zeitpunkten bzw. in unterschiedlichen Zuständen gemessen werden können.

werden können. Letztendlich gilt: das Ergebnis einer Wirksamkeitsanalyse in der virtuellen Verkehrssimulation ist nur so valide und reliabel wie deren zugrunde liegende Modelle. Für die Modellierung menschlicher Fahrer ist eine systematische Beobachtung und Messung des Verhaltens von Fahrern erforderlich, um konkrete Fahrerverhaltensparameter zu quantifizieren, Zusammenhänge dieser Parameter zu identifizieren und diese möglichst realitätsnah in ein mikroskopisches Fahrermodell für die agentenbasierte Verkehrssimulation zu überführen.

1.1 Motivation und Zielstellung

Fahrerindividualität und der Einfluss von Fahrerzuständen auf das Fahrerverhalten wurden bisher speziell für die Nachbildung menschlichen Verhaltens in der Simulation kaum untersucht. Aus der Literatur ist eine Vielzahl an Zusammenhängen zwischen Fahrereigenschaften, wie z.B. dem Alter oder dem Geschlecht des Fahrers, und deren Fahrverhalten bekannt (vgl. Deery & Fildes, 1999a; McKnight & McKnight, 2000; Underwood, 2007). Allerdings sind die Ergebnisse der vorhandenen Studien nicht ausreichend feingranular und eignen sich deshalb nicht für die Nachbildung dieser Zusammenhänge in der Verkehrssimulation. Statistische Zusammenhänge zwischen Fahrerindividualität und Fahrerverhaltensparametern zur mikroskopischen Beschreibung der Fahrzeugführung wurden im Bereich der Fahrerverhaltensmodellierung noch nicht detailliert empirisch erhoben und quantifiziert. Die Relevanz der Beschreibung dieser Zusammenhänge und der Operationalisierung von Fahrerverhalten durch stochastische Verhaltensparameter für die Nachbildung menschlichen Verhaltens in der Verkehrssimulation ist jedoch offensichtlich. Mikroskopische Simulationsansätze erfordern eine möglichst detaillierte Modellierung des Fahrers, da bei mikroskopischen Modellen im Gegensatz zu makroskopischen Modellen einzelne Agenten individuell parametriert werden und Verkehr nicht nur mithilfe von Strömungsgleichungen oder basierend auf Ansätzen aus der Gaskinetik und Fluiddynamik in einem simulierten Straßennetz abgebildet wird (vgl. Mai, 2017 nach Diekamp, 1995 und Krauß, 1998). Zur Parametrierung dieser Agenten ist ein kognitives Fahrerverhaltensmodell erforderlich, welches stochastische Verteilungen der Parameter berücksichtigt und ein wechselseitiges Zusammenwirken der Modelle für den Fahrer, die Umgebung und das Fahrzeug ermöglicht, damit die Interaktion eines Agenten mit der simulierten Umgebung sowie mit anderen Agenten und Verkehrsobjekten abgebildet werden kann. Für die Verortung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wird deshalb ein bereits bestehendes Fahrerverhaltensmodell, das Stochastic Cognitive Model (SCM)[9], herangezogen, welches u.a. stochastische Prinzipien für die Verhaltensparametrierung der Agenten verwendet. In vielen anderen Fahrermodellen ist das Verhalten der Agenten vorwiegend deterministisch implementiert (siehe Kapitel 2.1.2) oder basiert auf einer nicht ausreichend dokumentierten Datenbasis. Aufgrund der Zugänglichkeit zur Dokumentation des Inhalts und Aufbaus des SCM und dessen submodularen Struktur, die eine Integration von Fahrerindividualität ermöglicht, wird das SCM als Grundlage für die Inhalte der vorliegenden Arbeit verwendet.

Unter der Annahme, dass inter- und intraindividuelle Unterschiede zwischen Fahrern relevant für Unterschiede und Veränderungen in deren Verhalten sind, liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der detaillierten Untersuchung von Korrelationen zwischen Fahrereigenschaften, Fahrerzustand und Fahrerverhalten. Ziel ist die Erstellung nutzbarer Regressionsmodelle für die Simulation zur Vorhersage spezifischen Verhaltens in Abhängigkeit von Fahrereigenschaften, Persönlichkeitseigenschaften und variierenden Fahrerzuständen, wie z.B. erhöhte Müdigkeit oder Stress. Eine exakte und objektive Verhaltensbeobachtung bildet die Grundlage für die Zielstellung der Arbeit, um letztendlich ein valides Modell für die Abbildung menschlicher Individualität in der virtuellen Verkehrssimulation zu erstellen. Der Ansatz dieser Arbeit ist basierend auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft theoriegeleitet, empirisch orientiert und fokussiert auf die detaillierte Untersuchung von Korrelationen zwischen Fahrereigenschaften, Fahrerpersönlichkeit, Fahrerzustand und Fahrerverhalten. Anhand von Probandenstudien mit repräsentativen Stichproben aus der allgemeinen Fahrerpopulation werden Zusammenhänge zwischen Fahrerindividualität und

[9] Aufbau und Module des SCM werden in Kapitel 2.1.2.5 näher erläutert.

Fahrerverhaltensparametern untersucht und quantifiziert. Ziel ist es, darüber hinaus durch die Identifikation von voneinander unabhängigen Hauptkomponenten die verschiedenen Verhaltensparameter so zu strukturieren, dass eine inhaltliche Kohärenz geschaffen wird und eine gemeinsame und gezielte Ziehung der Parameter in der Simulation festgelegt werden kann. Mithilfe der Ergebnisse der durchgeführten Studien wird somit eine empirische Grundlage geschaffen, die für die Repräsentation von Fahrerindividualität in der mikroskopischen agentenbasierten Verkehrssimulation am Beispiel der Parameter des SCM herangezogen werden kann. Die Berücksichtigung des Einflusses von Fahrereigenschaften, Fahrerpersönlichkeit und Fahrerzustand auf objektive Fahrerverhaltensunterschiede soll zur kontinuierlichen Verbesserung der Modelle und damit der Verlässlichkeit der Ergebnisse von Verkehrssimulationen für die Bewertung der Wirksamkeit von FAS und automatisierten Fahrfunktionen beitragen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit entspricht dem standardisierten Vorgehen im Rahmen von empirischen Arbeiten zur Prüfung von hypothesengeleiteten Fragestellungen. Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche zu aktuellen Fahrerverhaltensmodellen und Zusammenhängen zwischen Fahrereigenschaften, Fahrerzustand und Fahrerverhalten wird der aktuelle Stand der Wissenschaft präsentiert (siehe Kapitel 2). Theoriegeleitet wird ein Ansatz zur Integration von Fahrerindividualität in die Verhaltensparametrierung für die mikroskopische Verkehrssimulation vorgestellt und Forschungsfragen und Hypothesen werden abgeleitet (siehe Kapitel 3.1 und 3.2). Für ein einheitliches Verständnis der im Rahmen der Arbeit verwendeten Konstrukte werden in Kapitel 3.3 Arbeitsdefinitionen dieser Konstrukte aufgeführt. Anschließend werden die methodischen Ansätze zur empirischen Datenerhebung vorgestellt und erläutert (Kapitel 3.4). In Kapitel 3.5 werden die Testverfahren für die statistische Datenanalyse im Detail erklärt. Statistisch versierten Lesern wird empfohlen, dieses Kapitel zu überspringen und erst in Kapitel 4, in dem die Durchführung sowie die Ergebnisse der empirischen Studien zur Modellbildung erläutert werden, wieder einzusteigen. Mithilfe von Fahrsimulatorstudien werden Zusammenhänge zwischen Fahrereigenschaften, Fahrerzuständen und Fahrerverhalten untersucht und quantifiziert. Aufgrund des aufwändigen Versuchsdesigns wird zuerst eine Pilotstudie in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt (siehe Kapitel 4.1). Die Pilotstudie dient der Überprüfung des Studienkonzepts sowie der Generierung erster Hinweise zu Zusammenhängen zwischen Fahrereigenschaften, Fahrerpersönlichkeit, Fahrerzustand und Fahrerverhalten. Im Rahmen der Hauptstudie in einem dynamischen Fahrsimulator (siehe Kapitel 4.2) erfolgt eine empirische Verhaltensbeobachtung anhand einer größeren Stichprobe zur Erstellung eines Mehrebenenmodells, das manifeste und latente[10] Fahrereigenschaften sowie manifeste Verhaltensparameter und latente Verhaltenskonstrukte beinhaltet (siehe Abbildung 3.2). Lineare Regressionsanalysen werden durchgeführt, um zu quantifizieren, welcher Anteil der Varianz in den stochastischen Verhaltensparametern durch fahrerbezogene unabhängige Variablen erklärt werden kann (siehe Kapitel 4.2.5.4.2). Mithilfe einer Hauptkomponentenanalyse werden die Verhaltensparameter in Cluster unterteilt, wie z.B. Parameter zur Beschreibung des Fahrstils oder des Fahrvermögens der Fahrer (siehe Kapitel 4.2.5.4.3). In Kapitel 4.5 folgt ein Exkurs zur Beschreibung der in der Hauptstudie beobachteten Zusammenhänge zwischen Fahrerindividualität, Fahrerzustand und dem Blickverhalten der Fahrer während der Fahrt. In Kapitel 5 wird die Validierung des in Kapitel 4.3 erstellten Modells vorgestellt, das auf den Ergebnissen der Hauptstudie in Kapitel 4.2 basiert. Hierfür wird ein Realfahrversuch in einem Versuchsträger durchgeführt. Die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudien sowie des Realfahrversuchs werden in Kapitel 6.1 verglichen und in Zusammenhang mit dem bisherigen Stand der Wissenschaft diskutiert. Abschließend werden in Kapitel 6.2 die Limitationen der vorliegenden Arbeit aufgezeigt, indem Vor- und Nachteile der methodischen Ansätze für die Erhebung und Validierung der Daten erläutert werden. In Kapitel 6.3

[10] Manifeste Fahrereigenschaften beziehen sich auf direkt beobachtbare Variablen, wie z.B. auf das Alter der Fahrer. Latente Eigenschaften sind nicht direkt messbar und müssen vorerst operationalisiert werden. Dies trifft beispielsweise auf Persönlichkeitseigenschaften oder Zustände zu.

folgt ein Fazit dieser Arbeit sowie ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit erfolgt in Kapitel 7. In Abbildung 1.1 ist der Aufbau der Arbeit mit Zuordnung der Inhalte zu den entsprechenden Kapiteln dargestellt.

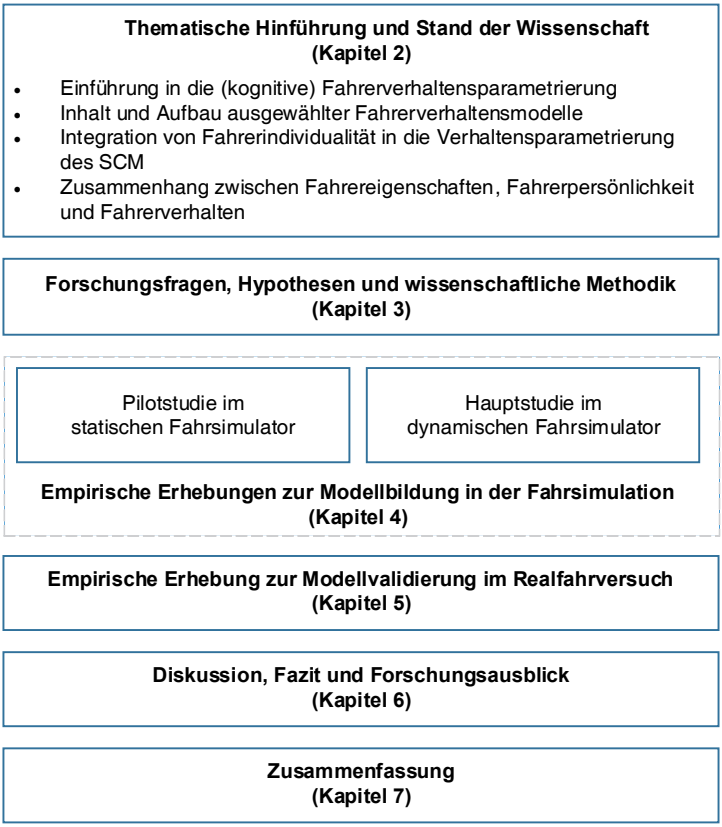

Abbildung 1.1: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit und Kapitelzuordnung

2 Wissenschaftlicher Hintergrund

Im vorliegenden Kapitel wird der Stand der Technik im Bereich der kognitiven Fahrerverhaltensmodellierung dargestellt. Anschließend wird der Stand der Wissenschaft zu Zusammenhängen zwischen Fahrerverhalten, Fahrereigenschaften und Fahrerzustand in Hinblick auf inter- und intraindividuelle Verhaltensunterschiede beschrieben.

In Kapitel 2.1 wird der Rahmen der vorliegenden Untersuchungen aufgezeigt, d.h. der Beitrag der empirischen Untersuchungen dieser Arbeit zum aktuellen Stand der Technik in der Fahrerverhaltensmodellierung. Dabei werden Anforderungen an kognitive Fahrerverhaltensmodelle erläutert sowie Komponenten und Defizite ausgewählter Fahrerverhaltensmodelle beschrieben und diskutiert. Im Zuge dessen werden auch Aufbau, Inhalte sowie Erweiterungsmöglichkeiten des kognitiven Fahrerverhaltensmodells SCM beschrieben, in dem die Anwendung der erzielten Erkenntnisse über inter- und intraindividuelle Unterschiede im Fahrerverhalten zur Modellerweiterung verortet ist. In Kapitel 2.2 werden Aspekte der generischen und zustandsabhängigen Fahrerindividualität aufgezeigt und der aktuelle Wissensstand zu Zusammenhängen zwischen inter- und intraindividuellen Unterschieden im Fahrerverhalten wird dargestellt. Dabei werden demographische Fahrereigenschaften, Fahrerpersönlichkeit (z.B. Risikobereitschaft, Sensation Seeking) sowie Fahrerzustände (z.B. Müdigkeit) berücksichtigt. Existierende Forschungslücken werden identifiziert und die daraus resultierende Notwendigkeit der vorliegenden Arbeit wird aufgezeigt.

2.1 Kognitive Fahrerverhaltensmodellierung

Für die agentenbasierte Verkehrssimulation sind adäquate Modelle für die Umgebung, das Fahrzeug und den Fahrer erforderlich. Insbesondere die Modellierung des menschlichen Fahrers und der damit verbundenen kognitiven und motorischen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie eine autarke Entscheidungs- und Handlungsfähigkeit stellen dabei zentrale Anforderungen an die Fahrerverhaltensmodellierung dar. Im Folgenden werden diese und weitere relevante Anforderungen und Inhalte ausgewählter Fahrerverhaltensmodelle sowie der Aufbau und die einzelnen Submodule des SCM erläutert.

2.1.1 Definition und Differenzierung des Fahrermodellbegriffs

Die Bezeichnung Fahrermodell wird in verschiedenen Fachbereichen und in unterschiedlichen Kontexten verwendet, weshalb eine klare Differenzierung bei der Verwendung dieses Begriffs im erforderlich ist. So wird der Begriff Fahrermodell im Bereich *Human Factors*[11] vor allem im Kontext der Fahrerzustandsbeobachtung verwendet. Im Fahrzeug wird z.B. mithilfe von Kamerasystemen der Zustand des Fahrers während der Fahrzeugführung überwacht, damit z.B. ungünstige Fahrerzustände und damit verbundene Gefährdungen für eine sichere Fahrzeugführung detektiert werden können (vgl. Radlmayr et al., 2016). Mit zunehmender Automatisierung der Fahrzeugführung verlagern sich der Anteil der Fahraufgabe und die damit verbundene (subjektive wie objektive) Verantwortung für die Fahrzeugführung vom Menschen zunehmend auf das Fahrzeug. In niedrigeren Automatisierungsstufen liegt die Verantwortung nach wie vor beim Fahrer und es obliegt dem Fahrer, kontinuierlich den Verkehr und das Fahrzeugverhalten zu überwachen und gegebenenfalls einzugreifen, falls dies erforderlich ist, z.B. bei Auftreten einer Systemgrenze durch Verlust der Fahrstreifenerkennung und einem damit verbundenen Systemabwurf. Erst mit Einführung des hochautomatisierten Fahrens, ist es dem Fahrer erlaubt, den Blick dauerhaft von der Straße abzuwenden und sich z.B. einer Nebentätigkeit zuzuwenden. Dennoch muss auch in dieser Automatisierungsstufe noch sichergestellt werden, dass der Fahrer wach bleibt, um im Notfall übernehmen zu können. Ein adäquates Vertrauen in sowie ein korrektes Bewusstsein für die

[11] Human Factors (engl.) = Menschlicher Faktor, menschliche Einflussgröße; wird verwendet als Sammelbegriff für psychische, kognitive und soziale Einflussfaktoren in sozio-technischen Systemen und Mensch-Maschine-Systemen (vgl. Badke-Schaub et al., 2008)

unterschiedlichen Stufen der Automatisierung beeinflusst wiederum die Aktiviertheit und Aufmerksamkeit des Fahrers (vgl. Rauch et al., 2009). Dies kann sich in Form von Veränderungen in Übernahmezeiten und der Übernahmequalität in teil- und hochautomatisierten Fahrmodi widerspiegeln (Feldhütter et al., 2016). Die kontinuierliche systemseitige Überwachung des Fahrerzustands dient daher der rechtzeitigen Intervention, z.B. durch eine Aufforderung, aufmerksam zu bleiben oder die Fahrzeugführung zu übernehmen, wenn der Fahrer zu lange den Blick abwendet oder die Augen schließt. Diesen Erkennungssystemen sind Fahrermodelle hinterlegt, die einen müden Zustand des Fahrers zuverlässig erkennen und als solchen identifizieren können. Bei der Erstellung dieser Modelle handelt es sich also um eine reine Beobachtung des Fahrers, seines Verhaltens bzw. seines Zustands.

Im Kontext der Verkehrssimulation bezieht sich der Begriff Fahrer(-verhaltens-)modell auf die Vorhersage des Verhaltens von Fahrern (vgl. Jürgensohn & Timpe, 2001). Dies erfordert eine umfassende Kenntnis der Variablen und Prozesse, die menschlichem Verhalten zugrunde liegen, damit letztendlich ein möglichst realistisches Fahrerverhalten in der virtuellen Simulation nachgebildet werden kann. Geeignete Fahrerverhaltensmodelle befähigen die in der virtuellen Umgebung fahrenden Agenten dazu, autark zu entscheiden und zu handeln. Dabei müssen u.a. menschliche kognitive und physiologische Prozesse berücksichtigt werden, die von der Wahrnehmung externer Reize in der Umgebung über die Informationsverarbeitung bis hin zur Umsetzung einer geeigneten Handlung reichen. Die Berücksichtigung von Informationsverarbeitungsprozessen, Mechanismen von Top-down sowie Bottom-up[12] gesteuerter Aufmerksamkeitsdiffusion, verbunden mit einer kontinuierlichen Anpassung des eigenen Verhaltens an die aktuelle Situation, sind Komponenten, die in dieser komplexen submodularen Struktur beachtet werden müssen. Zudem ist eine Berücksichtigung von Fahrerindividualität und den damit verbundenen inter- und intraindividuellen Verhaltensunterschieden erforderlich. Das bedeutet, dass sowohl Fahrer mit unterschiedlichen feststehenden Eigenschaften (= *Traits*, wie z.B. Alter oder Persönlichkeitseigenschaften) als auch in unterschiedlichen Zuständen (= *States*, wie z.B. Müdigkeit oder Stress) modelliert werden müssen. Zahlreiche Studien belegen die Existenz von Zusammenhängen zwischen Fahrereigenschaften und Fahrerverhalten, wie z.B. zu riskantem Fahrverhalten oder der Häufigkeit der Beteiligung an Verkehrsunfällen (vgl. z.B. Johnson et al., 2009; Alver et al., 2014; Beanland et al., 2014). Der Einfluss inter- und intraindividueller Fahrerunterschiede auf das Fahrerverhalten wird in aktuellen Fahrerverhaltensmodellen bisher kaum oder nur zu geringen Anteilen berücksichtigt. Dies wird in den folgenden Abschnitten zum aktuellen Stand der Technik im Bereich der Fahrerverhaltensmodellierung aufgezeigt und diskutiert.

2.1.2 Kognitive Fahrerverhaltensmodelle

Aktuelle Fahrerverhaltensmodelle sind stark an regelungstheoretischem Verhalten der Agenten in Längs- und Querbewegung orientiert und berücksichtigen nur unzulänglich menschliche physiologische und kognitive Fähigkeiten, Fertigkeiten und Beschränkungen. Darüber hinaus fehlt in den meisten Modellen die Hinterlegung stochastischer Verteilungen, nach deren Prinzip das Verhalten der Agenten parametriert wird. Häufig liegen nur unzureichend detaillierte Beschreibungen der Modellparameter sowie der Verknüpfung der einzelnen Module vor, um die Inhalte und den Aufbau dieser Modelle vollumfänglich bewerten zu können. Die folgenden Abschnitte beinhalten deshalb die Argumentation über Vor- und Nachteile der beschriebenen Modelle basierend auf dem Wissensstand der Autorin aufgrund der zugänglichen Literatur über die beschriebenen Fahrermodelle.

Ein zentraler Aspekt, der in aktuellen Fahrermodellen zwar zum Teil erwähnt, allerdings vordergründig deterministisch und basierend auf theoretischen Grundlagen und Daten aus verfügbarer Literatur angelegt ist, ist die Berücksichtigung der individuellen Unterschiede im

[12] Top-down-Prozesse basieren auf bewussten Handlungen, wie z.B. Blickzuwendungen in die Rück- und Seitenspiegel bei Beabsichtigen eines Fahrstreifenwechsels, während Bottom-up-Prozesse unbewusst und gesteuert durch externe, saliente Reize erfolgen, wie z.B. automatische Blickzuwendung in das Kombiinstrument bei Erscheinen einer roten Kontrollleuchte oder nach vorne bei Aufleuchten von Bremslichtern vorausfahrender Fahrzeuge

Fahrerverhalten. Fahrermodelle, die unterschiedliche Fahrerzustände oder persönliche Präferenzen, Einstellungen oder Voraussetzungen berücksichtigen (z.B. Sicherheitsbedürfnis oder Fahrvermögen), sind dahingehend zu unzureichend dokumentiert, als dass diese für die Verkehrssimulation im Kontext der Bewertung der Wirksamkeit automatisierter Fahrfunktionen übernommen werden könnten. Dokumentationen der zugrundeliegenden Datenbasis dieser Modelle liegen zum Großteil nur in geringer Tiefe vor und sind damit nicht ausreichend nachvollziehbar. Es fehlen häufig detaillierte Informationen dazu, worauf die Inhalte der Modelle basieren und ob für die Umsetzung der Fahrermodelle verlässliche Daten aus empirischen Erhebungen herangezogen wurden. Für die Validität und Reliabilität der Ergebnisse der Verkehrssimulation zum Zweck der Bewertung der Wirksamkeit automatisierter Fahrfunktionen bezüglich deren Sicherheit ist die Nachvollziehbarkeit und Validität der verwendeten Modelle jedoch zwingend erforderlich.

Bestehende Modelle können einerseits in sehr generische kognitive Architekturen mit einem breiten Anwendungsspektrum (auch außerhalb der Verkehrssimulation) sowie andererseits in spezifische Fahrerverhaltensmodelle, die insbesondere in simulierten Verkehrsumgebungen verwendet werden, eingeteilt werden. Außerdem existieren Modelle, die sehr spezifisch für die Verkehrssimulation entwickelt wurden, menschliche Kognition berücksichtigen und die Interaktion zwischen Fahrzeug, Fahrer und Umgebung abbilden können. Stellvertretend für diese Bereiche werden nachfolgend vier ausgewählte Modelle erläutert. ACT-R (= *Adaptive Control of Thought-Rational*) von Lebière und Anderson (1993) ist ein sehr generisches Modell zur Abbildung kognitiver Prozesse, das in der Literatur vielfach zitiert wird und in unterschiedlichen Kontexten Anwendung findet. Für den zweiten Bereich, d.h. zur Verwendung von Fahrermodellen in der Fahrsimulation, wird häufig das Fahrermodell TRM (=TRaffic Modelling)[13] der Simulationsumgebung PELOPS (= Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) von Ludmann (1998) und Diekamp (1995) verwendet. Mit TRM kann durch Strömungsgleichungen ein Fahrerpulk aufgesetzt werden, aus denen sich ein zumutbarer Verkehrsfluss ergibt. Anschließend werden in diesem Abschnitt drei Fahrerverhaltensmodelle beschrieben, die sowohl menschliches Verhalten als auch kognitive Informationsverarbeitungs-, Gedächtnis- und Entscheidungsprozesse beinhalten und die Interaktion zwischen Fahrzeug, Fahrer und Umgebung abbilden. COSMODRIVE (= COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr) ist ein komplexes kognitives Fahrerverhaltensmodell, das von Delorme (2001) entwickelt wurde. Der Aufbau von COSMODRIVE erinnert stark an bestehende Theorien der Ebenen der Fahrzeugführung und weist damit einen starken Bezug zum Human Factors Bereich auf. Ein hingegen sehr spezifischer Modellierungsansatz für die Verkehrssimulation ist das SSDRIVE-Modell (= Simple Simulation of DRIVEr Performance), das in vereinfachter Form vor allem den Fokus auf die Abbildung der Interaktion zwischen Fahrzeug, Fahrer und Umgebung in der Verkehrssimulation richtet. Das SCM (= Stochastic Cognitive Model) kombiniert einige dieser Ansätze und ist ein stochastisches kognitives Fahrerverhaltensmodell mit submodularem Aufbau, das menschliches Verhalten von der Informationsaufnahme über kognitive Verarbeitungs- und Entscheidungsprozesse bis hin zur Handlungsumsetzung abbildet und diese basierend auf stochastischen Prinzipien quantifiziert. Das SCM wurde für die virtuelle Wirksamkeitsbewertung von FAS und automatisierten Fahrfunktionen entwickelt und wird in der Simulationsumgebung OpenPASS (= Open Platform for the Assessment of Safety Systems; vgl. Wang et al., 2018) verwendet. Der Aufbau des SCM und dessen Einbettung in die Verkehrssimulation zur Bewertung der Wirksamkeit von FAS und automatisierten Fahrfunktionen wurde vor allem durch Arbeiten von Prokop (vgl. Prokop, 2001; Prokop et al., 2014), Mai (vgl. Mai et al., 2015a; Mai et al., 2015b; Mai 2017; Mai et al., 2017), Helmer (vgl. Helmer et al., 2015), Wang und Kates (vgl. Wang et al., 2017; Wang et al., 2018) geprägt. Auch von Ring (vgl. Ring et al., 2018) und Witt (vgl. Witt et al., 2018a; Witt et al., 2018b; Witt et al., 2019) wurden bereits Erweiterungen des SCM veröffentlicht.[14] Das SCM wird als Schnittstelle der empirischen Ergebnisse der Arbeit für

[13] Dieses Fahrermodell wird auch in den Fahrsimulatorstudien der vorliegenden Arbeit verwendet, um den Umgebungsverkehr um das simulierte Fahrzeug des Probanden (= Egofahrzeug) zu erzeugen.

[14] Ein Bestandteil dieser Veröffentlichungen basieren auf Teilergebnissen der vorliegenden Arbeit.

die Abbildung von Fahrerindividualität in der Verkehrssimulation verwendet. Die Verhaltensparameter zur Beschreibung des Fahrerverhaltens werden dem SCM entnommen.

2.1.2.1 ACT-R

ACT-R (= Adaptive Control of Thought-Rational) ist ein Modell zur Abbildung kognitiver Prozesse in einer komplexen Gedächtnis- und Informationsverarbeitungsstruktur. Dabei handelt es sich nicht um ein fahrerspezifisches Verhaltensmodell, sondern vielmehr um eine allgemeine kognitive Architektur, die (visuelle) Wahrnehmungsprozesse und menschliche Informationsverarbeitungsprozesse (= Prozesse, die im deklarativen und prozeduralen Gedächtnis stattfinden[15]) mit Handlungsintentionen und dem Erlernen motorischer Handlungen verknüpft. ACT-R wurde 1993 von Anderson entwickelt und wird seither kontinuierlich von Forschern in verschiedenen Anwendungsbereichen angewandt und weiterentwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich das initiale Basismodell von Anderson (1993) beschrieben. Für Interessierte wird an dieser Stelle auf weitere Arbeiten von Anderson, Lebière und Gunzelmann verwiesen (vgl. Lebière & Anderson, 1993; Gunzelmann & Anderson, 2001; Anderson et al., 2004). Der Aufbau sowie die Inhalte von ACT-R sind in Abbildung 2.1 detailliert dargestellt.

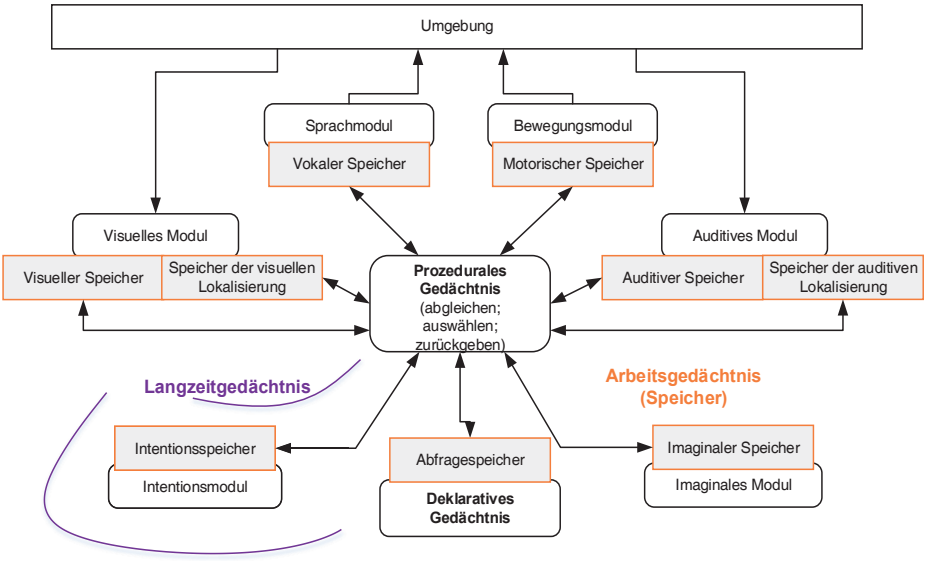

Abbildung 2.1: Architektur von ACT-R nach Lebière & Anderson (vgl. Anderson et al., 2004)

ACT-R besteht aus verschiedenen Submodulen. Der Mensch nimmt über das visuelle und auditive Modul Informationen aus der Umgebung auf, die in den jeweils dazugehörigen Speichern abgelegt werden. Zur Auswahl und Durchführung geeigneter Handlungen greift der Mensch zudem auf erlerntes und gespeichertes Wissen im deklarativen Gedächtnis zurück und verknüpft dieses mit

[15] Das deklarative Gedächtnis ist der Speicher expliziten Wissens, das bewusst abgerufen und in das Arbeitsgedächtnis transferiert werden kann (z.B. beim Lösen einer komplexen Mathematikaufgabe). Das prozedurale Gedächtnis beinhaltet implizite Fertigkeiten, die automatisiert und ohne bewusste kognitive Reproduktion oder Lösungsgenerierung abgerufen und angewandt werden können (z.B. Fahrradfahren). Diese beanspruchen im Gegensatz zu Prozessen des deklarativen Gedächtnisses kaum Kapazität in der mentalen Arbeitslast (vgl. Stangl, 2018).

den aktuell im Arbeitsgedächtnis verfügbaren Informationen über die aktuelle Situation. In Abgleich mit der individuellen Handlungsabsicht (gespeichert im Intentionsmodul) bezieht der Mensch weitere Informationen aus der Umgebung oder dem deklarativen Gedächtnis, um letztendlich aus dem vokalen und motorischen Speicher Handlungsmöglichkeiten zu wählen und somit über das Sprach- oder Bewegungsmodul eine entsprechende Äußerung oder Handlung an die Umgebung zurückzugeben (= zentrales Produktionssystem).

2.1.2.2 TRM

In Zusammenarbeit zwischen der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen GmbH Aachen (fka) und der BMW Group wurde von Ludmann (1998) und Diekamp (1995) das Verkehrsfluss-simulationsprogramm PELOPS (= Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) entwickelt. In PELOPS sind die drei wesentlichen ineinandergreifenden Verkehrskomponenten integriert, d.h. die Umwelt, der Fahrer und das Fahrzeug (siehe Abbildung 2.2). Auf die Inhalte des Umwelt- sowie des Fahrzeugmodells wird im Rahmen dieser Erläuterung nicht weiter eingegangen. Der Fokus liegt auf dem in PELOPS eingebundenen Fahrermodell TRM (= TRaffic Modelling), das die Verbindung zwischen Fahrzeug und Umwelt herstellt. TRM ist ein makroskopisches Fahrermodell und wird häufig in der makroskopischen Fahrsimulation verwendet. Mikroskopische Simulationsansätze hingegen parametrieren einzelne Agenten während bei makroskopischen Ansätzen anhand von Strömungsmodellen generischer Verkehr erzeugt wird, um einen homogenen Verkehrsfluss zu simulieren.

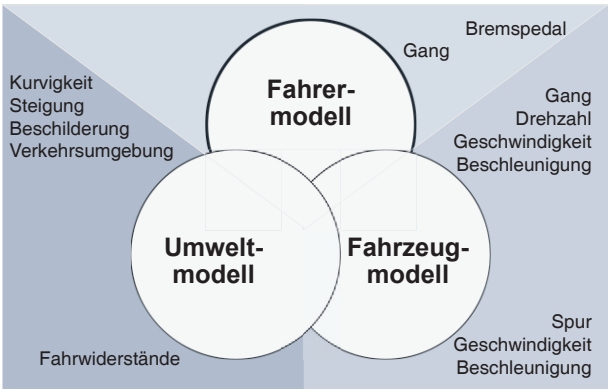

Abbildung 2.2: Ineinandergreifen der wesentlichen Verkehrselemente in PELOPS – Umweltmodell, Fahrermodell und Fahrzeugmodell (vgl. Christen & Huang, 2008)

Das PELOPS-Fahrermodell besteht aus einem Verhaltens- und einem Handlungsmodul, wobei im Verhaltensmodul die Fahrstrategie des Fahrers enthalten ist, die auf dessen Zustand und der aktuellen Umgebungssituation basiert. Das Handlungsmodul umfasst die konkreten motorischen Maßnahmen des Fahrers bzw. fahrzeugseitige Stellgrößen (z.B. Betätigung des Gaspedals). Das Fahrermodell besteht außerdem aus einem Folge- und einem Spurwechselmodell, wobei das Folgemodell in seinen Grundzügen auf dem Folgefahrtmodell von Wiedemann (1974) basiert und Abstandshaltung und Reaktion auf das Annähern an ein Vorderfahrzeug anhand von Schwellwerten verschiedener Parameter (z.B. Differenzgeschwindigkeit) regelt. Zu diesem regelbasierten Folge-modell wurde ein taktisches Verhaltensmodell hinzugefügt, das Fahrerverhalten auf mehrspurigen Fahrbahnen abbilden kann. Somit können auch Reaktionen des Fahrers auf das Verhalten von