



Lehrstuhl für Ergonomie



Technische Universität München

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Ergonomie

Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme

Dipl.-Ing. Univ. Daniel Damböck

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner,
Technische Universität Darmstadt
3. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb (i.R.)

Die Dissertation wurde am 30.04.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.07.2013 angenommen.

*„Persönlichkeiten werden nicht durch schöne Reden geformt, sondern durch Arbeit
und eigene Leistung.“*

Albert Einstein (1879 - 1955)

Meiner Familie

Danksagung

An dieser Stelle gilt mein Dank all denen, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Zuallererst sind hier Professor Klaus Bengler und Professor Heiner Bubb zu nennen, die mir die Möglichkeit gaben, mich am Lehrstuhl für Ergonomie mit dieser interessanten Arbeit zu beschäftigen. Insbesondere die von ihnen gewährte Freiheit, im Rahmen meiner wissenschaftlichen Arbeit eigene Wege gehen zu dürfen und eigene Ideen zu verwirklichen, wusste ich sehr zu schätzen. Bei Herrn Professor Hermann Winner möchte ich mich für die Erstellung des Zweitgutachtens bedanken.

Ein besonderer Dank gilt allen Kollegen am Lehrstuhl für Ergonomie, die eine überaus kollegiale und freundliche Arbeitsatmosphäre ermöglichten. Dieses Umfeld war entscheidend für ein motiviertes und kreatives Arbeiten und damit für den Erfolg meiner Dissertation. Besonders herauszuheben ist an dieser Stelle die Zusammenarbeit mit Martin Kienle, der mit seinem unermüdlichen Einsatz und seiner Hilfsbereitschaft in schwierigen Zeiten menschlich wie auch fachlich stets eine große Hilfe darstellte. Dr. Armin Eichinger möchte ich für die allgegenwärtige Hilfsbereitschaft bei Problemen der Versuchsplanung und der statistischen Auswertung danken. Dino Bortot gilt mein Dank für die Übernahme der Vorlesung Produktionsergonomie. Nicht vergessen möchte ich meinen ehemaligen Betreuer und Kollegen Martin Wohlfarter, der mein Interesse an der Ergonomie weckte und förderte. Des Weiteren möchte ich die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Kollegen der DFG-Projekte „H-Mode“ und „Conduct-by-Wire“ nicht unerwähnt lassen. Ein besonderer Dank gilt Professor Frank Flemisch für die interessanten und fordernden Diskussionen.

Nicht zu vergessen sind natürlich auch die zahlreichen Studenten, die mich im Rahmen dieser Arbeit sowie bei begleitenden Projekten tatkräftig unterstützten. Diesbezüglich möchte ich mich besonders bei meinem ehemaligen Diplomanden und jetzigen Kollegen Thomas Weißgerber für die produktive Zusammenarbeit bedanken. Aber auch Christian Bühler, Christian Keller, Georg Eder, Irfan Kalyon, Marco Schad, Markus Lahner, Martin Albert, Matthias Steber, Michael Hofmann, Norman Starflinger, Philip Riepl und Simon Claasen gebührt Dank für ihre Unterstützung bei der Durchführung der hier vorgestellten Versuche.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mir meinen Weg bis hierher überhaupt erst ermöglichten. Allen voran gilt mein Dank jedoch meiner Frau Ilona, die während der gesamten Zeit die wichtigste Stütze für mich war und mir auch in schwierigen Zeiten stets mit vollem Einsatz zur Seite stand.

Garching, den 21.04.2013

Zusammenfassung

„Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme“

Anzahl und Funktionsumfang von Fahrerassistenzsystemen nehmen immer weiter zu, mit dem Fernziel autonom fahrender Fahrzeuge. Die mit dieser Entwicklung verbundene Entlastung des Fahrers von der Fahraufgabe bietet eine Reihe unbestreitbarer Vorteile. Gleichzeitig wandelt sich die Rolle des Menschen in der Fahrzeugführung. Durch steigende Automationsgrade wird die aktive Interaktion mit dem Fahrzeug ersetzt durch eine Überwachung des Systems mit gelegentlichen Eingriffen zur Änderung von Sollvorgaben für die Automation oder zur Parametrierung der Systemfunktionen. Anhand zweier Versuche wird der Frage nachgegangen, wie sich die Herausnahme des Fahrers aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis auf das Fahrerverhalten auswirkt. Im Vordergrund steht dabei insbesondere die Fragestellung, welche Zeit einem Fahrer zur Verfügung gestellt werden muss, um in bestimmten Situationen die Fahraufgabe von der Automation übernehmen und adäquat reagieren zu können.

Abstract

“Automation Effects in Vehicles – From Reaction to Take-Over”

Number and functional range of Driver Assistance Systems are steadily increasing, aiming on autonomous cars in the future. Associated with this development is a relief of the driver from the driving task, which offers some undeniable advantages. At the same time, the human role within the task vehicle-guidance is changing. The active interaction between driver and car is replaced by a monitoring of the automation-system with occasional interventions of the driver. Based on two experiments the question is explored how this release from the driving task affects the behavior of the driver. The main focus thereby is on the question how much time the driver needs to take over control of the vehicle from the automation in certain situations and handle them appropriately.



INHALTSANGABE

1 EINLEITUNG..... 1

1.1 Motivation 1

1.2 Fragestellungen 5

1.3 Aufbau und Zielsetzung 7

2 GRUNDLAGEN DES MENSCH-MASCHINE-SYSTEMS 10

2.1 Informationsverarbeitung 10

2.1.1 Aufmerksamkeit..... 15

2.1.2 Aktivierung 18

2.1.3 Belastung – Beanspruchung 19

2.2 Situationsbewusstsein 21

2.3 Modelle der Fahraufgabe..... 27

3 ASSISTENZ UND AUTOMATION 36

3.1 Definition der Automation..... 36

3.2 Einteilung der Fahrerassistenzsysteme 36

3.3 Automationsgrade..... 40

3.4 Automationseffekte 47

3.5 In-the-Loop / Out-of-the-Loop 50

3.6 Von der Reaktions- zur Übernahmezeit..... 52

4 FORSCHUNGSBEDARF 55

4.1 Bestehende Forschung..... 55

4.2 Auswirkungen steigender Automation auf das Fahrerverhalten..... 59

4.3 Identifikation der Übernahmedauer..... 60

5 MESSTECHNIK 62

5.1 Fahrsimulator – grundsätzlicher Versuchsaufbau 62

5.2 Blickerfassung 63

5.3 Videoauswertung..... 64



6	VERSUCHSREIHEN	65
6.1	Nebenaufgabenbearbeitung in Abhängigkeit vom Automationsgrad	65
6.1.1	Methodik	65
6.1.1.1	Versuchsaufbau	65
6.1.1.2	Probandenkollektiv	69
6.1.1.3	Versuchsablauf	70
6.1.1.4	Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen	72
6.1.2	Hypothesen.....	75
6.1.3	Ergebnisse.....	78
6.1.3.1	Blickverhalten	78
6.1.3.2	Leistung in der Nebenaufgabe	88
6.1.3.3	Reaktion in Eingriffsszenarien	89
6.1.3.4	Reaktionszeiten	92
6.1.3.5	Workload.....	97
6.1.3.6	Blinzelfrequenz und Scanningverhalten	98
6.1.4	Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion	100
6.2	Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Autofahren	107
6.2.1	Methodik	107
6.2.1.1	Versuchsaufbau	107
6.2.1.2	Probandenkollektiv	114
6.2.1.3	Versuchsablauf	115
6.2.1.4	Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen	117
6.2.2	Hypothesen.....	119
6.2.3	Ergebnisse.....	121
6.2.3.1	Objektive Bewertung – Aufgabenbewältigung.....	121
6.2.3.2	Sicherungsverhalten.....	123
6.2.3.3	Subjektive Bewertung – Komfortempfinden	127
6.2.3.4	Übernahmephasen	129
6.2.4	Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion	137



7	ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	144
7.1	Ausgangssituation	144
7.2	Erkenntnisgewinn	146
7.3	Integration in ein Konzept zum Transitionsmanagement	148
7.4	Weiterer Forschungsbedarf	151
7.5	Von ADAS zur Kooperation	153
8	LITERATURVERZEICHNIS	155
	ANHANG A	170
A.1	Instruktionen Studie 1	170
A.2	NASA-TLX	175
	ANHANG B	176
B.1	Instruktionen Studie 2	176
B.2	Boxplots der Zeiten in den Übernahmephasen	179
B.3	Trajektorien	181



1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit der Erfindung des Automobils, Ende des 19. Jahrhunderts durch Karl Benz bzw. Gottlieb Daimler, haben motorisierte Fahrzeuge einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung des menschlichen Bedürfnisses nach individueller Mobilität geleistet. Die Anzahl zugelassener Kraftfahrzeuge ist seitdem gestiegen, von 27.026 bei der ersten Bestandsaufnahme im Jahr 1907 auf 57.441.559 Fahrzeuge im Jahr 2007 (Statistisches Bundesamt 2010). Aufgrund der Wirtschaftskrise und der Einführung der Umweltprämie für Altfahrzeuge hat sich die Anzahl zugelassener Fahrzeuge im Jahr 2008 zwar um ca. 6 Millionen Fahrzeuge verringert, seitdem zeigt sie jedoch wieder eine aufsteigende Tendenz. Betrachtet man das gesamte heutige Bundesgebiet im mittelfristigen Zeitraum von 1970 bis 2009, hat sich der Kraftfahrzeugbestand weit mehr als verdoppelt (Abbildung 1-1). Die Fahrleistung ist im Vergleich zum Referenzjahr sogar auf das Dreifache gestiegen.

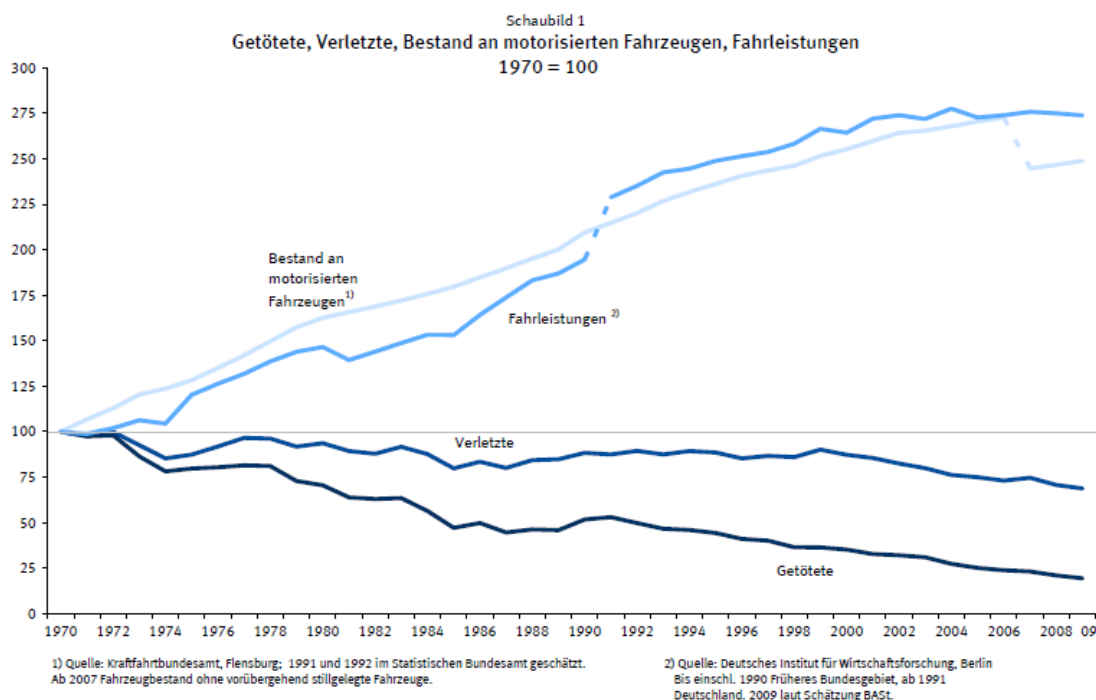


Abbildung 1-1: Entwicklung von Kraftfahrzeugbestand und Fahrleistung sowie Anzahl der Unfallopfer von 1970 bis 2009 (Statistisches Bundesamt 2010).

Diese Zunahme an Fahrzeugen und zurückgelegten Fahrkilometern führt unwillkürlich zu einem erheblich höheren Verkehrsaufkommen und damit verbunden zu einem erhöhten Unfallrisiko. Auch dies lässt sich durch Daten des Statistischen Bundesamtes nachweisen. So ist im betrachteten Zeitraum von 1970 bis 2009 die Anzahl poli-



zeitlich erfasster Unfälle von 1.392.007 um ca. 66 Prozent auf 2.313.453 gestiegen (Statistisches Bundesamt 2010).

Betrachtet man hingegen die Auswirkungen der Unfälle, so zeigt Abbildung 1-1, dass die Anzahl der bei Unfällen verletzten und getöteten Personen rückläufig ist. Dies ist hauptsächlich auf die Einführung passiver Sicherheitssysteme zur Unfallfolgenminderung, wie z. B. Sicherheitsgurt und Airbag (Otte 2000), sowie auf gesetzliche Vorgaben und Initiativen zurückzuführen. Mit dem Weißbuch der Europäischen Union von 2001 wurde zum Beispiel das Ziel ausgegeben, die Anzahl der Verkehrstoten bis zum Jahr 2010 europaweit zu halbieren (KOM 2001). Dies sollte durch konkrete Maßnahmen in den Bereichen Infrastruktur, menschliches Verhalten und Fahrzeugsicherheit erreicht werden. Auch wenn das Ziel nicht vollständig erfüllt wurde, so ist es dennoch gelungen, die Anzahl der Verkehrstoten ebenso wie die Anzahl der Verletzten erheblich zu senken.

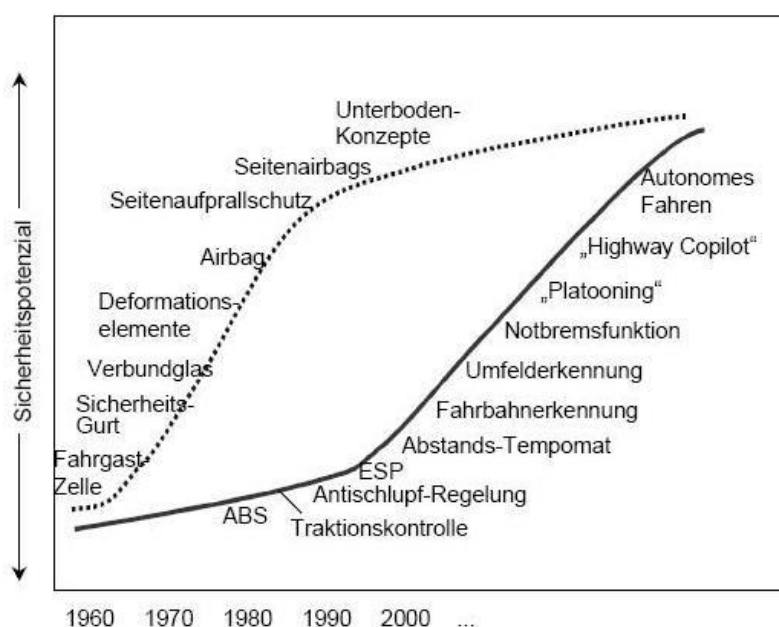


Abbildung 1-2: Potenzialausschöpfung aktiver und passiver Sicherheitssysteme (Benz 2004).

Während anfangs die passiven Sicherheitssysteme einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung der Unfallstatistiken geliefert haben, zeigt sich aktuell eine abschwächende Zunahme der Potenzialausschöpfung (Abbildung 1-2). Einschneidende Verbesserungen durch revolutionäre Entwicklungen auf diesem Gebiet sind kaum noch zu erwarten.

Auf Basis dieser Daten stellt sich die Frage, wie der Mensch in Zukunft bei der Fahrzeugführung unterstützt werden kann, damit die steigende Komplexität der Fahraufgabe, aufgrund zunehmender Verkehrsdichte, nicht zu einer Steigerung der Unfallzahlen führt. Ein hohes Entwicklungspotenzial ist hier den aktiv unterstützenden As-



sistenzsystemen zuzurechnen. Im Gegensatz zu passiven Systemen dienen diese nicht erst der Abmilderung eines bereits erfolgten Unfalles, sondern greifen bereits vorher zur Unfallvermeidung ein (Heißing 2006).

Zur Realisierung ehrgeiziger Projekte, wie der 2011 von der Weltgesundheitsorganisation WHO ins Leben gerufenen Decade of Action¹, ist es unumgänglich, die Entwicklung dieser aktiven Systeme voranzutreiben. Im Rahmen der Decade of Action soll die weltweit steigende Anzahl von 1.3 Millionen Verkehrstoten stabilisiert bzw. reduziert werden. Auch die europäische Kommission hat in diesem Zusammenhang erneut das Ziel ausgegeben, die Verkehrstoten innerhalb Europas bis 2020 zu halbieren. Einer der Bausteine ist dabei die Entwicklung und Förderung von Fahrerassistenzsystemen, um die Sicherheit von Kraftfahrzeugen zu erhöhen.

Unabhängig davon ist schon seit Beginn des 21. Jahrhunderts im bodengebundenen Verkehr unter den Stichworten „Aktive Sicherheit“ und „Fahrerassistenzsysteme“ eine Entwicklung im Gange, bei der Assistenz- bzw. Automationssysteme zunehmend in die Fahrzeugführung eingreifen. Dadurch sollen sowohl der Fahrkomfort als auch die Sicherheit erhöht werden. Assistenzsysteme wie ACC (Adaptive Cruise Control) oder LKAS (Lane Keeping Assistance System) nehmen dem Fahrer bereits jetzt Teile der Fahraufgabe ab. Darüber hinaus wird der Mensch z. B. bei der DARPA² Grand-Challenge oder der DARPA Urban-Challenge (Berger & Rumpe 2008) zu Forschungszwecken ganz aus der Fahrzeugführung genommen. Während die Wettbewerbe der DARPA auf abgesperrten Arealen bzw. Strecken durchgeführt werden, gelang einem Forschungsfahrzeug der TU Braunschweig (LEONIE) Ende 2010 eine hochautomatisierte Fahrt durch den Braunschweiger Stadtverkehr (Saust et al. 2011). Auch seitens der Automobilhersteller wird das Potenzial automatisierter Fahrzeuge untersucht (vgl. z. B. Ruchatz et al. 2011, Rauch et al. 2012). Neben den technischen Fortschritten zeigt sich auch hinsichtlich rechtlicher Aspekte eine Tendenz hin zu mehr Fahrzeugautomatisierung. In den USA haben nicht zuletzt die Erfolge des quasi-autonomen Google-Fahrzeuges (Thrun 2010) dazu geführt, dass im Bundesstaat Nevada die Assembly Bill No. 511 verabschiedet wurde (DoT 2011). Mit diesem Gesetzestext wurde in den USA der Grundstein für die Zulassung fahrerloser Fahrzeuge für den öffentlichen Verkehr gelegt.

Auch in einer Reihe von Projekten auf nationaler und europäischer Ebene wurden und werden automatisierte Assistenzsysteme zur Unterstützung und Entlastung des Fahrers adressiert (z. B. Interactive³, HAVEit⁴, H-Mode). Im Rahmen des Projektes

¹ Decade of Action for Road Safety 2011-2020

² Defense Advanced Research Project Agency

³ Accident Avoidance by Active Intervention for Intelligent Vehicles

⁴ Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport



AKTIV⁵ wurde ein System entwickelt, das integrierte Längs- und Querführung in einem Geschwindigkeitsbereich bis 180 km/h bietet (Eigel et al. 2009). Seriennähere Konzepte mit ähnlicher Ausrichtung, wie z. B. Stauassistenzsysteme (Schaller et al. 2008), bringen bereits jetzt eine hohe Automatisierung in die Fahrzeuge.

Insgesamt birgt diese Entwicklung Chancen, aber auch Risiken und Fragen. In der Luftfahrt etwa waren solche Systeme unter anderem aufgrund der geringeren Umgebungskomplexität und des geringeren Kostendrucks schon früher möglich. Die Automatisierung führte hier bei weiten Teilen der Aufgabe zu einer starken Reduktion der Beanspruchung des Piloten. Dies wurde jedoch in einzelnen Fällen durch Probleme in der Bedien- und Verstehbarkeit erkaufte (Bainbridge 1983). Die Probleme der Bedienbarkeit resultieren vor allem daraus, dass die gewohnte, direkte Interaktion mit dem zu bedienenden System (z. B. dem Fahrzeug) durch eine indirektere Interaktion über die Automation ersetzt wird. Diese muss erst erlernt werden. Darüber hinaus hat die indirekte Interaktion mit dem System über den „Vermittler“ Automation die Konsequenz, dass sich der Nutzer ein Verständnis für das Verhalten der Automation aufbauen muss. Dazu muss er sich laut Wiener (1989) klarmachen, was die Automation macht, warum sie dies macht und welche Aktionen sie im weiteren Verlauf ausführen wird („What is it doing? Why is it doing that? What will it do next?“). Da sich eine Automation für den Nutzer jedoch oft als Black-Box mit teilweise nicht nachvollziehbaren Handlungen darstellt, wird der Aufbau eines konsistenten, mentalen Verhaltensmodells erschwert, woraus Verständnisprobleme entstehen. Entsprechend beschreiben Sarter & Woods (1995) Automation als "opaque, low observable, strong, silent". Übertragen auf die Fahrzeugführung wird demnach einerseits die Komplexität der eigentlichen Fahrzeugführungsaufgabe durch eine Automation reduziert, andererseits erhöht die Intransparenz der Automationsmechanismen sowie die Interaktion mit der Automation unter Umständen die Beanspruchung des Fahrers hinsichtlich Bedienung und Verständnis des Automationsverhaltens.

Aber nicht nur die Verstehbarkeit der Automation bzw. des Automationsverhaltens an sich stellt ein Problem dar. Kraiss (1994) zeigt im Zusammenhang mit hoher Automatisierung, dass Operateure von 99 % Langeweile und 1 % Panik sprechen. Durch die Automationsunterstützung wird dem Bediener die kontinuierliche Interaktion mit dem System abgenommen, wodurch er zum Beobachter degradiert wird. Diese mangelnde Beschäftigung und die daraus resultierende Unterforderung führen in Abschnitten, in denen die Automation selbstständig arbeitet, zu Langeweile des Operators. Gleichzeitig ist der Mensch in Situationen, die die Fähigkeiten der Automation überschreiten, weiterhin gefordert, schnell als Problemlöser in Aktion zu treten (1 % Panik).

⁵ Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr



Auch Endsley und Kiris (1995) kritisieren in ihren Studien zu Automationseffekten in der Luftfahrt die mit der Entlastung des Bedieners einhergehende Herausnahme aus dem Mensch-Maschine-Regelkreis. Sie diskutieren in diesem Zusammenhang das Konzept des Situationsbewusstseins (Endsley 1995a). Demzufolge ist ein ausreichendes Verständnis der Situation Grundvoraussetzung für den Nutzer, um richtige Entscheidungen treffen und umsetzen zu können. Nach Endsley kann ein ausreichendes Situationsbewusstsein nur dann aufrechterhalten werden, wenn der Bediener in angemessener Weise mit der Umwelt und der Automation interagiert und dadurch im Regelkreis gehalten wird.

Auch im Fahrzeugbereich bedeutet die Entwicklung hin zu einer autonomen Verkehrsmittelführung einen Übergang von einer ausführenden zu einer überwachenden Tätigkeit, die sich monoton und vigilanzmindernd darstellt. Die Involvierung in die Fahraufgabe wird reduziert (Krüger et al. 2007). Im Rahmen des Projektes EMPHASIS⁶ (Buld et al. 2002) wurde gezeigt, dass Fahrer bei der Fahrt mit Assistenzsystemen dazu neigen, Systemaktionen leicht zu generalisieren und teilweise kritische Situationen nicht bzw. erst sehr spät zu erkennen. Sie sind sich also ihrer Situation nicht vollständig bewusst. Mit zunehmender Automation ist davon auszugehen, dass diese Probleme weiter in den Vordergrund treten.

1.2 Fragestellungen

Trotz aller potenziellen Probleme kann es dennoch sinnvoll sein, die Bestrebungen auf dem Gebiet der automatisierten Fahrzeugführung fortzusetzen, um das fraglos bestehende Leistungsvermögen aktiver Sicherheitssysteme zur Reduktion der Unfallzahlen zu nutzen. Forschung und Entwicklung schreiten in diesem Bereich schnell voran und gipfeln in Bestrebungen, Fahrzeuge mit Vollautomation auszustatten. Der Einsatz hochautomatisierter Systeme im Straßenverkehr innerhalb bestimmter Systemgrenzen ist wegen der stetigen Verbesserungen der Sensorik und der nachgeschalteten Signalverarbeitung inzwischen in greifbare Nähe gerückt. Dadurch ergibt sich ein mögliches künftiges Entwicklungsszenario zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts, bei dem durch eine Erhöhung des Automationsgrades die Auftrittswahrscheinlichkeit menschlicher Fehler als Unfallursache verringert werden könnte. Dieser Ansatz wird zwar aktuell in der Fachwelt kontrovers diskutiert, kann jedoch als ein mögliches Zukunftsszenario gesehen werden und ist mittlerweile angesichts des technischen Fortschritts mehr als „Science-Fiction“. Dieser Trend zeigt sich auch deutlich in der aktuellen Projektlandschaft der Forschungsinstitute und Firmen sowie in Beiträgen in einschlägigen Fachtagungen und Journals (vgl. Kapitel 4.1).

⁶ Effort Management and Performance Handling in sicherheitskritischen Situationen



Doch auch trotz der hohen Zuverlässigkeit der Sensorik und der nachgeschalteten Funktionalität werden solche Unterstützungssysteme auch in Zukunft noch zu einem gewissen Maß fehlerbehaftet sein. Daher muss der Fahrer beim Auftreten von Systemfehlern in der Lage sein, die Fehlfunktion als solche zu erkennen und entsprechend zu reagieren. Gleiches gilt für Systemausfälle, d. h. das unvorhergesehene Abschalten des Systems z. B. aufgrund technischer Probleme. Hier muss der Fahrer die Fähigkeit besitzen, in kürzester Zeit die Fahraufgabe zu übernehmen und die Fahrsituation sicher aufzulösen. Somit drängen die ursprünglich aus der Luftfahrt stammenden Probleme hinsichtlich Automations- und Out-of-the-Loop-Effekten auch im Automobilbereich immer mehr in den Vordergrund. Die im Rahmen des RESPONSE 3 - Code of Practice (Donner et al. 2007) festgelegten Anforderungen für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen müssen daher auf die Rahmenbedingungen automatisierter Fahrzeugführung angepasst werden.

Daraus ergibt sich die erste Fragestellung dieser Arbeit: Welche Auswirkungen haben steigende Automationsgrade auf das Fahrerverhalten und inwiefern wird die Erkennung notwendiger Eingriffe beeinflusst? Mit der Beantwortung dieser Frage werden Anhaltspunkte geschaffen, inwieweit der Fahrer in die Fahraufgabe eingebunden bleiben muss. Ziel ist es, die Vorteile höheren Komforts und höherer aktiver Sicherheit zu erreichen, ohne den angestrebten Sicherheitsgewinn durch das Auftreten von Automationseffekten zu reduzieren.

Unabhängig von Systemfehlern und -ausfällen ist es unwahrscheinlich, dass Automationssysteme in naher Zukunft jede erdenkliche Verkehrssituation bewältigen können. Der Fahrer wird daher auch weiterhin noch als Rückfallebene benötigt werden. Das vollständig autonom fahrende Fahrzeug als Verkehrsmittel wird auch in absehbarer Zeit nicht existieren. Aktuelle Entwicklungen wie z. B. der Staupilot zeigen jedoch, dass es bereits jetzt realistisch ist, dass Automationssysteme gewisse Teilabschnitte einer Fahrstrecke innerhalb ihrer funktionellen Systemgrenzen (z. B. Autobahnfahrt) hochautomatisiert übernehmen und den Fahrer dadurch entlasten (vgl. Schaller et al. 2008). Solange jedoch Situationen vorkommen können, die von der Automation nicht autonom gelöst werden können, muss beim Auftreten einer Systemgrenze die Fahraufgabe nach wie vor rechtzeitig und komfortabel an den Fahrer zurückdelegiert werden. Im schlimmsten Fall ist der Fahrer vor einer derartigen Übernahme vollständig von der Fahraufgabe entbunden und beschäftigt sich unter Umständen mit Nebenaufgaben, die nichts mit der Fahraufgabe zu tun haben. Um die Übergabe- / Übernahmeprozesse sicher gestalten zu können und eine Vorstellung der maximal benötigten Zeiten zu erhalten, empfiehlt es sich, Worst-Case-Szenarien zu betrachten, in denen der Fahrer völlig abgelenkt ist und erst nach einem gewissen Zeitraum die Fahraufgabe wieder voll übernehmen kann. Die für eine Übernahme benötigte Zeit kann abhängig von der zu bewältigenden Fahrsituation



und des vorhandenen Fahrerzustandes unterschiedlich lang sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der „Worst Case“ einerseits Informationen für den ungünstigsten Fall liefert, andererseits jedoch auch die unwahrscheinlichste Variante darstellt. Der Großteil der in der Realität ablaufenden Übernahmen wird unter geringerem Zeitdruck erfolgen. Diese Überlegungen führen zur zweiten in dieser Arbeit behandelten Frage: Zu welchem Zeitpunkt vor dem Erreichen einer Systemgrenze muss der Fahrer zur Übernahme aufgefordert werden, damit diese objektiv erfolgreich und in einer für den Fahrer komfortablen Art und Weise geschehen kann?

1.3 Aufbau und Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, ein Bild der Auswirkungen zunehmender Assistenz bzw. Automation auf das Verhalten und die Reaktionsfähigkeit von Fahrern zu zeichnen sowie die notwendigen Zeiträume und Abläufe von Übernahmeprozessen zu identifizieren.

Um das Zusammenspiel Fahrer, Fahrzeug und Automation verstehen und um Automationseffekte beurteilen und interpretieren zu können, wird zunächst auf die theoretischen Grundlagen der Informationsverarbeitung und der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eingegangen (Kapitel 2). Parallel dazu gibt Kapitel 3 einen kurzen Einblick in die Entwicklung der Fahrerassistenz und deren Weg zur Fahrzeugautomatisierung. Da auf diesem Weg mit unterschiedlichen Ausprägungen und Umfängen von Fahrzeugautomation gearbeitet wird und Begrifflichkeiten auf verschiedenste Weise gebraucht werden, liegt ein Hauptaugenmerk dieses Kapitels (Kapitel 3.3) auf der Darstellung und Vereinheitlichung bestehender Begriffsdefinitionen. Im Anschluss daran wird in Kapitel 4 ein Überblick über jüngste Forschungstätigkeiten zu Automationsauswirkungen im Fahrzeug vorgestellt. Darauf aufbauend werden die konkreten Forschungsthemen der Arbeit herausgearbeitet. Die zur Klärung des identifizierten Forschungsbedarfes verwendete Messtechnik ist in Kapitel 5 allgemein beschrieben. Die spezifische, nur für die jeweiligen Versuche benötigte Messtechnik sowie eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Methodik sind ebenso wie die Ergebnisse der Studien in Kapitel 6 enthalten.

Der in Kapitel 6.1 beschriebene Versuch geht gezielt der Frage nach, wie sich unterschiedliche Automationsgrade – von manuell bis hochautomatisiert – auf das Fahrerverhalten auswirken und in welcher Weise dadurch die Reaktionsfähigkeit des Fahrers auf unvorhergesehene Systemunzulänglichkeiten beeinflusst wird. Der besondere Fokus des Versuches liegt dabei auf der Tendenz des Fahrers, sich während der Fahrt mit Nebenaufgaben zu beschäftigen. Der Untersuchung ist die Annahme zugrunde gelegt, dass Fahrer beim Fahren in hohen Automationszuständen die frei werdenden Ressourcen zunehmend in eine Beschäftigung mit Nebenaufgaben investieren. Entgegen herkömmlicher Methodik wird die Leistung in einer Nebenaufga-



be hier nicht als Maß für die Entlastung des Fahrers interpretiert. Sie ist vielmehr ein Maß dafür, wie sehr der Fahrer bereit ist, sich aus der Fahraufgabe zurückzuziehen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit widmet sich darüber hinaus der Fragestellung, wie viel Zeit einem Fahrer zur Verfügung gestellt werden muss, um die Fahraufgabe an Systemgrenzen von der Automation übernehmen zu können. Der in Kapitel 6.2 vorgestellte Versuch stellt sich der Herausforderung, eben dieser Frage auf den Grund zu gehen. Dabei wird nicht nur eine Methode dargestellt, um die zur Übernahme erforderlichen Vorwarnzeiten zu ermitteln. Auch die einzelnen Phasen des Übernahmevorganges werden detailliert betrachtet. Es wird angenommen, dass die Übernahmezeit, die in dieser Form bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht wurde, eine wesentlich längere Zeitspanne als die herkömmliche Reaktionszeit umfasst. Das Wissen über den Ablauf solcher Übernahmeprozesse kann als Baustein für die Auslegung zukünftiger Assistenz- und Automationskonzepte betrachtet werden.

Auf Basis der in den Versuchsreihen ermittelten Ergebnisse wird abschließend ein Prinzip kooperativer Fahrzeugführung vorgestellt (Kapitel 7), mit dem einerseits der Fahrkomfort und die Sicherheit erhöht werden sollen, ohne den Fahrer andererseits in gefährlichem Maße aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis zu nehmen. Grundlage der skizzierten Idee ist eine Gegenüberstellung der technischen Vorausschauzeit des Automationssystems mit der Verfügbarkeit des Fahrers, woraus die Notwendigkeit einer Übernahmeaufforderung ermittelt werden kann. Eine Übersicht des Aufbaus und der methodischen Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit ist Abbildung 1-3 zu entnehmen.



Abbildung 1-3: Aufbau und methodische Vorgehensweise der Arbeit.



2 Grundlagen des Mensch-Maschine-Systems

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die theoretischen Grundlagen des Zusammenwirkens zwischen Mensch und Maschine im Allgemeinen sowie Fahrer und Fahrzeug im Speziellen. Grundlegende Theorien der menschlichen Informationsaufnahme und -verarbeitung werden vorgestellt. Aufbauend darauf wird die komplexe Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt anhand kognitionspsychologischer Modelle der Fahraufgabe beschrieben, wobei ausgehend vom allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis dargelegt wird, welche Sinneskanäle in welcher Form am Prozess der Fahrzeugführung beteiligt sind.

2.1 Informationsverarbeitung

In der Literatur sind verschiedene Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung eingeführt worden, mit deren Hilfe der Ablauf mentaler Arbeit untersucht und beschrieben werden kann. Grundsätzlich lassen sich diese theoretischen Vorstellungen in zwei Kategorien einteilen: sequenzielle und kapazitiv orientierte Modelle (vgl. Eichinger 2011).

Sequenzielle Stufenmodelle beschreiben den Informationsfluss vom aufgenommenen Reiz bis hin zur motorischen Umsetzung. Die Tatsache, dass Informationsverarbeitung Zeit benötigt, wird darauf zurückgeführt, dass die einzelnen Schritte zeitlich hintereinander durchlaufen werden müssen. Je nach Art und Anzahl der zu absolvierenden Verarbeitungsprozesse können die Dauer und Leistung der Verarbeitung variieren. Zu diesen sequenziellen Modellen gehört auch der klassische psychophysiologische Ansatz zur Beschreibung geistiger Arbeit, demzufolge primär drei Phasen des Informationsumsetzungsprozesses unterschieden werden (Schlick et al. 2010):

- Die Phase der **Informationsaufnahme** umfasst alle Prozesse zur Extraktion von Informationen aus der Umwelt mithilfe der jeweils dafür nötigen Sinnesrezeptoren (haptisch, akustisch, vestibulär, visuell, olfaktorisch, taktil) sowie deren Vorverarbeitung.
- Die Phase der **Informationsverarbeitung** im engeren Sinn umfasst das Erkennen der wahrgenommenen Informationen und die Identifikation wesentlicher Merkmale der gegebenen Situation. Aufbauend darauf werden Handlungsalternativen generiert und ausgewählt. Die Prozesse in dieser Phase können durch bereits bekannte, im Arbeits- oder Langzeitgedächtnis hinterlegte, Situations- und Handlungsmuster unterstützt werden.
- Die abschließende Phase der **Informationsumsetzung** beinhaltet motorische Reaktionen (z. B. Gesten), Aktionen zur Informationsabgabe (z. B. Sprache) sowie weitere Handlungen, die durch die Auswahl einer Handlungsalternative in der vorangegangenen Phase notwendig werden.



Den Phasen der menschlichen Informationsverarbeitung können laut Luczak (1975), wie in Abbildung 2-1 dargestellt, informatorische Arbeitsformen zugeordnet werden. Während bei der Informationsaufnahme hauptsächlich sensorische Arbeit geleistet wird, muss bei der Informationsverarbeitung unterschieden werden zwischen dem Vorgang des Erkennens bzw. Identifizierens und dem Vorgang des Entscheidens. Im Falle des Erkennens handelt es sich um diskriminatorische Arbeit. Wird zur Entscheidungsfindung aus einem im Gedächtnis vorhandenen Handlungsrepertoire ausgewählt, ist die verrichtete Arbeit kombinatorischer Natur. Signalisatorisch-motorische Arbeit, bei der tatsächliche Aktionen des Menschen erfolgen, wird in der Phase der Handlungsumsetzung geleistet. Kann bei der Handlungsauswahl und -realisierung nicht auf abgespeicherte Muster zurückgegriffen werden, so müssen die vorhandenen Informationen neu interpretiert, verknüpft und Lösungsmöglichkeiten erarbeitet werden. Dabei wird kreative Arbeit verrichtet.

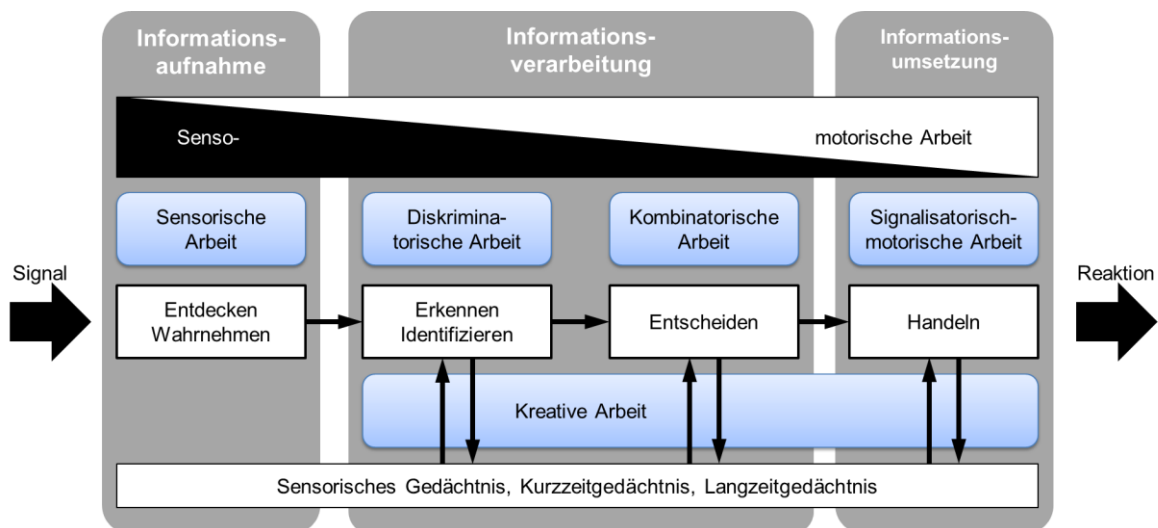


Abbildung 2-1: Zuordnung der Phasen menschlicher Informationsverarbeitung zu den jeweiligen informatorischen Arbeitsformen basierend auf Luczak (1975, zitiert in Schlick et al. 2010).

Während die anfänglichen Modelle von der Vorstellung eines strikt sequenziell ablaufenden Informationsverarbeitungsprozesses geprägt sind, „basieren spätere Kaskadenmodelle (vgl. McClelland 1979) auf der Annahme, dass mehrere Prozesse simultan anlaufen und sich gleichzeitig fortpflanzen“ (Schlick et al. 2010). Diese Parallelität der Informationsverarbeitung findet sich auch in den Regulationsebenenmodellen wieder. Ein Beispiel hierfür ist die Taxonomie der drei Ebenen des menschlichen Verhaltens nach Rasmussen (1983). Der Unterschied zu den Kaskadenmodellen besteht darin, dass die Prozesse der Informationsverarbeitung in drei Hierarchieebenen eingeteilt werden. Die drei Ebenen spiegeln den Unterschied in der Informationsverarbeitung wider, der z. B. durch Training oder Erfahrung entsteht. Dadurch ergibt sich wie bei anderen Modellen auch, eine Abstraktion des Verhaltens nach bewusster oder unbewusster Abhandlung der mentalen Prozesse. Nach dem Vorbild



der Kaskadenmodelle können diese Ebenen simultan bearbeitet werden (Abbildung 2-2). Innerhalb der jeweiligen Hierarchieebenen folgen die Subprozesse weiterhin einem sequenziellen Ablauf. Durch das Training einer Handlung bzw. die Bekanntheit einer Situation werden, wie im Modell von Luczak (1975) beschrieben, Handlungs- und Situationsmuster im Gedächtnis hinterlegt. Diese können automatisiert ablaufen und damit den Informationsverarbeitungsprozess beschleunigen.

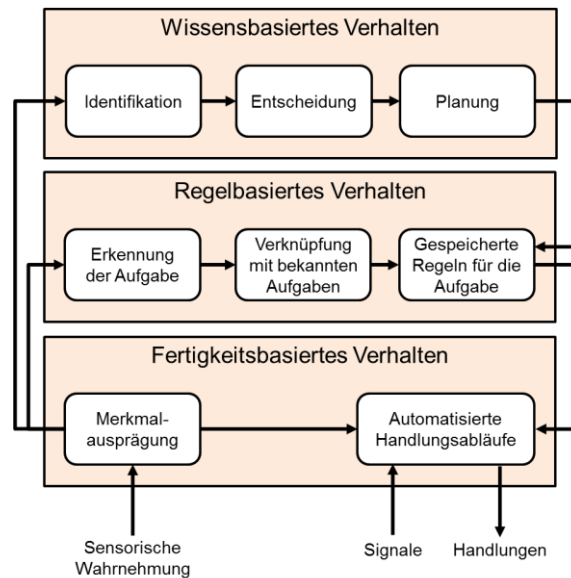


Abbildung 2-2: Taxonomie der Regulationsebenen nach Rasmussen (1983).

Hier wird unterschieden, ob Informationen auf einem bewussten oder unbewussten Niveau verarbeitet werden. Die Ebenen menschlichen Verhaltens nach Rasmussen teilen sich wie folgt ein:

- **Fertigkeitsbasiertes Verhalten (skill-based):** Auf der untersten Ebene des SRK-Modells findet eine unbewusste Handlungsregulation statt, die durch erlernte oder intuitive sensomotorische Handlungsmuster geprägt ist. Aufgrund der hohen Automatisierung der hier ablaufenden Prozesse sind nur geringe mentale Kapazitäten notwendig. Beispiele für fertigkeitsbasiertes Handeln sind alle hoch geübten Interaktionen mit Geräten, wie z. B. Lenken, Kuppeln oder Schalten eines Kraftfahrzeugs bei erfahrenen Fahrern.
- **Regelbasiertes Verhalten (rule-based):** Die mittlere Ebene wird charakterisiert durch bewusste Handlungsregulation auf Basis gemachter Erfahrungen. Bekannte Handlungsmuster werden in Form einer Wenn-dann-Analyse bezüglich der vorliegenden Situation auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft und ausgewählt. An einer unbekanntem Kreuzung würde sich ein Fahrer z. B. anhand der erlernten Verkehrsregeln und der vorliegenden Kreuzungssituation dafür entscheiden zu fahren oder anzuhalten.



- **Wissensbasiertes Verhalten (knowledge-based):** Auf dieser Ebene ist der Grad der mentalen Beanspruchung am höchsten, da hier mit Hilfe strukturierter Handlungsmodelle unbekannte Situationen aufgelöst werden müssen. Da nicht auf bekannte Handlungsmuster zurückgegriffen werden kann, müssen unter Zuhilfenahme von vorhandenem, allgemeinen Wissen verschiedene Vorgehensstrategien für eine Situation entworfen, gegeneinander abgewogen und ausgewählt werden. Beispiel hierfür wäre ein Fahrer, der zum ersten Mal anstatt mit Automatik mit einem Handschaltgetriebe fährt. Aus abgespeichertem Wissen ist ihm bekannt, welche Stellteile wie zu bedienen sind, er muss sich aber anfangs vor jedem Schaltvorgang das genaue Vorgehen bewusst machen und sich einen Handlungsplan zurechtlegen.

Je bewusster eine Handlung abläuft, umso mehr mentale Ressourcen sind erforderlich und umso länger dauert die Ausführung. Durch Training und Erfahrung können Handlungs- und Situationsmuster auf eine unbewusstere Ebene transferiert und dadurch schneller abgerufen werden. Als Beispiel hierfür lässt sich ein Fahrschüler anführen, dessen Umgang mit den Fahrzeugbedienelementen sich im Laufe der Zeit von der wissensbasierten auf die fertigkeitsbasierte, d. h. von einer bewussten auf eine unbewusste Ebene verlagert. Ebenso ist es jedoch auch möglich, dass selten benötigte Muster und Strategievorlagen verlernt werden, wodurch sich Handlungen von einer automatisierten Reaktion zu einem bewussten Entscheidungsprozess verändern.

Die in den Kaskaden- und Regulationsmodellen eingeführte Vorstellung der Parallelität ablaufender Prozesse beinhaltet bereits die Notwendigkeit der Aufteilung vorhandener Bearbeitungsressourcen. Sie ist damit Grundlage für die Entwicklung kapazitiver Informationsverarbeitungsmodelle. Diese legen nicht den Zeitverbrauch der menschlichen Informationsverarbeitung zugrunde, sondern gehen von limitierten Ressourcen (Norman & Bobrow 1975) zur Ausführung von Entscheidungsprozessen aus. Erste Modelle gingen dabei von einem einzelnen Ressourcenpool aus (z. B. Broadbent 1958, Treisman 1964, Sanders 1983). Nach Kahneman (1973) kann diese Kapazität je nach Bedarf bzw. bewusster Entscheidung unterschiedlichen Prozessen zugeordnet werden.

Ein mehrdimensionales Modell der Struktur mentaler Ressourcen proklamiert Wickens (1992). Er unterscheidet vier voneinander getrennte Freiheitsgrade, die er mit Wahrnehmungsmodalität (auditiv, visuell), Verarbeitungsstufe (Perzeption, Kognition, Reaktion) und Kodierung (räumlich, verbal) bzw. Antwort (motorisch, sprachlich) benennt (Abbildung 2-3). Die Begriffe Kodierung und Antwort sind sich in hohem Maße ähnlich und beziehen sich streng genommen auf dieselbe Dimension. Kodierung beschreibt dabei die Eingangsseite des Informationsverarbeitungsprozesses und damit die Art der dargebotenen Information. Demgegenüber steht auf der Ausgangsseite



des Informationsverarbeitungsprozesses die Antwort als beschreibende Größe für die Modalität der erfolgten Reaktion.

Nach Wickens & Liu (1988) lässt die menschliche Leistung bei der Durchführung mehrerer Aufgaben dann nach, wenn sie gemeinsame Ressourcen benötigen. Belegen z. B. zwei Aufgaben denselben sensorischen Kanal für die Informationsaufnahme (visuelle Haupt- und Nebenaufgabe) kommt es zu Interferenzen und damit einer Aufteilung der Kapazität, was zu einer Minderung der Gesamtleistung führt. Demgegenüber können zwei Aufgaben mit guter Leistung erfüllt werden, wenn sich die Informationsdarbietung auf separate Modalitäten (akustisch und visuell) aufteilt (Trouvain & Schlick 2006, 2007).

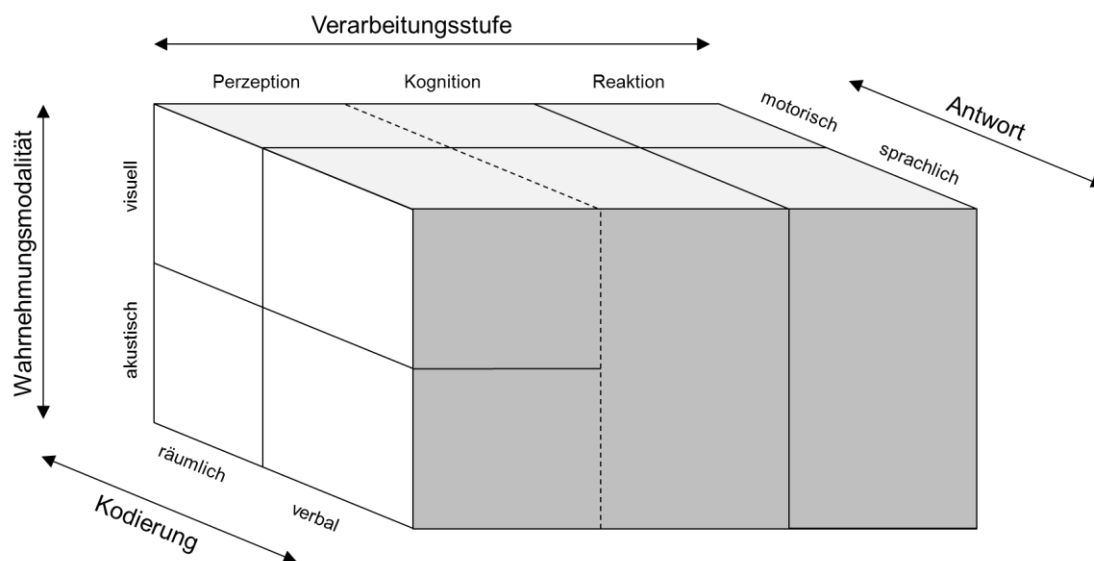


Abbildung 2-3: Struktur des mehrdimensionalen Ressourcenmodells nach Wickens & Hollands (1999).

Auch in den anderen Dimensionen führt eine gleichzeitige Beanspruchung von Ressourcen zu einer Kapazitätsaufteilung und damit zu einer verminderten Leistungsfähigkeit. Zusammengefasst besagt die Modellvorstellung von Wickens, dass Aufgaben, die bezüglich der Dimensionen des Modells der Mehrfachressourcen unterschiedlich strukturiert sind, unter weniger Leistungseinbußen gleichzeitig ausgeführt werden können als ähnlich strukturierte Aufgaben. Ein Kritikpunkt des Modells von Wickens und Hollands ist, dass bezüglich der Wahrnehmung nur die beiden Modalitäten akustisch und visuell berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Fahraufgabe spielen jedoch auch weitere Sinneskanäle bei der Informationsaufnahme eine Rolle. Grundsätzlich stellt sich die Frage, nach welchen Gesichtspunkten die begrenzt vorhandenen mentalen Kapazitäten den Komponenten des Informationsverarbeitungsprozesses zugeordnet werden.

Um die Mechanismen dieser Ressourcenverwaltung zu beschreiben, finden sich in der Literatur aktivierungs- und aufmerksamkeitstheoretische Konzepte. Nach San-



ders (1983) erfolgt die Aktivierung der einzelnen Phasen der Informationsverarbeitung stufenspezifisch, wobei den Prozessschritten der Informationsaufnahme und -strukturierung (Wahrnehmen und Erkennen) das Aufmerksamkeits-System (Arousal) und den Entscheidungs- und motorischen Prozessen das Aktivierungs-System (Activation) zugeordnet werden kann (Abbildung 2-4).

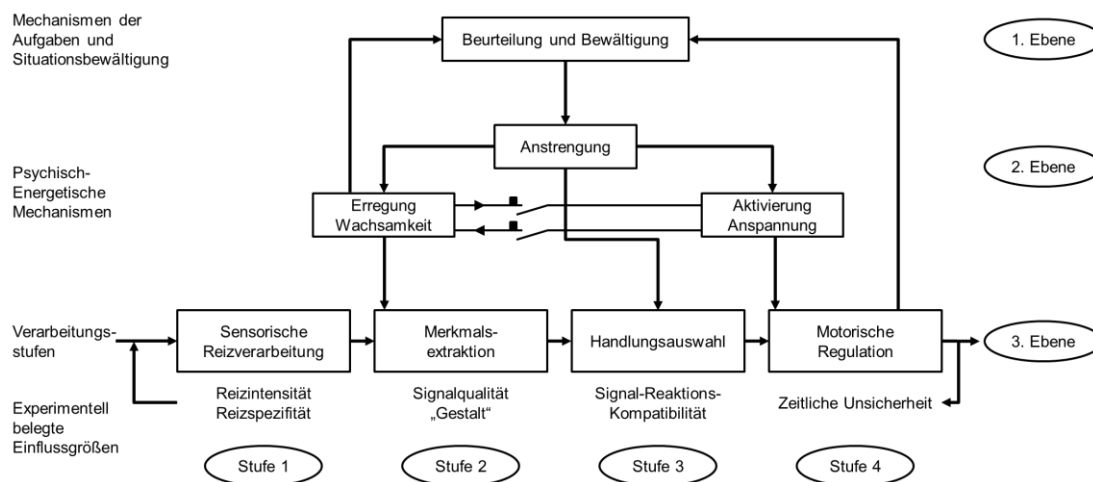


Abbildung 2-4: Anstrengungsregulation bei der Informationsaufnahme nach Sanders (1983).

Ähnlich zu der beschriebenen Modellvorstellung nach Sanders (1983) unterteilen Pribram & McGuinness (1975, zitiert in Manzey 1998) den Aktivierungsmechanismus in drei miteinander interagierende Untersysteme, die zusammen den Grad der Aktivierung des Menschen und damit seine mentale Belastung bestimmen:

- ein **Arousal-System**, zur Steuerung selektiver Aufmerksamkeitsprozesse sowie physischer Aktivierungsprozesse, insbesondere um Orientierungsreaktionen auf neuartige Wahrnehmungen auszulösen,
- ein **Activation-System**, das motorische Prozesse kontrolliert und durch Vorbereitung des Bewegungsapparates eine erhöhte Reaktionsbereitschaft auslöst und
- ein **Effort-System**, das die beiden vorangegangenen Systeme koordiniert.

Im Folgenden sollen diese aktivierungs- und aufmerksamkeitstheoretischen Prozesse näher beschrieben werden.

2.1.1 Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeit ist allgemein definiert als ein Zustand fokussierten Bewusstseins auf eine Teilmenge der verfügbaren, wahrnehmbaren Informationen (Gerrig & Zimbardo 2008). Da der Benutzer eines Systems seine Aufmerksamkeit nicht allen Informationsquellen gleichzeitig zuwenden kann, ist sie als eine begrenzte Ressource



zu sehen. Unterschiedliche Informationsquellen konkurrieren um die Zuteilung von Aufmerksamkeit ebenso wie die einzelnen Schritte des Informationsverarbeitungsprozesses. Ist ein Benutzer z. B. damit befasst, eine Entscheidung zu treffen, so wird er Aufmerksamkeitsdefizite in seiner Umfeldwahrnehmung aufweisen. In der Literatur sind unterschiedliche Modelle von Aufmerksamkeit zu finden. Nach Eichinger (2011) können sie danach unterschieden werden, ob ein einzelner Reiz ungestört von weiteren Einflüssen verarbeitet werden soll, oder ob mehrere Reize gleichzeitig zu verarbeiten sind.

Selektive Aufmerksamkeit:

Die selektive Aufmerksamkeit wird als die Fähigkeit verstanden, sich über einen kurzen Zeitraum relevanten Merkmalen einer Reizkonstellation aktiv zuzuwenden und gleichzeitig irrelevante Aspekte von Reizen (z. B. Störreize) zu ignorieren oder zu unterdrücken. Dies kann sowohl bewusst (kontrolliert) wie auch unbewusst (automatisch) geschehen. Die bewusste Fokussierung ergibt sich aus der beschränkten Ressourcenkapazität in der menschlichen Aufmerksamkeitszuwendung (Müller & Krumenacher 2002).

Im Filtermodell nach Broadbent (1958) wird der Wahrnehmungsapparat des Menschen als einkanaliger Prozessor mit begrenzter Kapazität gesehen. Das Modell dient als Grundlage zur Analyse von Interferenzeffekten und Fehlern bei der Systembedienung durch Operateure (vgl. Reason 1970). Informationsumfänge, die die Kapazität des Prozessors überschreiten, können nicht verarbeitet werden. Informationen aus der Umwelt werden aufgenommen und auf Grundlage einfacher sensorischer Merkmale (z. B. Tonhöhe, Lautstärke, Helligkeit, etc.) gefiltert. Nur relevante Informationen passieren diesen Filter und werden später semantisch weiterverarbeitet. Dabei erfolgt der Wechsel zwischen verschiedenen sensorischen Kanälen langsam, etwa zwei Mal pro Sekunde (Eichinger 2011). Entsprechend dieser Vorstellung könnten Informationen die den Filter nicht passieren, auch nicht weiter verarbeitet werden (Abbildung 2-5).

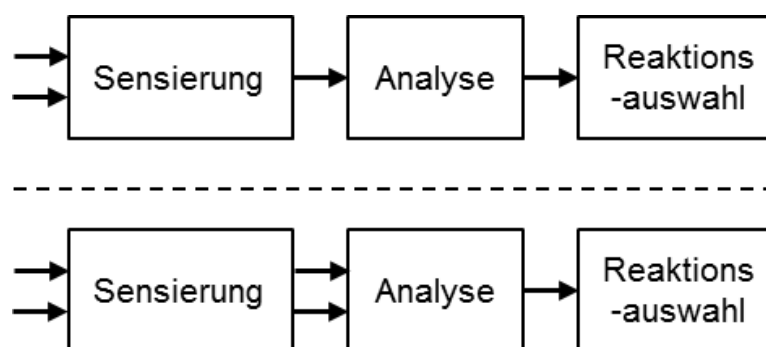


Abbildung 2-5: Filter nach Broadbent (oben) sowie Deutsch & Deutsch (unten).



Dem Abschwächungsmodell von Treisman (1964) zufolge wird die gefilterte Information nicht komplett verworfen, sondern nur gedämpft und kann unter Umständen weiterverarbeitet werden. Der Filter stellt in diesem Fall also keine grundsätzliche, sondern eine relative Barriere dar. Nach Deutsch und Deutsch (1963) erfolgt die Auswahl der Information nicht bereits während der Wahrnehmung, sondern erst im Laufe der Informationsverarbeitung. Moray (1986) geht in seinem Modell davon aus, dass Informationen nicht nur über einen, sondern über mehrere Kanäle übertragen werden können.

Ein wichtiger Aspekt der Filtermodelle ist die Art und Weise, nach der die Auswahl der weiterzuverarbeitenden Informationen erfolgt. Während Bottom-Up-Effekt-Modelle von einer reizkontrollierten Filterung ausgehen, sehen „Top-Down-Cause-Modelle (vgl. Goldhammer & Moosbrugger 2005) in der Selektion ein Epiphänomen der Operation verschiedener sensorischer und kognitiver Systeme“ (Eichinger 2011, S.42). Die Modelle zur selektiven Aufmerksamkeit unterscheiden sich demnach hauptsächlich hinsichtlich folgender Eigenschaften:

- Ort / Zeitpunkt des Filters bzw. Flaschenhalses
- Anzahl der durchgängigen Kanäle
- Kontrolle der Informationsfilterung

Geteilte Aufmerksamkeit

Unter geteilter Aufmerksamkeit ist das simultane Beachten verschiedener Reize in einer oder verschiedenen Sinnesmodalitäten zu verstehen. Moray (1967) weist darauf hin, dass ein einzelner Informationskanal nicht in der Lage ist, alle Eigenschaften selektiver bzw. geteilter Aufmerksamkeit zu erklären. Es müssen daher mehrere parallel zueinander arbeitende Verarbeitungskanäle angenommen werden, zwischen denen die Aufmerksamkeit aufgeteilt wird. Die Fähigkeit zur Aufmerksamkeitsteilung ist von Verarbeitungsressourcen und von der Qualität der verschiedenen Aufgaben, die miteinander kombiniert werden sollen, bestimmt. Je ähnlicher die Aufgaben sind, umso schlechter können sie gleichzeitig ausgeführt werden. Eines der bekanntesten Modelle für geteilte Aufmerksamkeit ist das in Abbildung 2-3 vorgestellte Multiple-Ressourcen-Modell von Wickens (1980, 1984). Es beschreibt eine begrenzte Anzahl von Ressourcen und ihre Verarbeitung. Daher eignet es sich sehr gut zur Erklärung der Interferenzen zwischen Mehrfachaufgaben ähnlicher Struktur. Wickens interpretiert die Rolle der Aufmerksamkeit als „glue or emergent feature that binds together all the various components of cognition and human information processing“ (Wickens & McCarley 2008, S. 239). Nach Wickens (2008, zitiert in Eichinger 2011) setzt sich das Modell aus drei hauptsächlich Komponenten zusammen, die die Zuteilung von Aufmerksamkeit bei Mehrfach Tätigkeiten bestimmen und damit maßgeblichen Einfluss auf die Leistung haben:



- **Struktur der Ressourcen:** Bei Mehrfachaufgaben betrifft das insbesondere den Grad der Ähnlichkeit der Aufgaben. Damit können Interferenzeffekte unabhängig vom Grad der Belastung erklärt werden.
- **Ausprägung der Ressourcen-Anforderung:** Die Anstrengung, mit der auf eine Anforderung reagiert wird, ist dagegen stark abhängig vom Grad der Belastung, die von der Aufgabe gefordert wird.
- **Zuweisungsstrategie:** Die Verteilung der Ressourcen kann nach individueller Einschätzung der Anforderungen erfolgen.

Längerfristige Aufmerksamkeitszuwendung

Das Konstrukt der längerfristigen Aufmerksamkeit umfasst je nach Häufigkeit der relevanten Reize zwei Aspekte, Vigilanz und Daueraufmerksamkeit. Nach Dorsch (1970) ist Vigilanz, der „Zustand oder der Grad der Bereitschaft, kleine Veränderungen, die in der Umwelt in zufallsverteilten Zeitintervallen auftreten, zu erkennen und auf sie zu reagieren“. Vigilanz ist also die Beobachtungsleistung bei länger andauernder Beobachtungssituation, zum Teil auch unter monotonen Reizsituationen mit niedriger Reizfrequenz und damit vergleichbar mit der monotonen Überwachungstätigkeit bei hochautomatisierter Fahrt. Mit dem Begriff Daueraufmerksamkeit ist demgegenüber ein aufmerksames Beobachten mit häufig notwendigen Reaktionen verbunden, vergleichbar einer manuellen oder auch assistierten Fahrt.

2.1.2 Aktivierung

Aktivierungstheoretische Prozesse beziehen sich auf die Auslastung des Wahrnehmungs- und Reaktionsapparates. Der Vorgang der Informationsverarbeitung wird durch einen externen Reiz ausgelöst, auf den in einer bestimmten Art und Weise reagiert wird. Diese Reaktion wiederum führt zu einer Zustandsänderung, die über eine Rückkopplung wahrgenommen werden kann. Das zurückgemeldete Ergebnis ist für den Menschen ein Maß für die momentane Leistung und kann den Anforderungen und Zielen der Aufgabe gegenübergestellt werden (Schlick et al. 2010). Unter Berücksichtigung der maximal verfügbaren Kapazität und der gezeigten Leistung wird dem Informationsverarbeitungsprozess anschließend mehr oder weniger Kapazität zur Verfügung gestellt (Kahneman 1973, Abbildung 2-6), d. h. die Aktivierung steigt oder sinkt. Durch die Gegenüberstellung und Bewertung der Anforderungen einerseits und der Kapazität andererseits wird das Ausmaß der psychophysischen Aktiviertheit bestimmt. Je höher die wahrgenommenen Anforderungen sind, desto mehr Kapazitäten müssen zur Verfügung gestellt werden, um die Aktivierung kompensatorisch zu erhöhen. Dies geht mit einer steigenden Anstrengung des Menschen einher. Aufmerksamkeit kann dabei als zentrale Ressource mit zwar flexibler aber endlicher Kapazität gesehen werden. Ist eine Steigerung der Aktivierung nicht mehr möglich,



weil z. B. aufgrund mehrerer zu erledigender Aufgaben die Kapazität bereits voll ausgeschöpft ist, kann dies zu deutlichen Leistungseinbußen in der Aufgabenerfüllung führen.

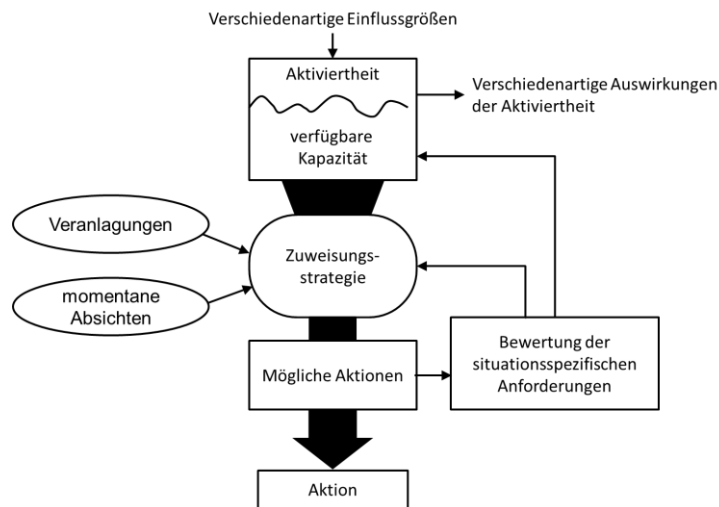


Abbildung 2-6: Modell einer zentralen Aufmerksamkeitskapazität (Kahneman 1973); basierend auf Eichinger (2011).

Die Kapazität, die dem Informationsverarbeitungsprozess zur Verfügung gestellt werden kann, ist als variabel zu sehen. So führen nach dieser Modellvorstellung Müdigkeit oder Monotonie dazu, dass sich die verfügbare Kapazität verringert. Daraus wiederum folgt, dass dem Informationsverarbeitungsprozess entsprechend weniger Ressourcen zur Verfügung gestellt werden können und Wahrnehmungen und Reaktionen negativ beeinflusst werden. Die Leistung insgesamt sinkt.

Entsprechend der Modellvorstellung führt eine Überforderung des Menschen respektive des Fahrers zu einer Leistungseinbuße aufgrund der Ausschöpfung der maximal verfügbaren Kapazität. Demgegenüber reduziert sich bei Unterforderung die temporär nutzbare Kapazität, woraus ebenfalls Leistungsdefizite resultieren.

2.1.3 Belastung – Beanspruchung

Nach Schmidtke (1973) und Bubb (1992) umfasst der Begriff Belastung alle äußeren Einflüsse, die sich aus der Aufgabenart, der Aufgabenumgebung und der Arbeitsmittel ergeben (Abbildung 2-7). Im Kontext der Aufgabenart „Fahrzeugführung“ entspricht die Aufgabenumgebung der Verkehrssituation innerhalb der sich der Fahrer durch Interaktion mit seinem Fahrzeug bzw. dem Automationssystem (Arbeitsmittel) bewegt. Die Belastung durch die Aufgabe bleibt dabei interindividuell konstant und kann zumindest qualitativ beurteilt werden. Zusammen mit individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten einzelner Personen ergeben sich unterschiedliche Beanspruchungen (z. B. je nach Können oder Trainiertheit).



Generell weisen Aufgaben nach Schmidtke (1973) physische und mentale Anforderungen auf. Die physische Komponente wird hinsichtlich der Fahraufgabe jedoch als eine zu vernachlässigende Größe angesehen. Eine weitaus größere Rolle spielen die mentalen Anforderungen.

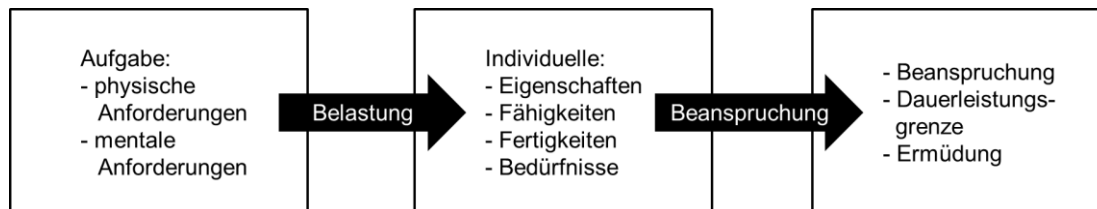


Abbildung 2-7: Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Schmidtke (1973).

Der Fahrer muss vorliegende Informationen mit erlerntem Wissen kombinieren und daraus Handlungsalternativen generieren und Entscheidungen treffen. Auch in neueren theoretischen Modellen ist das Prinzip des Belastungs-Beanspruchungs-Konzeptes erkennbar. Nach De Waard (1996) stellen sowohl die Aufgabencharakteristik als auch die Personeneigenschaften bestimmende Komponenten der Beanspruchung bzw. des Workloads dar. Den Workload sieht er wiederum als entscheidende Größe der informationsverarbeitenden Kapazität und damit der verfügbaren Leistung. Der Zusammenhang ist in Abbildung 2-8 dargestellt.

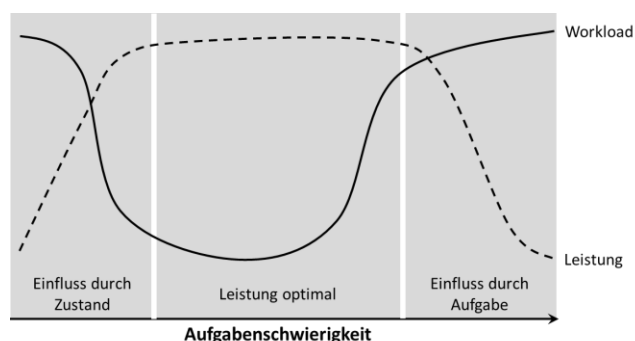


Abbildung 2-8: Zusammenhang zwischen Aufgabenschwierigkeit, Workload und Leistung nach De Waard (1996).

Die Aufgabenschwierigkeit und die daraus resultierende Anforderung an den Menschen nehmen von links nach rechts zu. Bei sehr einfachen Aufgaben führt Monotonie zu einem hohen erlebten Workload aufgrund mangelnder Aktivierung. Damit verbunden ist ein Leistungsabfall in diesem Anforderungsbereich. Bei einer mittleren Aufgabenschwierigkeit ergibt sich ein an die Anforderungen angepasstes Verhalten. Durch die Aktivierung wird die Aufmerksamkeitskapazität gesteigert. Dadurch steht hinsichtlich der Informationsverarbeitung Restkapazität zur Verfügung und die Beanspruchung bleibt dabei auf einem niedrigen Niveau. In diesem optimalen Bereich ist der Mensch also in der Lage eine gleichbleibend hohe Leistung über längere Zeit aufrechtzuerhalten und leichte Schwankungen der Anforderungen auszugleichen.



Steigt der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe weiter an, kann die Leistung zunächst durch eine Steigerung der Anstrengung konstant gehalten werden. Dabei nimmt jedoch der Workload zu. Erreicht der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe ein Niveau, bei dem die notwendige Kapazität die maximal zur Verfügung stehende Kapazität übersteigt, kommt es zu einer erheblichen Zunahme des Workloads bei gleichzeitig sinkender Leistung. Der Mensch ist überfordert. Aktivierung und Aufmerksamkeit haben die individuell festgelegten Grenzen erreicht und können nicht weiter gesteigert werden. Im Bereich links des Optimums wirkt sich demnach der Zustand der Person auf die Leistung und den Workload aus, während rechts des Optimums die Aufgabenschwierigkeit die bestimmende Größe darstellt.

Auch im Kontext der Fahrzeugführung kann diese Betrachtung verwendet werden, um den Zusammenhang zwischen Workload und Fahrleistung zu beschreiben (Gstalter & Fastenmeier 1998). Es zeigt sich eine optimale Aufgabenerfüllung, wenn sich die Schwierigkeit der Fahraufgabe auf einem mittleren Niveau befindet. Nimmt die Aufgabenschwierigkeit z. B. aufgrund einer Zusatzbelastung durch Nebenaufgaben zu, kann die Leistung auf unterschiedliche Arten konstant gehalten werden. So kann durch Einleiten von Kompensationshandlungen (z. B. Reduktion der Geschwindigkeit) wieder das gewünschte Beanspruchungsniveau erreicht werden (Fuller 2005). Dazu muss sich der Fahrer jedoch der Situation bewusst sein und basierend auf seinem persönlichen Risikoempfinden diese Maßnahmen für notwendig erachten (Wilde 1982; Dornhöfer & Pannasch 2000). Wird die Zunahme des Beanspruchungsniveaus in Kauf genommen oder ist eine Anpassung des Fahrverhaltens situativ nicht möglich, muss dem Leistungsabfall durch eine Steigerung der Aufmerksamkeit und der Aktivierung und damit einer Ressourcenerhöhung entgegengewirkt werden (Kahneman 1973). Können jedoch nicht mehr genügend Ressourcen zur Verfügung gestellt werden, ist mit einer Verschlechterung der Fahrleistung zu rechnen. Laut Gstalter & Fastenmeier (1998) äußert sich diese zunächst auf der Navigations-, dann auf der Bahnführungs- und schließlich auf der Stabilisierungsebene.

Analog zur Modellvorstellung von De Waard (1996) kann sich demnach eine Überforderung des Fahrers aufgrund von Nebentätigkeiten auf die Fahrleistung auswirken, wenn nicht mehr genug Ressourcen zur Kompensation zur Verfügung stehen. Ähnliches gilt jedoch auch für eine Unterforderung des Fahrers durch den Einsatz von Assistenz- bzw. Automationssystemen. In diesem Fall besteht die Gefahr, die Komplexität der Fahraufgabe bis hin zur Unterforderung zu reduzieren und dadurch Leistungseinbußen im Fahrerverhalten zu erzeugen.

2.2 Situationsbewusstsein

Im Forschungsbereich der menschlichen Informationsverarbeitung gibt es insbesondere seit Ende des 20. Jahrhunderts Ansätze, die beschriebenen Modelle der Infor-



mationsverarbeitung unter dem Konstrukt „Situationsbewusstsein“ zusammenzuführen. Für die Analyse, Bewertung und Interpretation menschlichen Verhaltens sind die ursprünglichen Konzepte der Informationsverarbeitung ausreichend. Um die theoretischen Grundlagen in dieser Arbeit möglichst vollständig darzustellen, wird im Folgenden dennoch auf die unterschiedlichen Modelle eingegangen, mit denen das Konzept des Situationsbewusstseins beschrieben wird.

Smith und Hancock (1995) definieren Situationsbewusstsein als „adaptive, externally directed consciousness“, wobei das Bewusstsein als der Teil des wissensgenerierenden Verhaltens interpretiert wird, der vom Menschen vorsätzlich beeinflusst werden kann. Das Situationsbewusstsein hat dabei den Zweck, innerhalb einer gegebenen Umwelt und unter Berücksichtigung einer zu erfüllenden Aufgabe, das notwendige Wissen über die Situation zu generieren und ein zielgerichtetes Verhalten zu ermöglichen. So wie die Selbstreflexion das Bewusstsein über den Menschen selbst bestimmt, bestimmt das Situationsbewusstsein den Umfang des Bewusstseins über die Umwelt (Abbildung 2-9). Anders ausgedrückt ist der Mensch in der Lage durch Selbstreflexion das Wissen über sich selbst, seine Eigenschaften und Fähigkeiten zu erweitern, während durch Situationsbewusstsein das Wissen über die Umwelt gesteigert werden kann. Situationsbewusstsein umfasst daher weit mehr als die reine Leistung bei der Erfüllung der Aufgabe. Vielmehr beinhaltet es die Fähigkeit, das Bewusstsein derart zu steuern, dass eine adäquate Leistung erst ermöglicht wird. Sie sehen in einem ausreichenden Situationsbewusstsein die Voraussetzung für die Fähigkeit, Verhalten an die Umwelt und den mit ihr verbundenen Bedingungen und Einschränkungen anzupassen, um die gestellten Aufgaben zielgerichtet erfüllen zu können. Ein ausreichendes Situationsbewusstsein basiert nach Smith & Hancock auf einer regelmäßigen Auffrischung der verfügbaren Informationen aus der Umwelt.

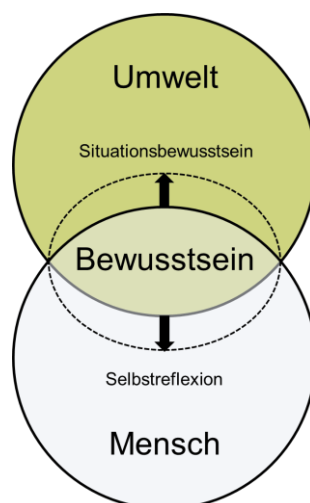


Abbildung 2-9: Modellvorstellung des Situationsbewusstseins (übersetzt und modifiziert nach Smith & Hancock (1995)). Durch Selbstreflexion kann das Bewusstsein über sich selbst, durch Situationsbewusstsein das Bewusstsein über die Umwelt gesteigert werden.



Eine weitere Definition des Begriffs Situationsbewusstsein stammt aus der Human-Factors-Forschung im Bereich der Luftfahrt. Endsley (z. B. 1988) beschreibt das Konzept des Situationsbewusstseins als „the perception of the elements in the environment within a span of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future“. Das von ihr entwickelte Modell besitzt demnach drei aufeinander aufbauende Ebenen, die verschiedene Stufen der Informationsverarbeitung repräsentieren und in denen sich das Verständnis für eine gegebene Situation entwickelt (Endsley 1995a). Dieses Verständnis für die Situation wird als Grundvoraussetzung für ein effizientes Handeln innerhalb einer komplexen und dynamischen Umwelt betrachtet (Rauch et al. 2009).

Auf der ersten Ebene müssen die vorhandenen Informationen aus der Umgebung wahrgenommen werden („perception“), um eine mentale Repräsentation der Situation zu schaffen. Auf Ebene zwei erfolgt eine Verknüpfung der Einzelinformationen, um ein Verständnis der Bedeutung der Ereignisse und Elemente zu erreichen („comprehension“). Anschließend muss auf Ebene drei aus dem erlangten Wissen über den aktuellen Zustand und das dynamische Verhalten der Objekte (Ebene 1) sowie dem Verständnis der Gesamtsituation (Ebene 2) die zukünftige Entwicklung der Situation antizipiert werden („projection“). Sämtliche Entscheidungsprozesse und Handlungsausführungen des Menschen erfolgen auf Grundlage dieser drei Ebenen und sind damit nicht Bestandteil von Situationsbewusstsein.

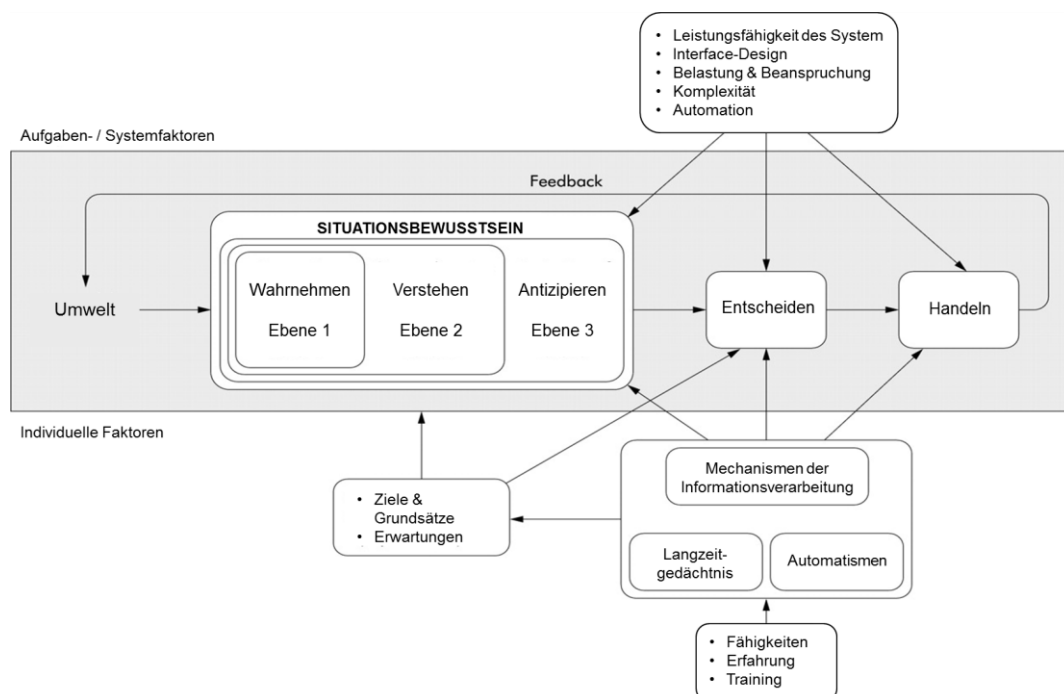


Abbildung 2-10: Modell des Situationsbewusstseins (übersetzt nach Endsley 1995a).

Wie aus Abbildung 2-10 ersichtlich, berücksichtigt Endsleys Modell des Situationsbewusstseins auch externe Faktoren. Dazu zählen neben den individuellen und per-



sonenspezifischen Faktoren wie Erfahrung, Training und Fähigkeiten auch Faktoren, die die Aufgabe selbst betreffen. So können z. B. Assistenzsysteme je nach Umfang und Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle die ursprüngliche Aufgabe verändern und somit das Situationsbewusstsein beeinflussen und damit direkt auf den Entscheidungs- und Handlungsprozess einwirken.

Bei der Bildung von Situationsbewusstsein spielen laut Endsley (2003) mentale Modelle eine besondere Rolle. Sie werden von Rouse & Morris (1985) definiert als „mechanisms whereby humans are able to generate descriptions of system purpose and form, explanations of system functioning and observed system states, and prediction of future states“. Mentale Modelle sind also innere Abbildungen der Umwelt, wie sie vom Menschen wahrgenommen wird. Sie können dabei Systeme und organisatorische Strukturen abbilden, sich aber auch auf dynamische Prozesse wie etwa die Situationsrepräsentation beim Autofahren beziehen.

Erarbeitete mentale Modelle werden im Langzeitgedächtnis gespeichert, indem durch wiederholtes Erleben, d. h. durch Erfahrung Situationsschemata gebildet werden. Wie in Abbildung 2-11 dargestellt, können diese mit dem mentalen Modell der Situation abgeglichen werden, um ein Schema zu finden, das am ehesten kompatibel mit der aktuell gegebenen Situation ist. Auf diese Weise kann ein besseres Verständnis der Situation erlangt werden, ohne das Arbeitsgedächtnis des Menschen zu überfordern.

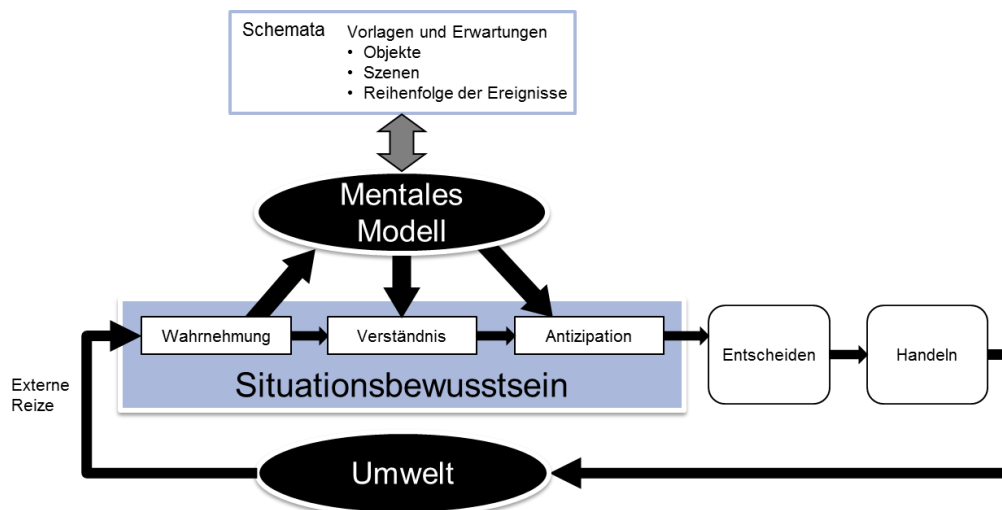


Abbildung 2-11: Zusammenhang zwischen mentalem Modell, im Langzeitgedächtnis erstellten Schemata und Situationsbewusstsein (übersetzt und modifiziert nach Jones & Endsley 2000).

Die Unterscheidung zwischen mentalem Modell und Situationsbewusstsein scheint zunächst unklar. Nach Sarter & Woods (1991) beziehen sich mentale Modelle vor allem auf Systeme oder Geräte, die durch eine endliche Anzahl an Elementen und Algorithmen beschrieben werden können. Situationsbewusstsein hingegen repräsentiert



tiert das Verständnis eines sich ständig ändernden Systems mit einer Vielzahl miteinander interagierender Einflussfaktoren. Sie unterteilen Situationsbewusstsein in vier Komponenten (Tabelle 2-1) und legen besonderes Augenmerk auf die zeitliche Dimension. Nach Sarter & Woods (1991) erfordert das Bewusstsein über den zeitlichen Ablauf der aktuellen Situation „the diagnosis of problems that are caused or influenced by precursors in the past as well as the prognosis and prevention of potential future problems based on the analysis of currently available data“.

Tabelle 2-1: Komponenten des Situationsbewusstseins und verallgemeinerte Beschreibung ihrer Bedeutung basierend auf Sarter & Woods (1991).

Komponenten	Beschreibung
Räumliches Bewusstsein („spatial awareness“)	Das Wissen über die eigene Position sowie die Relativpositionen umgebender Objekte.
Identitäts-Bewusstsein („identity awareness“)	Das Wissen über die Aufgaben und Ziele sowie das Bewusstsein über die Variablen des Systems.
Modus-Bewusstsein („responsibility awareness“)	Das Wissen, wer in welchem Umfang die Kontrolle besitzt.
Zeitliches Bewusstsein („temporal awareness“)	Wissen über den allgemeinen zeitlichen Ablauf der Ereignisse um die gesetzten Ziele zu erreichen

Bezüglich der Struktur zur Erlangung von Situationsbewusstsein greifen Sarter & Woods (1991) auf das 3-Ebenen-Modell nach Endsley (1988) zurück. Die Ebenen des Modells und die nachgeschalteten Prozesse werden zyklisch durchlaufen, wodurch eine ständige aktive Suche nach Informationen zur Aktualisierung der mentalen Repräsentation des Umweltzustandes nötig ist. Der Erfolg der späteren Ebenen ist dabei stets abhängig von der Qualität der Leistung auf der vorangegangenen Ebene.

Das Bewusstsein über die aktuelle Situation bildet die Grundlage für die Auswahl von Aktionen. Insbesondere die Antizipation der zukünftigen Entwicklung der Situation beeinflusst die Planungen und Handlungen. Nach Baumann et al. (2006) bedarf ein Modell von Situationsbewusstsein damit „auch der Spezifikation eines Mechanismus, der die mentale Repräsentation der Situation mit der Auswahl der für die so verstandene Situation am besten passenden Handlung verbindet. Die Ausführung dieser Handlung wiederum beeinflusst die Situation, sodass eine Aktualisierung des Situationsmodells erforderlich ist“.

Diese Forderung geht auf eine Definition des Konstrukts Situationsbewusstsein nach Adams et al. (1995) zurück, die Situationsbewusstsein ebenfalls als „not synonymous with performance“ ansehen. Ein zentraler Punkt ihrer Ausführungen ist, dass sie bewusst nicht zwischen dem Produkt und dem Prozess von Situationsbewusstsein unterscheiden. Adams et al. bezeichnen eine solche Unterscheidung abhängig vom



Einsatzzweck zwar durchaus als zu rechtfertigen und führen dazu Sarter & Woods (1991) an, kritisieren aber gleichzeitig, dass so eine zu starke Trennung zwischen Wissen und Verhalten suggeriert wird. Ihrer Meinung nach sind das Wissen und Verhalten viel mehr miteinander verflochten. Einerseits wird das Bewusstsein über eine gegebene Situation durch den auch bei Endsley (1995a) beschriebenen Prozess der Informationsaufnahme und -verarbeitung erzeugt und beeinflusst. Andererseits ist das Vorgehen bei dieser Informationsgewinnung abhängig vom vorhandenen Bewusstsein über und damit den Erwartungen an eine gegebene Situation.

Der Prozess und das Produkt von Situationsbewusstsein sind daher in hohem Maße voneinander abhängig und beeinflussen sich gegenseitig. Aufbauend auf dem in Abbildung 2-12 dargestellten „expanded perceptual cycle“ nach Neisser (1976), beschreiben Adams et al. das Produkt von Situationsbewusstsein als die aktuelle mentale Repräsentation der Umwelt bzw. „the conceptual frame or context that governs the selection and interpretation of events“. Der Prozess des Situationsbewusstseins hingegen ist der „state of the perceptual cycle at any given moment“. Das Situationsbewusstsein als Gesamtkonstrukt aus Produkt und Prozess ergibt sich demnach durch eine regelmäßige gegenseitige Auffrischung und Beeinflussung.

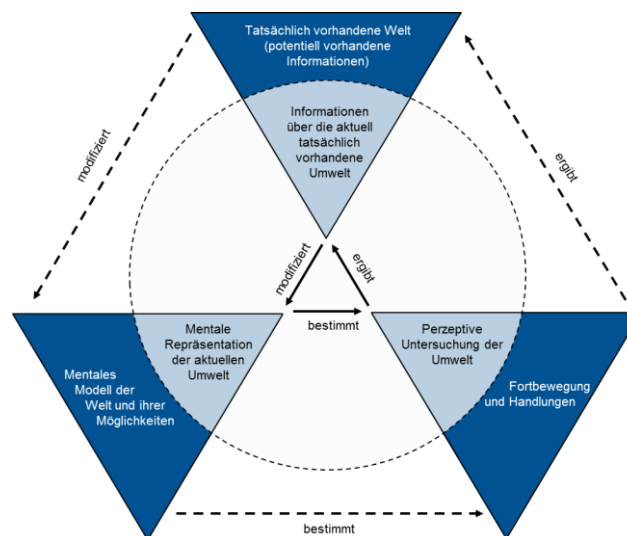


Abbildung 2-12: Erweiterter Zyklus der Wahrnehmung (übersetzte Darstellung nach Neisser 1976). Der innere Kreis stellt den eigentlichen Wahrnehmungszyklus dar, während der äußere Kreis den grundlegenden Umweltzyklus veranschaulicht.

An dieser Stelle zeigt sich ein Schwachpunkt des Konzeptes Situationsbewusstseins: Es ist keine eindeutige bzw. einheitliche Nomenklatur vorhanden. Der Begriff Situationsbewusstsein wird nicht nur für das eigentliche Produkt (Verständnis der Situation) verwendet. Auch der Prozess (Generierung des Verständnisses) wird, ebenso wie das Modell selbst, mit dem Begriff Situationsbewusstsein belegt. Je nach Quelle bezieht sich die Nomenklatur auf einzelne oder alle genannten Aspekte.



Aus allen angeführten Modellen ist ersichtlich, dass das Wissen über die zeitliche Entwicklung einer Situation eine erhebliche Rolle beim Aufbau und Erhalt eines ausreichenden Situationsbewusstseins spielt (siehe auch Wickens 2008). Übertragen auf die sich hochdynamisch ändernden Umweltbedingungen im Fahrkontext entspricht dies der Forderung nach einem kontinuierlichen, hochfrequenten Zyklus aus Kontrolle des Situationsmodells und Anpassung des Verhaltens. Nur auf diese Weise kann ein ausreichendes Situationsbewusstsein aufrechterhalten und die richtigen Handlungen daraus abgeleitet werden.

2.3 Modelle der Fahraufgabe

Der Fahrer wird in modernen Automobilen mit einer Vielzahl unterschiedlich komplexer Aufgaben konfrontiert. Eine grundsätzliche Klassifikation der Tätigkeiten beim Autofahren erlauben die drei hierarchischen Ebenen nach Geiser (1985). Er unterteilt den Fahrprozess hinsichtlich ihrer Priorität in primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgaben (siehe auch Bubb 2002).

Die primären Fahraufgaben umfassen alle Handlungen, die notwendig sind, um das Fahrzeug unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen von Punkt A nach Punkt B zu bewegen (Bubb 2003). Dies beinhaltet hauptsächlich die laterale Steuerung über das Lenkrad sowie die longitudinale Steuerung durch Gaspedal und Bremse. Während dieser Tätigkeit entstehen für den Fahrer weitere Aufgaben, die er zu erfüllen hat, um die primäre Fahraufgabe sicher und effizient zu erfüllen. Zu diesen sekundären Aufgaben gehören beispielsweise:

- die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern (Blinker, Hupe, etc.).
- Tätigkeiten zur Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen (Bedienen der Scheibenwaschanlage, Aufblendlicht, etc.).
- Überwachungsaufgaben (Tankinhalt, Reifendruck, Verkehrsfunk, etc.).

Im Gegensatz zu den noch direkt mit dem Fahrprozess verbundenen, primären und sekundären Aufgaben, adressieren die tertiären Tätigkeiten nicht mehr die Anforderungen einer sicheren Fahrzeugführung. Sie dienen vielmehr der Erfüllung der Bedürfnisse des Fahrers z. B. nach Komfort (Klimaanlage, Sitzheizung), nach Unterhaltung (CD, Radio) oder nach sozialem Kontakt (Telefon, Gespräch mit Insassen). Sie werden in der Regel parallel bzw. simultan zu den beiden anderen Aufgaben ausgeführt und führen dadurch unter Umständen zu einer schlechteren Leistung im eigentlichen Fahrprozess. Dennoch kann die Interaktion mit einigen Zusatzgeräten eine indirekte Unterstützung der primären Fahraufgabe darstellen. Durch eine Klimaanlage werden beispielsweise die Umweltbedingungen für den Fahrer optimiert und somit ein entspanntes und zugleich sicheres Fahren begünstigt (Behr 2005 zitiert in Bergmeier 2009).



Parallel zu dieser Nomenklatur der Fahraufgaben ist die Bezeichnung „secondary task“ fest im Paradigma der Zweitaufgabenversuche (Dualtask) verankert. Hierbei wird unabhängig von der jeweiligen Aufgabenart eine „loading task“ (secondary) gleichzeitig mit einer Hauptaufgabe (primary) ausgeführt. Aufgrund dieser allgemeinen Benennung werden in der Literatur die tertiären Aufgaben der Fahrzeugführung oft auch als „secondary task“ bezeichnet. Die primäre und die eigentlich sekundäre Fahraufgabe werden dementsprechend zur Hauptaufgabe zusammengefasst (Spießl 2011). Auch wenn diese Vereinfachung in den meisten Fällen durchaus Sinn ergibt, soll in der hier vorliegenden Arbeit die ursprüngliche Nomenklatur von Geiser gelten, wobei die tertiären Aufgaben alternativ als Nebenaufgaben bezeichnet werden.

Der eigentliche Prozess der Fahrzeugführung lässt sich als Wechselwirkung zwischen Mensch, Maschine und Umwelt begreifen (Bubb 1975). Für eine detaillierte Beschreibung, wie der Fahrer in Zusammenspiel mit dem Fahrzeug und der Fahrumwelt die Fahraufgabe erfüllt, kann das Paradigma des Regelkreises zur technischen Beschreibung des Mensch-Maschine-Systems auf die Problemstellung der Fahrzeugführung übertragen werden (Bergmeier 2009). Der Prozess der Fahrzeugführung ist in diesem Zusammenhang als klassisches Mensch-Maschine-System (MMS) darstellbar. Ein MMS ist allgemein definiert als ein System, in dem Mensch und Maschine zur Erreichung eines vorgegebenen Ziels zusammenwirken und zu diesem Zweck Informationen austauschen (Schmidtke 1993). Das in Abbildung 2-13 dargestellte Modell zeigt eine vereinfachte Version des von Bubb (1975) erarbeiteten Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises.

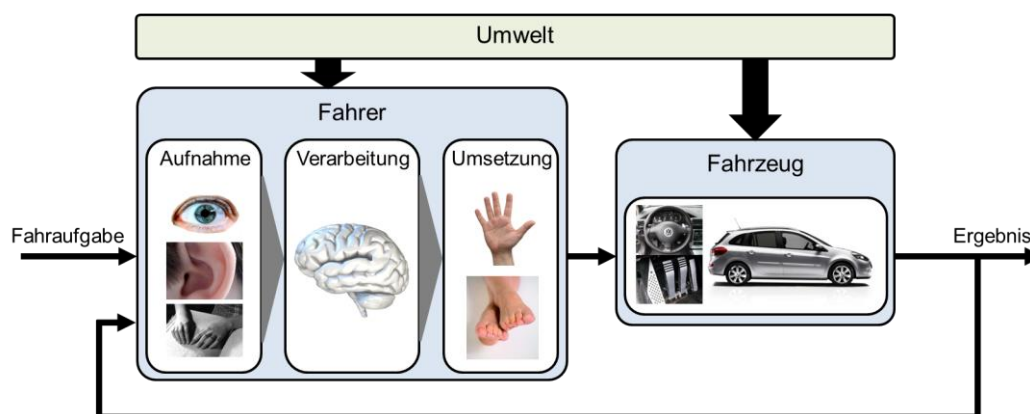


Abbildung 2-13: Allgemeiner Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis (Bubb 1975).

Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis stellt im regelungstechnischen Sinn eine zweidimensionale Kompensationsaufgabe dar, bei der die Fahraufgabe als Eingangsgröße die Führungsgrößen Sollkurs und Sollgeschwindigkeit repräsentiert. Diese Sollvorgaben ergeben sich aus dem Wunsch des Fahrers innerhalb einer gewissen Zeit von einem Punkt A zu einem Punkt B zu gelangen, ohne dabei mit stehenden oder be-



wegen Objekten zu kollidieren. Die Bewegung des Fahrzeugs entspricht der Ausgangsgröße des Regelkreises (Ergebnis) und liefert den aktuellen Istkurs sowie die Ist-Geschwindigkeit. Diese dienen wiederum als Nachführgröße. Der Fahrer stellt in diesem Modell den kontinuierlich arbeitenden Regler dar, dessen Aufgabe darin besteht, Abweichungen zwischen Ein- und Ausgangsgröße bzw. Soll- und Istwert zu registrieren und eventuell entstandene Differenzen zu minimieren. Dazu muss er das Verkehrsgeschehen beobachten und über die am Fahrprozess beteiligten Sinneskanäle die Lage und Orientierung sowie die Bewegungsdynamik des eigenen Fahrzeugs und umgebender Objekte im Raum wahrnehmen. Anschließend wirkt er über die Bedienelemente auf die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs ein. Nach Rockwell (1971) stellt der visuelle Kanal die wichtigste Quelle dar und ist zu 90 % an der Informationsaufnahme beteiligt. Die weiteren am Fahrprozess beteiligten Sinneskanäle sind in Tabelle 2-2 aufgeführt.

Tabelle 2-2: Sinneskanalzuordnung der Fahrerinformation nach Tomaske & Fortmüller (2001) erweitert durch Lange (2008).

Information	Visuell	Vestibulär	Haptisch	Akustisch
Spurabweichung	X			
Quergeschwindigkeit	X			
Fahrgeschwindigkeit	X			X
Längs- und Querschleunigung		X	X	
Winkel Fahrzeuglängsachse – Sollkurs	X			
Giergeschwindigkeit	X			
Gierbeschleunigung		X		
Neigungswinkel	X	X		
Lenkwinkel	X		X	
Kräfte in Stellgliedern			X	
Fahrgeräusch				X

Die Tätigkeiten des Fahrers in der primären Fahraufgabe können laut Bernotat (1970), Donges (1982) und Michon (1985) weiter untergliedert werden in die drei Subaufgaben der Navigation, Führung und Stabilisierung. Diese drei Ebenen der Fahrzeugführung bilden hierarchisch ineinander verschachtelte Regelkreise, wobei die Ergebnisse der oberen Ebenen jeweils als Sollvorgabe für die unteren Ebenen dienen (Abbildung 2-14).

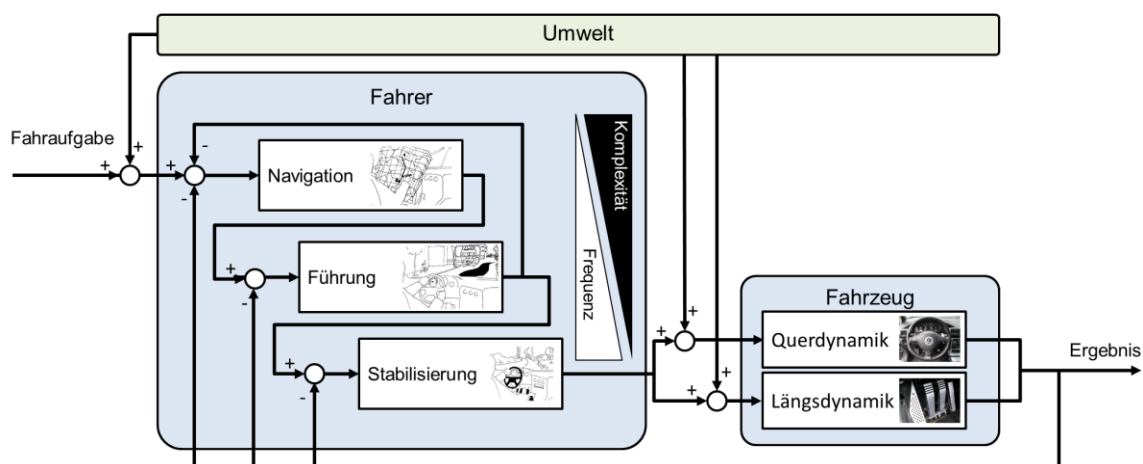


Abbildung 2-14: Verknüpfung der Ebenen der Fahrzeugführung innerhalb des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises nach Bernotat (1970) und Bubb (1988) sowie Komplexitätsgrad und Aktivitätsfrequenz auf den einzelnen Ebenen (Reichart & Haller 1995).

Die Navigationsebene stellt die oberste und zugleich abstrakteste Schicht des Modells dar. Sie wird bei Michon (1985) als „strategic level“ bezeichnet und beinhaltet die eigentliche Transportaufgabe, d. h. die Wahl der zu fahrenden Verbindungsstrecke zwischen Start- und Zielort und der dafür notwendigen Zeit (z. B. Fahrt von München nach Hamburg). Als Grundlage für den Entscheidungsprozess dienen z. B. das vorhandene Straßennetz, Landkarten und Wegweiser. Die Entscheidungsfindung auf dieser Ebene erfolgt mit einer geringen Frequenz, erfordert dabei jedoch den höchsten kognitiven Aufwand (Reichart & Haller 1995). Die Ergebnisse der Navigationsebene, in Form von Route und Durchschnittsgeschwindigkeit, sind zugleich Aufgabenstellung bzw. Sollvorgabe für das nächstniedrigere Aufgabenniveau der Führung.

Auf der Führungsebene wird in Abhängigkeit von der augenblicklichen Verkehrssituation und den Umweltbedingungen ein Sollkurs in die gesehene Szenerie gelegt, die gemäß einem ebenfalls auf diesem Niveau gebildeten Geschwindigkeitsprofil abgefahren werden soll. Michon (1985) verwendet für die Führungsebene den Begriff „manoeuvring level“ und sieht deren Zeithorizont in der Größenordnung von Sekunden. Die Tätigkeit des Fahrers besteht auf diesem Niveau rein aus der Planung, während die tatsächliche Umsetzung auf der Stabilisierungsebene stattfindet.

Auf der dritten und untersten Ebene besteht die Stabilisierungsaufgabe für den Fahrer darin, mithilfe der Bedienelemente aktiv auf das Fahrzeug einzuwirken, um die auf der Führungsebene geplante Trajektorie (Sollkurs und Sollgeschwindigkeit) umzusetzen. Während die oberen beiden Ebenen rein kognitive Planungstätigkeiten darstellen, treten auf dieser Ebene tatsächliche Eingriffe des Fahrers auf das Fahrzeug auf. Da bei erfahrenen Autofahrern die Stabilisierung größtenteils unbewusst stattfindet, ist die Komplexität der Tätigkeit auf diesem Niveau sehr niedrig, wird jedoch mit einer hohen Frequenz ausgeführt (Reichart & Haller 1995). Bei Michon (1985) wird für diese Ebene der Begriff „control level“ verwendet und ein Zeitho-



rizont in der Größenordnung von Millisekunden angesetzt. Nach dem Modell von Bubb (1975) erfolgt die Längs- und Querregelung über zwei getrennte Regelkreise, die jedoch über die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs miteinander verknüpft sind.

Wichtig für das 3-Ebenen-Modell ist, dass auf allen drei Niveaus die entstandene Aufgabenerfüllung, also die aktuelle Position und Dynamik des Fahrzeugs in der Szenerie, mit der jeweiligen Aufgabenstellung verglichen und auf Übereinstimmung überprüft werden muss. Ist diese Übereinstimmung nicht gegeben, kann eine Anpassung der vorgegebenen Größen auch auf dem jeweils nächsthöheren Niveau notwendig werden (Bubb 1993). So kann zum Beispiel ein zu hohes Verkehrsaufkommen oder eine gesperrte Straße auf der Ebene der Fahrzeugführung eine Überarbeitung der Navigationsaufgabe nötig machen. Ebenso kann eine zu hoch empfundene Querbeschleunigung zu einer Anpassung der Führungsaufgabe führen. Durch Wahrnehmungen sowie sich ändernde Randbedingungen können also die Eingangsgrößen der einzelnen Regelkreise in beiden Richtungen der Hierarchie beeinflusst werden. Eine Verdeutlichung der Vorgänge und Anforderungen auf den unterschiedlichen Ebenen der Fahrzeugführung bietet die in Abbildung 2-15 dargestellte Verknüpfung der drei Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges (1978, 1982) mit den Ebenen menschlichen Verhaltens nach Rasmussen (1983).

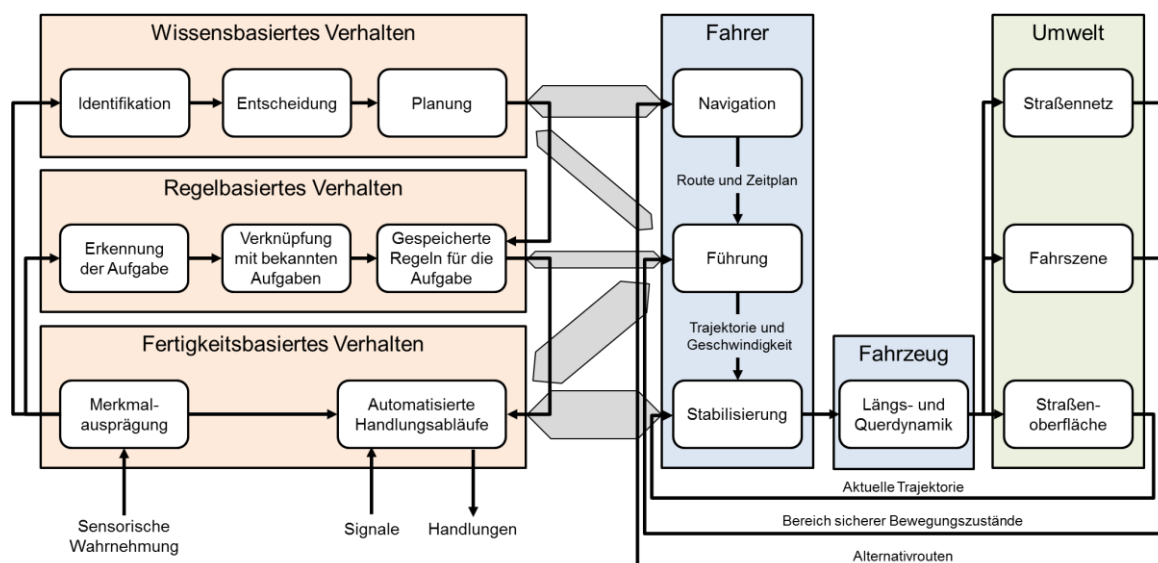


Abbildung 2-15: Verknüpfung des Modells menschlichen Verhaltens von Rasmussen (1983) mit dem 3-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung. Darstellung basierend auf Donges (2009).

Bei flüchtiger Betrachtung suggeriert diese Darstellung eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Ebenen zueinander. Dies würde bedeuten, dass Entscheidungen auf der Navigationsebene immer wissensbasiert, Planungen auf der Führungsebene immer regelbasiert und Tätigkeiten auf der Stabilisierungsebene immer fertigkeitbasiert ausgeführt werden. Betrachtet man jedoch das in Spießl (2011) angeführte Bei-



spiel eines Fahrers, der in einem Land mit Linksverkehr fahren muss, so wird schnell klar, dass die Ebenen der beiden Modelle einander nicht direkt zugeordnet werden können.

Im angeführten Beispiel müssen auch erfahrene Fahrer sorgfältig darüber nachdenken, wie einzelne Situationen zu lösen sind, z. B. auf welchen Fahrstreifen sie sich nach dem Abbiegen einordnen müssen oder wo sich bei einem Rechtslenker die Bedienelemente befinden. Fertigungs- und regelbasiertes Verhalten können hier unter Umständen nicht mehr angewendet werden, wodurch der Großteil der Fahraufgabe auf die Ebene des wissensbasierten Verhaltens gehoben wird. Gleichzeitig gilt, dass der Grad an Aufmerksamkeit, der vom Fahrer zur Erfüllung der Fahraufgabe benötigt wird, umso höher ist, je bewusster die Entscheidungsprozesse ablaufen. Wie die weiteren Beispiele in Tabelle 2-3 zeigen, spannen die Modelle eine Matrix auf, d. h. die drei Ebenen des menschlichen Verhaltens finden je nach Randbedingungen in jeder Ebene der Fahrzeugführung Anwendung.

Tabelle 2-3: Beispiele für die Zusammenhänge des SRK-Modells (Rasmussen 1983) mit den Ebenen der Fahrzeugführung basierend auf Hale et al. (1990).

	Wissensbasiert	Regelbasiert	Fertigkeitsbasiert
Navigation	Zurechtfinden in einer fremden Stadt	Wahl zwischen vertrauten Wegen	Täglicher Weg zur Arbeit
Führung	Steuern auf schneebedeckter oder vereister Fahrbahn	Überholen anderer Fahrzeuge, Spurwechsel	Abbiegen an einer Kreuzung
Stabilisierung	Fahrschüler in der ersten Fahrstunde	Ein ungewohntes Autofahren.	Kurven fahren, Kupplern und Schalten

Obwohl eine unmittelbare Beziehung der Ebenen nicht immer gegeben ist, finden nach Lange (2008) dennoch in den meisten Fällen die Handlungen auf der Diagonale der Tabelle von links oben nach rechts unten statt. Hier stehen die Ebenen in direktem Bezug zueinander.

Im Rahmen der DFG-Förderprojekte H-Mode (Flemisch et al. 2003) und Conduct-by-Wire (Winner und Hakuli 2006, Winner et al. 2006) wird im Zusammenhang mit automatisierter bzw. kooperativer Fahrzeugführung die Notwendigkeit diskutiert, das 3-Ebenen-Modell mit einer weiteren Ebene zu ergänzen, um die Manöverplanung und -auswahl des Fahrers bzw. der Automation zu modellieren. Hierarchisch wird diese Ebene oberhalb der Führungsebene angesiedelt. Bezogen auf den Ablauf der Fahrzeugführung wird also das auf der neu eingeführten Manöverebene erarbeitete Ergebnis in Form eines Wunschmanövers (z. B. Überholen, Fahrstreifenwechsel, Folgefahrt, etc.) als Vorgabe für die Planung einer Trajektorie an die Führungsebene weitergegeben. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wird dieser An-



satz aufgegriffen, jedoch dahin gehend abgeändert, dass die Manöverebene nicht als eigenständige Ebene eingeführt wird, sondern auf der Führungsebene eine Differenzierung der Vorgänge der Manöver- und Trajektorienplanung stattfindet.

Aus dieser Unterteilung der Führungsebene in Manöver- und Trajektorienplanung ergibt sich ein leicht angepasstes Schaubild für den Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis (Abbildung 2-16). Ähnlich dem bisher bestehenden Modell dienen auch hier die Ausgangsgrößen der oberen Ebenen als Eingangsgrößen für die jeweils niedrigeren Ebenen. Die Unterteilung der Führungsebene in Manöver- und Trajektorienplanung folgt ebenfalls dieser hierarchischen Struktur.

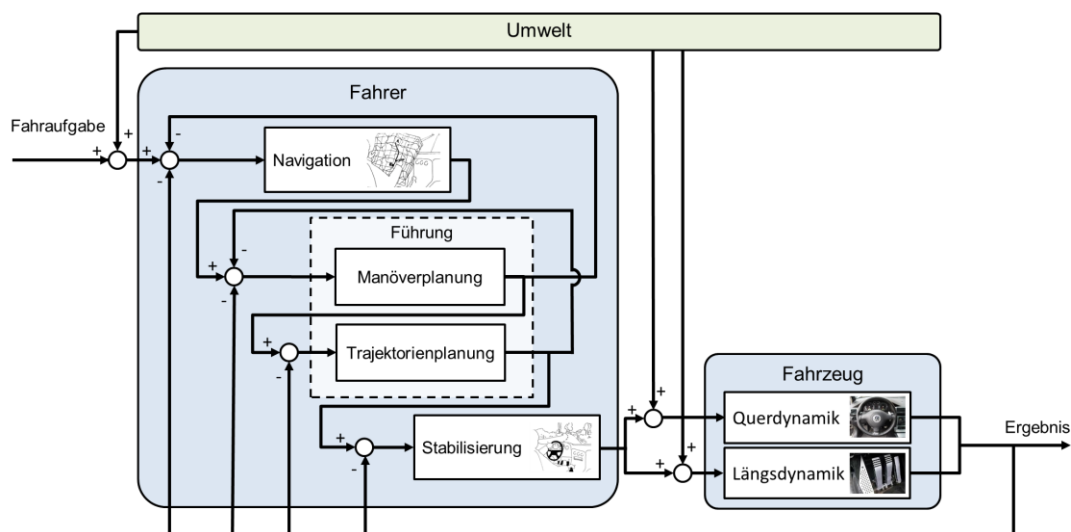


Abbildung 2-16: Erweiterter Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis.

Auf dem Manöverniveau werden verschiedene Alternativmanöver erzeugt, bewertet und anschließend das Passende ausgewählt. Das Wunschmanöver wird an die Trajektorienplanung weitergegeben und ist Vorgabe für die Generierung einer Trajektorie zur Realisierung des Manövers.

Generell handelt es sich bei den Tätigkeiten des Fahrers auf den oberen Ebenen – von der Navigations- bis zur Führungsebene – um rein mentale Entscheidungs- und Handlungsvorbereitungsprozesse, die vor der eigentlichen Umsetzung stattfinden. Sie können sich, wie oben gezeigt, auch entgegen der Hierarchie direkt beeinflussen. Der Weg über die tatsächliche Interaktion mit dem Fahrzeug und die resultierende Fahrzeugreaktion ist nicht nötig und unter Umständen sogar kontraproduktiv, solange die individuell als optimal empfundene Lösung der Situation noch nicht ermittelt worden ist. Geänderte Randbedingungen können demnach direkt von einer niedrigeren an eine höhere Ebene zurückgemeldet werden.

Berücksichtigt man die in Kapitel 2.1 veranschaulichten Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung sowie die in diesem Teilkapitel vorgestellten Modelle der Fahraufgabe, lässt sich das Fahrerverhalten zusammengefasst mit der in Abbil-



dung 2-17 dargestellten Matrix beschreiben. Die Illustration basiert auf dem dreidimensionalen Fahrermodell von Theeuwes 2001 (zitiert in Cody & Gordon 2007). Dieser veranschaulicht das Fahrerverhalten mit einer 3 x 3 x 3-Matrix basierend auf den Dimensionen „Information“, „Task Hierarchy“ und „Task Performance“. Im Sinne der bereits vorgestellten Modelle entsprechen diese Dimensionen der „Informationsverarbeitung“, der „Ebene der Fahrzeugführung“ und der „Ebene des menschlichen Verhaltens“. Unter Berücksichtigung der eingeführten Unterteilung der Führungsebene in Manöver und Trajektorien wird die Darstellung von Theeuwes in der Dimension „Ebene der Fahrzeugführung“ um diese beiden Teilebenen ergänzt.

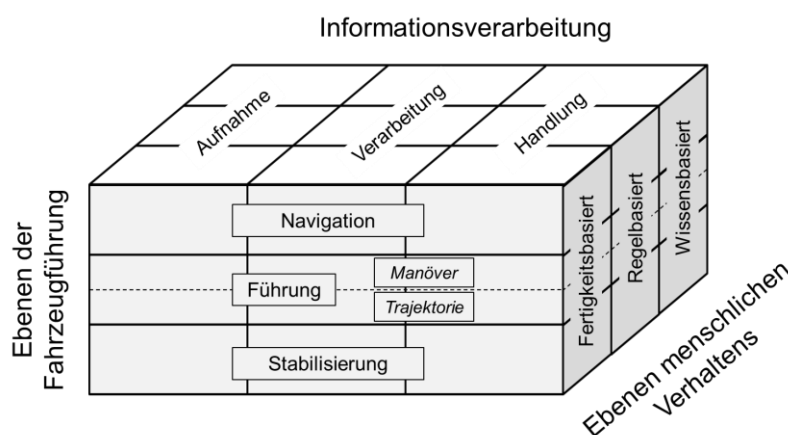


Abbildung 2-17: Fahrermodell nach Theeuwes (2001) übersetzt und ergänzt um die Teilebenen Manöver und Trajektorie.

Die Erweiterung des Modells nach Theeuwes (2001) bietet eine gute Zusammenfassung der das Fahrerverhalten beeinflussenden Faktoren, jedoch ohne dabei deren genaue Interaktion zu erklären. Dazu muss auf die in den vorangegangenen Kapiteln im Detail beschriebenen Einzelmodelle zurückgegriffen werden.

Entscheidend für alle hier vorgestellten Modelle der Fahraufgabe ist die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Wahrnehmung der Umwelt bzw. der Fahrszenerie durch den Fahrer, die Bewertung der gewonnenen Information sowie die Auswahl und Umsetzung von Handlungen. Nur durch dieses fortwährende Durchlaufen des Regelkreises kann sichergestellt werden, dass der Fahrer ausreichend aktiviert ist, um die zu lösenden Situationen bewältigen zu können. Voraussetzung für ein erfolgreiches Handeln ist, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, nicht nur die Informationsaufnahme, sondern auch der korrekte Aufbau eines Bewusstseins über die sich bietende Situation. Auf den Prozess des Autofahrens bezogen, kann das Konzept des Situationsbewusstseins, wie in Abbildung 2-18 dargestellt, auf die Abläufe der Führungsebene übertragen werden. Zwar spielen die Mechanismen des Situationsbewusstseins auch bei der Navigation und der Stabilisierung eine Rolle, die Entscheidungen über das



Verhalten in der aktuellen Verkehrssituation werden jedoch auf der Führungsebene generiert.

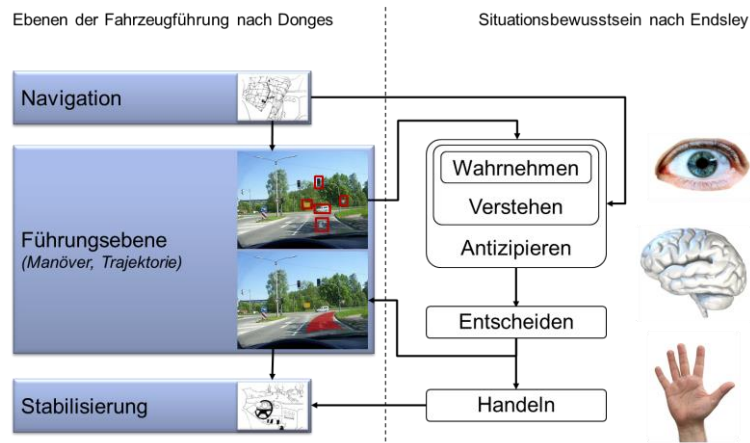


Abbildung 2-18: Zuordnung der Ebenen des Situationsbewusstseins zu den Ebenen der Fahrzeugführung.

Auf dieser Ebene werden die notwendigen Umgebungsinformationen wahrgenommen, verarbeitet und das zu erwartende zukünftige Verkehrsszenario abgeschätzt. Erst im Anschluss daran – als letzter Schritt der Führungsebene – findet die Entscheidungsfindung hinsichtlich der gewünschten Trajektorie statt. Die Umsetzung der geplanten Handlungsabsicht erfolgt auf der Stabilisierungsebene in Interaktion mit den Bedienelementen und Anzeigen des Fahrzeugs. Das Wissen um die Voraussetzungen und Ziele der Navigationsebene stellt dabei die übergeordneten Randbedingungen dar, um ein ausreichendes Bewusstsein der aktuellen Situation entwickeln zu können.



3 Assistenz und Automation

3.1 Definition der Automation

Nach Duden ist Automation der durch „Automatisierung erreichte Zustand der modernen technischen Entwicklung, der durch den Einsatz weitgehend bedienungsfreier Arbeitssysteme gekennzeichnet ist.“ Der zugrunde liegende Begriff Automatisierung stammt ursprünglich aus der Produktionstechnik und ist nach DIN 19233 definiert als „das Ausrüsten einer Einrichtung, sodass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet“. Dabei wird nicht nur die für den Prozess notwendige Energie bereitgestellt. Es werden auch Prozesssteuerungs- und ggf. Prozessregelaufgaben durch künstliche Systeme übernommen (Gabler Wirtschaftslexikon). Grundlage dafür ist ein Automat, der selbstständig ein Programm befolgt und dafür die Steuerung bzw. Regelung des Ablaufes übernimmt. Auf Basis dieses Programms verknüpft der Automat Eingangsgrößen mit den Zuständen des Systems, woraus sich Ausgaben bzw. Zustandsänderungen des automatisierten Systems ergeben (vgl. Zielinski 2006). Diese für den Automatisierungsprozess in der Produktionstechnik gedachten Definitionen sind auch auf die Fahrzeugführung übertragbar. Während die Ziele der ursprünglichen Automatisierung allerdings in der Qualitätssteigerung von Produkten sowie in der Rationalisierung des Produktionsablaufes lagen, zielen die Automationsbestrebungen im Fahrzeug auf eine Steigerung des Fahrerkomforts und der Verkehrssicherheit ab.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Aufgabenanteile, die von Automationssystemen ausgeführt werden können, wird laut Gabler Wirtschaftslexikon „je nach Umfang der Übernahme von Steuerungs- und Regelaufgaben durch die Maschine von Teil- oder Vollautomatisierung gesprochen. Der Anteil, den die automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion eines Produktionssystems haben, wird als Automatisierungsgrad bezeichnet (DIN 19 233)“.

Die oben angeführten Beschreibungen von Automatisierung und Automationsgraden können auf das Gebiet der Fahrzeugführung angewendet werden. Es ergibt sich ein Spektrum der Fahrzeugautomatisierung, in das sowohl heutige Fahrerassistenz- wie auch zukünftige Automationssysteme eingeordnet werden können, je nachdem in welchem Umfang sie den Fahrer bei der Fahrzeugführung unterstützen. Dazu gilt es jedoch zunächst den Begriff Fahrerassistenz zu klären.

3.2 Einteilung der Fahrerassistenzsysteme

Einer weit gefassten Bedeutung des Begriffes Assistenz als Beistand bzw. Mithilfe zufolge müssten bereits vergleichsweise einfache Systeme wie ein Automatikgetriebe oder eine Servolenkung als Fahrerassistenzsystem interpretiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Fahrerassistenz jedoch, basierend auf den von



Maurer (in Winner et al. 2009) angeführten drei Formen der Arbeitsteilung nach Kraiss (1998), gezielter angewendet. Fahrerassistenz beschreibt demnach primär eine Zusammenarbeit von Fahrer und System, um eine Gesamtaufgabe zu lösen. Mensch und Automat können dabei

- seriell, also nacheinander an verschiedenen Teilaufgaben arbeiten,
- parallel zueinander an verschiedenen Teilaufgaben arbeiten oder
- redundant-parallel an der gleichen Teilaufgabe arbeiten.

Dazu müssen Fahrerassistenzsysteme ebenso wie der Mensch Informationen bezüglich der Umgebungsbedingungen bzw. des Fahrzeugzustandes und des zu erreichenden Zielzustandes besitzen. Ein wichtiger Aspekt der Fahrerassistenzsysteme ist demnach, dass sie über eine ihrer Funktion entsprechende Wahrnehmung der Situation verfügen. Diese Wahrnehmung kann einfach zu messende Größen zur Erfassung des Fahrzeugzustandes, wie die Raddrehzahl beim Antiblockiersystem, umfassen. In diesem Fall spricht man von konventionellen Fahrerassistenzsystemen. Demgegenüber stehen sogenannte fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems), die laut RESPONSE 3 „im Gegensatz zu konventionellen Fahrerassistenzsystemen Sensoren zur Erfassung und Auswertung der Fahrzeugumgebung und je nach zu unterstützender Fahraufgabe eine komplexe Signalverarbeitung besitzen“ (Donner et al. 2007).

Aus Sicht der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ist es möglich, Fahrerassistenzsysteme anhand der Prozessschritte der Informationsverarbeitung (Bubb 1975) einzuteilen, bei denen sie den Menschen unterstützen. Der Prozessschritt der Informationsumsetzung bezieht sich dabei auf den direkten Eingriff in die Fahrzeugführung z. B. durch aktives Bremsen oder Lenken. Wie Abbildung 3-1 zeigt, ermöglichen die Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges (1982) dabei eine weitere Differenzierung der Fahrerassistenzsysteme.

Heutige Fahrerassistenzsysteme umfassen bereits einen beträchtlichen Teil der primären Fahraufgabe und können den Fahrer von der Routenwahl auf der Navigationsebene bis hin zur Aufrechterhaltung der Kontrolle über das Fahrzeug auf der Stabilisierungsebene unterstützen. Forschungsprojekte wie AKTIV (2010), PReVENT⁷ (2007) oder INVENT⁸ (2007) haben hier einen erheblichen Beitrag zur Erforschung und Entwicklung dieser ADAS geleistet. Diese Systeme verfügen über die Fähigkeit, Informationen bezüglich der Umwelt und des Fahrzeugzustandes aufzunehmen, sich daraus ein Abbild der Situation zu erzeugen und darauf aufbauend in das Fahrer-Fahrzeug-System einzugreifen.

⁷ Programm zur Verbesserung der aktiven Sicherheit

⁸ Intelligent Traffic and Userfriendly Technology.

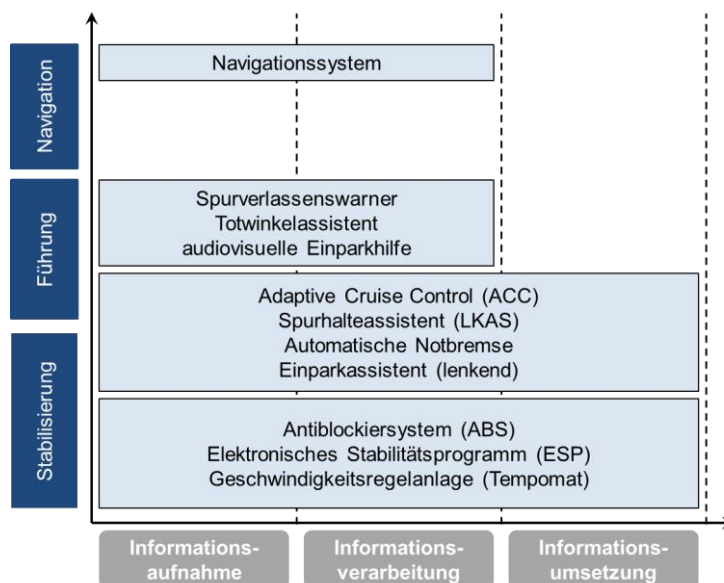


Abbildung 3-1: Fahrerassistenzsystemen aus Sicht der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion (eigene Darstellung). Einteilung nach Ebene der Fahrzeugführung und nach Prozessschritten der Informationsverarbeitung, die sie umfassen.

Fahrerassistenzsysteme, die nur die Prozessschritte der Informationsaufnahme und der Informationsverarbeitung unterstützen, nehmen die Umgebung wahr (z. B. Totwinkelassistent) und bereiten die so ermittelten Informationen für den Fahrer auf. Dabei haben sie eine rein informierende bzw. warnende Charakteristik und greifen nicht in die Fahrzeugführung ein. Die Information kann dabei über den visuellen, akustischen oder haptischen Kanal vermittelt werden. Auch das Navigationssystem verfügt in diesem Kontext über Umgebungswissen, basierend auf dem hinterlegten Kartenmaterial und der per GPS sensierten Position. Ist zusätzlich der Prozessschritt der Informationsumsetzung enthalten, greifen die Assistenzsysteme, auf Grundlage der von Ihnen wahrgenommenen Informationen, aktiv in die Fahrzeugführung ein und beeinflussen so die vom Fahrzeug gefahrene Trajektorie.

Diese fortgeschrittenen Fahrerassistenzsysteme wie Spurhalteassistenten (Lane Keeping Assistance System - LKAS) oder adaptive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control - ACC) verfügen im Sinne der oben angeführten Definition bereits über eine relativ hohe Automationsstufe (vgl. Gasser 2012). Beide Systeme sind in der Lage, dem Fahrer innerhalb ihrer Systemgrenzen die primäre Fahraufgabe temporär nahezu vollständig abzunehmen, wobei sie jeweils nur auf einer Dimension der Fahraufgabe eingreifen, der Längs- (ACC) bzw. der Querverführung (LKAS). Es ist abzusehen, dass ausgehend von einer technikgetriebenen Entwicklung zukünftig noch höher automatisierte Fahrzeuge mit integrierten Automationssystemen möglich sein werden, deren Fähigkeiten über diese Assistenzfunktionen hinausgehen (Damböck et al. 2010b). Projekte wie Interactive (Hesse et al. 2011) und HAVEit (Hoeger et al.



2008) weisen hier den Weg hin zu einem zunehmenden Automationsgrad im Fahrzeug mit dem Fernziel der autonomen Fahrzeugführung.

Bereits in den Jahren 1987 bis 1994 unterstützte die EU das Projekt PROMETHEUS⁹ (vgl. Naab & Reichart 1995), bei dem eine weitgehend automatisierte Autobahnfahrt zweier Mercedes 500 SEL erreicht werden konnte. Das California PATH¹⁰ Projekt demonstrierte 1997 eine automatisierte Kolonnenfahrt von acht PKW. Den Trend zur Entwicklung autonomer Fahrzeuge greifen die Wettbewerbe DAPRA Grand-Challenge und DAPRA Urban-Challenge auf, die von der Defense Advanced Research Projects Agency initiiert werden. Bei der Grand-Challenge, die 2004 und 2005 stattfand, musste eine Route von über 200 km durch die Mojawewüste autonom zurückgelegt werden, während bei der Urban-Challenge ein knapp 97 km langer Parcours im bebauten Gebiet einer ehemaligen Kaserne zu absolvieren war. Den bisherigen Höhepunkt dieser Bestrebungen stellen Konzepte wie das Forschungsfahrzeug der Firma Google (Thrun 2010) oder das Forschungsfahrzeug der TU-Braunschweig LEONIE (Saust et al. 2011) dar, mit denen autonom durch den öffentlichen Straßenverkehr gefahren werden kann.

Ein weiterer Aspekt der zunehmenden Automatisierung im Fahrzeug, nämlich die Kooperation zwischen Fahrer und Automationssystem, wird in den Projekten Conduct-by-Wire (Winner und Heuss 2005, Winner et al. 2006, Hakuli et al. 2009) und H-Mode (Flemisch et al. 2007, Flemisch et al. 2008a, Damböck et al. 2010a) systematisch erforscht. Der gemeinsame Ansatz dieser beiden Projekte besteht darin, die Fähigkeiten der Automation zu nutzen, ohne den Fahrer komplett von der Fahraufgabe zu entbinden. Die Fahrzeugführung erfolgt über eine kooperative Zusammenarbeit zwischen Fahrer und Automation. Handlungsanweisungen, Hinweise und Warnungen werden zwischen den beiden Kooperationspartnern kommuniziert, verhandelt und als Sollvorgabe an das Fahrzeug weitergegeben. Während beiden Projekten das Prinzip der Kooperation (Bengler et al. 2012) zwischen Fahrer und Automation zugrunde liegt, unterscheiden sie sich in der Ausprägung der Interaktionsstrategie. Während bei H-Mode Fahrer und Automation kontinuierlich, parallel und simultan auf das Fahrzeug einwirken (Kienle et al. 2012), folgt die Sollvorgabe in Conduct-by-Wire einem seriellen und sequenziellen Ablauf (Hakuli et al. 2009). Insbesondere solange das vollständig autonom fahrende Fahrzeug noch nicht realisiert werden kann, stellt das Prinzip der kooperativen Fahrzeugführung einen Ansatz dar, höhere Automationsgrade zu verwirklichen. Der Fahrer wird in der Fahraufgabe unterstützt, bleibt gleichzeitig aber weitgehend in den Entscheidungsprozess eingebunden, um die negativen Auswirkungen zunehmender Automation (vgl. Kapitel 3.4) nicht in vollem Umfang zum Tragen kommen zu lassen.

⁹ Programme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety

¹⁰ Partners for Advanced Transit and Highways



Bereits diese einzelnen Meilensteine bei der Entwicklung der Fahrzeugautomatisierung zeigen den schnellen Fortschritt der Technik auf diesem Gebiet und die unterschiedlichsten Aspekte, die bei der Definition des Automationsgrades berücksichtigt werden müssen.

3.3 Automationsgrade

Im Sinne einer Klassifizierung der Mächtigkeit von Fahrerassistenz- bzw. Automationsystemen ist die in Abbildung 3-1 dargestellte Einteilung nicht ausreichend, weil unter anderem die Rolle des Fahrers nicht berücksichtigt wird. Es ist davon auszugehen, dass bei der Definition zukünftiger, automatisierter Fahrfunktionen die Beschreibung der Fahrer Verfügbarkeit bzw. die Beschreibung der Rolle des Fahrers in der jeweiligen Automationsstufe zunehmende Wichtigkeit erhält. Insbesondere hinsichtlich rechtlicher Gesichtspunkte ist diese Berücksichtigung der Fahreraufgabe von großem Interesse.

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen, um das Spektrum der Automatisierung allgemein bzw. fahrzeugspezifisch zu beschreiben. In diesem Kapitel werden ausgewählte Ansätze dargestellt und in ein eigenes Einteilungskonzept überführt.

Ähnlich zu der oben durchgeführten Einteilung der Fahrerassistenzsysteme anhand der drei grundlegenden Schritte des Informationsverarbeitungsprozesses beschreiben Endsley & Kaber (1999) vier Funktionen, die von einem Automationssystem übernommen werden können (Tabelle 3-1). Der Schritt der Informationsverarbeitung wird dabei weiter unterteilt in Generierung und Auswahl von Handlungsalternativen.

Tabelle 3-1: Definition von Funktionen nach Endsley und Kaber (1999), die von einem Automationssystem übernommen werden können.

Zu übernehmende Funktion		Definition
Informationsaufnahme	Monitoring	Wahrnehmung des Systemzustandes durch Informationsaufnahme.
	Generierung	Entwicklung von Handlungsalternativen, basierend auf dem Wissen über den Systemzustand.
Informationsverarbeitung	Auswahl	Auswahl der besten Handlungsalternative.
	Umsetzung	Ausführung der notwendigen Aktionen zur Umsetzung der ausgewählten Handlung.

Ausgehend von diesen Funktionen definiert sich der Automationsgrad dadurch, welche dieser Teilaufgaben vom Menschen bzw. von der Automation ausgeführt werden. Daraus ergibt sich nach Endsley & Kaber die in Tabelle 3-2 dargestellte Einteilung in zehn Stufen der Automatisierung.



Tabelle 3-2: Automationsstufen nach Endsley & Kaber (1999). M: Funktionsausführung durch den Menschen, A: Funktionsausführung durch den Automaten, M/A: Gemeinsame Funktionsausführung.

Automationsstufe	Systemfunktion			
	Überwachung	Generierung	Auswahl	Umsetzung
Manuell	M	M	M	M
Handlungsunterstützung	M/A	M	M	M/A
Handlungsumsetzung	M/A	M	M	A
Shared Control	M/A	M/A	M	M/A
Entscheidungsunterstützung	M/A	M/A	M	A
Geteilte Entscheidungsfindung	M/A	M/A	M/A	A
Rigid System	M/A	A	M	A
Automatische Entscheidungsfindung	M/A	M/A	A	A
Überwachung	M/A	A	A	A
Vollautomation	A	A	A	A

Basierend auf Spring (2011) können diese Automationsgrade wie folgt beschrieben werden:

1. Manuell: In einem manuell kontrollierten System übernimmt der Mensch alle Funktionen ohne Unterstützung durch den Automaten.
2. Handlungsunterstützung: Der Mensch wird bei der Handlungsumsetzung durch den Automaten unterstützt. Um diese Unterstützung gewährleisten zu können, muss er über eine Wahrnehmung der Situation verfügen.
3. Handlungsumsetzung: Die vom Menschen ausgewählten Handlungen werden durch den Automaten umgesetzt. Für die Umsetzung benötigt der Automat Wissen über die bestehende Situation.
4. Shared Control: Automat und Mensch nehmen die Situation wahr und generieren Handlungsalternativen. Die ausgewählte Aktion wird anschließend gemeinsam umgesetzt, wobei allein der Mensch für die Auswahl der Handlung verantwortlich ist.



5. Entscheidungsunterstützung: Der Fahrer wird vom Automaten im Prozess der Entscheidungsfindung unterstützt. Die vom Menschen ausgewählte Handlung wird anschließend vom Automaten umgesetzt.
6. Geteilte Entscheidungsfindung: Mensch und Automation interagieren miteinander, um die beste Handlungsalternative auszuwählen, welche anschließend vom Automaten umgesetzt wird. Der Automat macht dabei Vorschläge und überprüft die Eingaben des Menschen. Zur Klärung von Unstimmigkeiten wird beim Operator nachgefragt.
7. Rigid System: Der Automat präsentiert dem Menschen ein Set an Handlungsalternativen. Letzterer wählt die beste Handlungsalternative aus, welche wiederum vom Automaten umgesetzt wird.
8. Automatische Entscheidungsfindung: Bei dieser Erweiterung der geteilten Entscheidungsfindung wählt der Automat eine Handlungsalternative aus und setzt diese um. Der Mensch dient als Überwacher, wobei vorausgesetzt wird, dass auch er sich noch Gedanken über mögliche Handlungsalternativen macht.
9. Überwachung: Die Ausführung der Aufgabe wird nahezu vollständig vom Automaten übernommen. Der Mensch gleicht nur noch das erzielte Ergebnis mit dem vorgegebenen Ziel ab, um bei Abweichungen eingreifen zu können.
10. Vollautomation: Alle Funktionen inklusive der Überwachung des Systemzustandes werden vom Automaten übernommen, ohne dass der Mensch überwachen oder eingreifen muss.

Eine sehr ähnliche Einteilung der Automationsstufen findet sich bei Sheridan (1992). Auch hier wird die Gesamtaufgabe in vier Teilfunktionen unterteilt, wobei zwischen der Generierung der Handlungsalternativen und der Handlungsauswahl der Schritt „Reduzierung der Handlungsalternativen“ eingeführt wird. Gleichzeitig wird die Teilfunktion des Monitorings nicht berücksichtigt. Ebenso wie bei Endsley & Kaber wird das Spektrum der Automation in zehn Stufen unterteilt, wobei bei Sheridan nur die ersten vier eine aktive Involvierung des Menschen beinhalten (Tabelle 3-3). Ab der fünften Automationsstufe spricht Sheridan von einer Vollautomation, bei der alle definierten Systemfunktionen vom Automaten übernommen werden. Der Mensch besitzt aber weiterhin Einflussmöglichkeiten (z. B. die Genehmigung von Aktionen oder Vetorecht). Ab Stufe sieben bestehen keine Einflussmöglichkeiten mehr durch den Fahrer. Die Differenzierung findet hier auf Basis des Informationsflusses vom Automaten an den Menschen statt.



Tabelle 3-3: Einteilung der Automationsstufen basierend auf Sheridan (1992).
 M: Funktionsausführung durch den Menschen, A: Funktionsausführung durch den Automaten.

Beschreibung der Automationsstufe		Systemfunktion			
		Alternativen- generierung	Alternativen- reduzierung	Handlungs- auswahl	Handlungs- umsetzung
Involvierung des Menschen	Vollständige Kontrolle durch den Menschen.	M	M	M	M
	Handlungsauswahl durch den Menschen aus einem kompletten Satz möglicher Alternativen.	A	M	M	M
	Handlungsauswahl durch den Menschen aus einem vorausgewählten Satz von Alternativen.	A	A	M	M
	Durchführung der vom Automaten vorgeschlagenen Handlung durch den Menschen.	A	A	A	M
Einfluss des Menschen	Durchführung der Handlung durch den Automaten nach Genehmigung durch den Menschen .	A	A	A	A
	Durchführung der Handlung durch den Automaten, wenn ein Veto des Menschen ausbleibt.	A	A	A	A
Informierung des Menschen	Durchführung der Handlung durch den Automaten mit anschließender Informierung des Menschen .	A	A	A	A
	Durchführung der Handlung durch den Automaten. Eine Information des Menschen findet nur statt, wenn diese angefordert wird.	A	A	A	A
	Durchführung der Handlung durch den Automaten. Der Automat entscheidet, ob der Mensch informiert wird.	A	A	A	A
	Der Automat führt die Handlung ohne Eingriffsmöglichkeit oder Information des Menschen durch.	A	A	A	A



Obwohl sich beide Automationsstufen sehr ähneln, deckt die Definition von Endsley & Kaber (1999) einen umfassenderen Bereich ab, da hier auch die Informationsaufnahme Teil der Betrachtung ist. Auch Billings (1997) und Parasuraman (2000) vertreten die Ansicht, dass die Bereitstellung von Information durch ein System bereits der Automatisierung zuzurechnen ist („information automation“).

Auch für den Bereich der Fahrzeugführung existieren erste Ansätze zur Klärung der Begriffsvielfalt. Im Rahmen des DFG-Projektes H-Mode (Flemisch et al. 2007, Damböck et al. 2009) wird eine, auf die Systemfunktionen reduzierte, eindimensionale Darstellung der Automationsstufen eingesetzt (Flemisch 2008b). Demzufolge lassen sich die Entwicklungen im Bereich der Assistenz- und Automation stark vereinfacht auf ein Spektrum übertragen (vgl. auch Schieben et al. 2008a). Dieses Spektrum reicht von manueller über assistierte und semi-automatisierte hin zur hoch- und voll-automatisierten Fahrzeugführung (Abbildung 3-2).

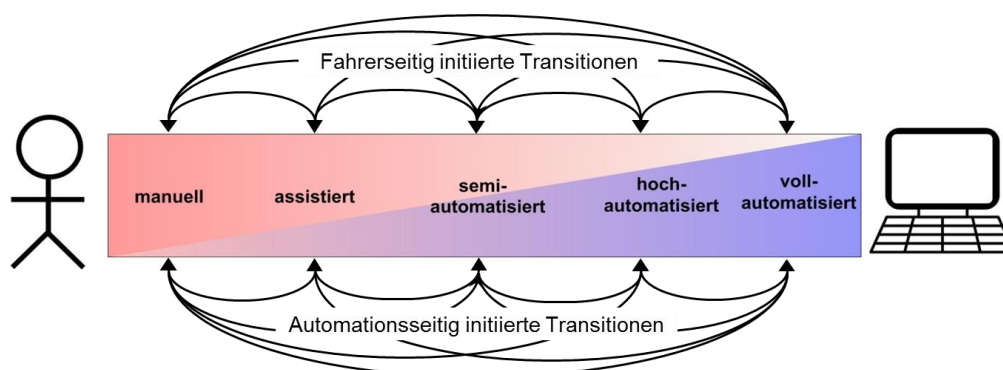


Abbildung 3-2: Automationspektrum nach Flemisch (2008b) mit Transitionen zwischen den Automationsstufen.

Die einzelnen Automationsstufen können wie folgt beschrieben werden:

Manuell: Der Fahrer hat die volle Kontrolle über das Fahrzeug und wird dabei nicht von Automations- bzw. Assistenzsystemen unterstützt.

Assistiert: Der Fahrer übt die alleinige Kontrolle über das Fahrzeug aus, wird dabei jedoch von konventionellen und/oder informierenden Assistenzsystemen (z. B. ESP, Navigationssystem) unterstützt.

Semiautomatisiert: Eine Dimension der Fahraufgabe (Längs- oder Querführung) wird vom Assistenz- bzw. Automationssystem weitgehend selbstständig übernommen, während die andere Dimension vom Fahrer ausgeführt werden muss (z. B. ACC oder LKAS).

Hochautomatisiert: Beide Dimensionen der Fahraufgabe werden von der Automation ausgeführt. Der Fahrer bleibt jedoch weiterhin aktiv in die Fahraufgabe eingebunden.

Vollautomatisiert: Der Fahrer ist nicht mehr aktiv in die Fahraufgabe eingebunden. Diese wird in beiden Dimensionen allein vom Automationssystem bewältigt.



Laut Flemisch (2008b) ermöglicht diese Darstellung zum einen eine Beschreibung der aktuellen Involvierung des Fahrers bzw. der Automation in die Fahraufgabe („Ich fahre gerade assistiert.“), zum anderen kann dadurch die Automation eines bestimmten Fahrzeugs beschrieben werden („Ich habe ein hochautomatisiertes Fahrzeug.“). Ein weiterer essenzieller Punkt dieses Modells ist die Möglichkeit Transitionen, d. h. Übergänge von einem Automationszustand in einen anderen zu modellieren (Schieben & Flemisch 2008). Dabei werden Verantwortlichkeiten und Kontrolle über das Gesamtsystem zwischen Fahrer und Automation neu aufgeteilt, wobei die Initiative für diese Übergabe-/Übernahmeprozesse sowohl vom Fahrer (z. B. Anschalten eines Systems) wie auch von der Automation (z. B. Anforderung eines Eingreifens durch den Fahrer) ausgehen kann.

Aufbauend auf diesem Automationspektrum, das auch im Rahmen des EU-Projektes HAVEit in adaptierter Form Anwendung fand, entwickelte die BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ eine Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen (Gasser et al. 2012, Gasser 2012). Diese BAST-Nomenklatur ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass die Definition der Automationsstufen nicht nur eine Beschreibung der Automationssysteme selbst enthält, sondern um die jeweils notwendige Verfügbarkeit des Fahrers erweitert wurde. Bei genauerer Betrachtung bleiben jedoch eine Reihe heutiger Fahrerassistenzsysteme und zukünftiger Automationssysteme unberücksichtigt. Die in der BAST-Einteilung enthaltenen Automationssysteme zeichnen sich explizit dadurch aus, dass sie die Umgebung wahrnehmen und gleichzeitig aktiv in die Fahraufgabe eingreifen können. Wie oben beschrieben, existieren demgegenüber jedoch auch konventionelle Fahrerassistenzsysteme, die ohne Umgebungserfassung in die Fahraufgabe eingreifen (z. B. ESP) und den Fahrer dadurch unterstützen. Darüber hinaus kann nach Billings (1997) und Parasuraman (2000) bereits von einem Assistenz- bzw. Automationssystem gesprochen werden, wenn Informationen aus der Umgebung wahrgenommen und für den Fahrer aufbereitet werden, er also nur informiert wird. Ein aktives Eingreifen in die Fahrzeugführung ist hierbei nicht zwingend erforderlich. Auch ADAS, die nur unter bestimmten Bedingungen, wie beispielsweise einer Gefährdung in die Fahrzeugführung eingreifen (z. B. Notbremsassistent), können in der ursprünglichen Benennung der BAST nicht zugeordnet werden. Zusätzlich zeigen Bestrebungen in den DFG-Projekten Conduct-by-Wire und H-Mode die Möglichkeit einer automatisierten Fahrzeugführung auf, bei der vom Fahrer beauftragte Manöver durch ein Automationssystem ausgeführt werden (Winner et al. 2006).

Daher wird die bestehende Nomenklatur im Rahmen dieser Arbeit ausgeweitet. Dabei wird die weiter oben angeführte Unterscheidung nach konventionellen und fortgeschrittenen Fahrerassistenzsystemen (Donner et al. 2007) zugrunde gelegt. Weiterhin wird berücksichtigt, welche Schritte des Informationsverarbeitungsprozesses die einzelnen Systeme umfassen und in welchem Maß der Fahrer jeweils in die



Fahraufgabe eingebunden bleiben muss. Unter Einbeziehung dieser Aspekte ergibt sich eine erweiterte Einteilung der Fahrerassistenz- bzw. Automationssysteme (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Nomenklatur und Beschreibung der Fahrerassistenz- bzw. Automationssysteme basierend auf der Benennung nach Gasser (2012).

¹übernommen, ²umbenannt, ³Bedeutung geändert, ⁴neue Automationsstufe

Benennung	Fähigkeiten der Automation / Assistenz	Rolle des Fahrers
Driver Only ³	<ul style="list-style-type: none"> Kein System aktiv 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus und hat die alleinige Kontrolle über das Fahrzeug.
Unterstützt ⁴	<ul style="list-style-type: none"> Unterstützung durch konventionelle Assistenzsystemen (z. B. ESP) 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus.
Informiert ⁴	<ul style="list-style-type: none"> Informierung und notfalls Warnung des Fahrer durch Assistenzsysteme mit Umfelderkennung (z. B. Spurverlassenswarner). 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus.
Assistiert ^{3,4}	<ul style="list-style-type: none"> Automationssysteme mit Umfelderkennung können in bestimmten Situationen aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, um den Fahrer zu unterstützen (z. B. LKAS). 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus.
Semiautomatisiert ²	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt dauerhaft Quer- oder Längsführung innerhalb gewisser Grenzen (z. B. ACC). Systemgrenzen werden nicht erkannt. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer übernimmt nur eine Dimension der Fahraufgabe. Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein.
Manöver-automatisiert ⁴	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung zur Ausführung vorgegebener Manöver (z. B. CbW (Winner et al. 2006)). Systemgrenzen werden nicht erkannt. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer kommandiert die auszuführenden Manöver. Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein.
Teilautomatisiert ¹	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen (z. B. Autobahnassistent (vgl. Gasser 2012)). Systemgrenzen werden nicht erkannt. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein.
Hochautomatisiert ¹	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen (z. B. Autobahnchaffeur (vgl. Gasser 2012)). Systemgrenzen werden erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert. Das System ist nicht in der Lage in jeder Situation den risikominimalen Zustand herbeizuführen. Wenn der Fahrer die Fahraufgabe übernehmen muss, stellt das System ihm genug Zeit zur Verfügung. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss die Funktion des Systems <u>nicht</u> dauerhaft überwachen. Der Fahrer muss die Fahraufgabe an Systemgrenzen übernehmen.
Vollautomatisiert ¹	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall (z. B. Autobahnpilot (vgl. Gasser 2012)). Systemgrenzen werden erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert. Bei ausbleibendem Eingreifen des Fahrers ist das System in der Lage den risikominimalen Zustand herbeizuführen. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss die Funktion des Systems <u>nicht</u> überwachen. Der Fahrer kann die Fahraufgabe an Systemgrenzen übernehmen.



3.4 Automationseffekte

Insgesamt bietet die Entwicklung hin zu höherer Automation im Fahrzeug viele Chancen. Die damit einhergehende Entlastung des Fahrers von der Fahraufgabe verspricht ein hohes Potenzial hinsichtlich der Komfortsteigerung für den Fahrer. Darüber hinaus besteht angesichts einer alternden Gesellschaft die Möglichkeit durch Automatisierung, die individuelle Mobilität länger aufrechtzuerhalten. Mit Hilfe von Car-to-X-Kommunikation ergibt sich weiterhin das Potenzial, den Verkehrsfluss zu steuern und damit Staus zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren. Nicht zuletzt ermöglichen aktive Sicherheitssysteme auch eine Erhöhung der Verkehrssicherheit (Hoeger et al. 2009), indem die Auftrittswahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers reduziert und dadurch die Unfallzahlen gesenkt werden.

Diesen Vorteilen gegenüber stehen jedoch auch Risiken und Fragen, die zum Teil aus der Luftfahrt bereits bekannt sind (Endsley & Kiris 1995, Damos et al. 1999, Billings 1996). Aufgrund der z. B. bei Transatlantikflügen auftretenden geringen Umgebungskomplexität waren Automationssysteme hier schon sehr früh realisierbar. Technische Assistenzsysteme wie Flight-Control-System, Autopilot, Autothrust und Flight-Management-System wurden entwickelt, um die Flugsicherheit zu erhöhen, indem sie die Cockpitcrew durch Automation von ihrer kontinuierlichen Führungsaufgabe entlasten. Die Automatisierung der Flugzeugführung führte hier einerseits zwar zu einer starken Entlastung von der Aufgabe, und reduzierte damit die Beanspruchung der Piloten, andererseits ergaben sich aus der Vielzahl der zu bedienenden Systeme in einzelnen Fällen Probleme in der Bedien- und Verstehbarkeit (Wiener 1989, Sarter & Woods 1995). Es besteht beispielsweise die latente Gefahr, dass unbeabsichtigtes Systemverhalten durch falsch vorgegebene Sollwerte nicht oder zu spät bemerkt wird (vgl. Mumaw et al. 2001). Trotz dieser potenziellen Gefahren hat sich die zunehmende Automatisierung im Flugverkehr nicht negativ auf die Unfallzahlen ausgewirkt. Dennoch sollte das Bewusstsein für diese Probleme vorhanden sein, um die Mensch-Maschine-Interaktion in angemessener Weise gestalten zu können. Übertragen auf die Fahrzeugführung bedeutet das, dass einerseits zwar die Komplexität der eigentlichen Fahraufgabe durch eine Automation reduziert werden kann, andererseits besteht jedoch die Gefahr, die Beanspruchung des Fahrers durch eine zu komplexe und schwierig zu verstehende Interaktion mit dem Automationssystem zu erhöhen.

Aber nicht nur die Verstehbarkeit der Automation bzw. des Automationsverhaltens an sich stellt ein Problem dar. Eine weitere, nicht zu unterschätzende negative Komponente der Automatisierung äußert sich im menschlichen Verhalten. In einem automatisierten System übernimmt der Mensch nicht mehr die Funktion eines aktiven Reglers, sondern nur noch Überwachungstätigkeiten. Dadurch sinkt die Interaktionsfrequenz zwischen Benutzer und System enorm. Wie Endsley und Kiris in ihrer 1995



vorgestellten Studie zeigen, kann die Monotonie dieser Überwachungstätigkeit zur Folge haben, dass sich der Benutzer aus dem Mensch-Maschine-Regelkreis zurückzieht. Nach De Waard (1996) ergibt sich daraus eine verringerte Leistungsfähigkeit, da sowohl Aufmerksamkeit wie auch Aktivierung reduziert werden. Darüber hinaus kann ein ausreichendes Situationsbewusstsein nur dann aufrechterhalten werden, wenn der Bediener in angemessener Weise mit der Umwelt und der Automation interagiert und dadurch im Regelkreis gehalten wird (Endsley 1995). Da der Mensch weiterhin für die Überwachung des Gesamtsystems und die Bewältigung auftretender Problemsituationen benötigt wird, können die reduzierte Leistungsfähigkeit und das verringerte Situationsbewusstsein zu Problemen führen. Bainbridge (1983) bezeichnet dies als „Ironies of Automation“. Auch automatisierte Systeme, soweit sie nicht vollständig autonom arbeiten, stellen weiterhin Mensch-Maschine-Regelkreise dar, wobei nach Bainbridge die Ironie darin liegt, dass der Beitrag des menschlichen Nutzers umso wichtiger wird, je weiter die Automation entwickelt ist.

Auch im Fahrzeugbereich bedeutet die Entwicklung hin zu einer zunehmenden Automatisierung der Fahraufgabe einen Übergang von einer ausführenden zu einer überwachenden Tätigkeit, die sich eher monoton und vigilanzmindernd darstellen könnte. Dadurch reduziert sich die Involvierung in die Fahraufgabe. Das Projekt EMPHASIS (Buld et al. 2002) hat gezeigt, dass Fahrer beim Fahren mit Assistenzsystemen dazu neigen, Systemaktionen leicht zu generalisieren und teilweise kritische Situationen nicht bzw. erst sehr spät zu erkennen. Aufgrund der mangelnden Einbindung in das Fahrgeschehen verfügen sie über kein ausreichendes Wissen über die Umgebung und den Fahrzeugzustand. Sie sind sich ihrer Situation also nicht vollständig bewusst.

Mit zunehmender Automation ist davon auszugehen, dass diese Probleme weiter in den Vordergrund treten und dadurch auch die negativen Aspekte der Automatisierung eine zunehmende Rolle spielen werden. Diese können sich auf unterschiedliche Art und Weise äußern und haben unterschiedliche Ursachen. Tabelle 3-5 zeigt eine Zusammenstellung von Automationseffekten nach Lindberg (2011), unterteilt in die drei Problemfelder Situationsbewusstsein, Kompetenzverlust und Vertrauen.

Im Hinblick auf Situationen, an denen das Automationssystem an seine Grenzen stößt, Fehler macht oder komplett ausfällt, ist es notwendig, dass der Fahrer in der Lage ist, diese Problemsituationen zu erkennen und adäquat zu handeln. Insbesondere die Entbindung von der Fahraufgabe führt dabei zu Unzulänglichkeiten in der Reaktionsfähigkeit des Fahrers. Im folgenden Kapitel soll dieser Aspekt daher nochmals detaillierter beleuchtet werden.



Tabelle 3-5: Problemfelder der Automatisierung nach Lindberg (2011).

	Teilproblem	Beispiel
Fehlendes Situationsbewusstsein	Vigilanzminderung	Das lange Fahren mit ACC kann zu einer Verlängerung der Reaktionszeiten oder schlechterer Spurhaltung führen.
	Falsches mentales Modell/Systemverständnis	Da keine Statusanzeige vorhanden ist, übersieht der Fahrer, dass er längere Zeit mit übersteuertem Tempomat fährt und rollt ungebremst in eine Kreuzung.
	Schlechte bzw. fehlende Systemrückmeldung	Da keine Statusanzeige vorhanden ist, übersieht der Fahrer, dass er längere Zeit mit übersteuertem Tempomat fährt und rollt ungebremst in eine Kreuzung.
	Cognitive Capture	Die Fokussierung auf eine im Head-Up-Display projizierte Trajektorie führt dazu, dass der Pilot beim Landen Personen oder Querverkehr auf der Landebahn übersieht.
	Mode Awareness / Mode Confusion	Beim Versuch, den Ausfall eines Triebwerks zu kompensieren, übersieht der Pilot den aktivierten Autopilot und arbeitet erfolglos gegen diesen.
Kompetenzverlust	Verlust von Regelfertigkeiten	Aufgrund häufiger automatischer Landeanflüge verlernt ein Pilot die Fähigkeit zum manuellen Landen.
	Verlust von wissensbasierten Fähigkeiten	Bei ausschließlicher Nutzung seines Navigationssystems kann ein Fahrer verlernen, sich nur mithilfe einer Karte in einer fremden Umgebung zu orientieren.
Vertrauen	Overreliance / Complacency	Aufgrund zu großen Vertrauens in das ACC seines Fahrzeugs bemerkt der Fahrer ein nicht erkanntes Vorderfahrzeug erst spät und muss stark bremsen.
	Missbrauch	Der Fahrer nutzt den Spurhalteassistent seines Fahrzeugs, um freihändig auf der Autobahn zu fahren.
	Risikokompensation	Ein sportlicher Fahrer fährt riskanter, weil er sich aufgrund seines ABS sicherer fühlt. Anmerkung: Die Hypothese der Risikokompensation ist in der Literatur umstritten.
	Mistrust	Ein Fahrer misstraut dem ACC seines neuen Fahrzeugs und nutzt die Funktion überhaupt nicht.



3.5 In-the-Loop / Out-of-the-Loop

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, kann das Zusammenwirken von Mensch und Maschine im Allgemeinen sowie die Interaktion von Fahrer und Fahrzeug im Speziellen über den Mensch-Maschine-Regelkreis anschaulich dargestellt werden. Am Beispiel der Fahrzeugführung bedeutet der Begriff „In-the-Loop“, dass der Fahrer in die Regelschleife der Fahraufgabe eingebunden ist und über ausreichende Kenntnisse bezüglich des Fahrzeugstatus sowie der Verkehrssituation verfügt. „Driver-in-the-Loop“ setzt voraus, dass der Fahrer eine aktive Rolle im Fahrer-Fahrzeug-System einnimmt. Er beobachtet aktiv sein Umfeld, sammelt Informationen, erkennt kritische Situationen, trifft die richtigen Entscheidungen und handelt entsprechend angepasst (IHRA 2010).

Demgegenüber steht der Begriff „Out-of-the-Loop“. Dieser bezeichnet das Herausnehmen des Menschen aus dem Mensch-Maschine-Regelkreis meist aufgrund einer unterstützenden Automation. Daraus ergibt sich das „Out-of-the-Loop performance problem“ (Endsley & Kiris 1995), wonach die Fähigkeit Systemfehler zu identifizieren und darauf zu reagieren durch Automatisierung abnimmt. Endsley unterscheidet dabei zwischen zwei hauptsächlichen Effekten zunehmender Automation:

- **Loss of Skills:** Grundlegende Handlungsmuster und Strategien werden verlernt oder entsprechend dem SRK-Modell nach Rasmussen auf eine bewusstere Ebene gehoben, wodurch sich Reaktionszeiten verlängern und die Reaktionsqualität abnimmt (vgl. Schiff 1983, Wiener & Curry 1980).
- **Loss of Situation Awareness:** Entsprechend dem, in Kapitel 2.2 vorgestellten Modell von Situation Awareness nach Endsley (1995a) kann eine zunehmende Automation und damit verbunden die Herausnahme des Menschen aus dem Regelkreis dazu führen, dass der Operator sich z. B. des Systemzustandes, der Umgebung und der Handlungsalternativen nicht mehr bewusst ist. Entsprechend der drei Ebenen des Situationsbewusstseins „Wahrnehmung, Verarbeitung, Antizipation“ beschreibt Wiener (1989) die Hauptfragen, die sich der Nutzer im Umgang mit Automation stellen muss "What is it doing? Why is it doing that? What will it do next?".

Mit zunehmender Automation im Fahrzeugbereich werden diese Probleme importiert, ohne dass dafür bisher geeignete Beurteilungsmethoden zur Verfügung stehen. Messmethoden aus der Luftfahrt werden zwar teilweise auf die Fahrzeugführung angewendet (z. B. SAGAT, SART), sind jedoch nicht vollständig übertragbar (Rauch 2009, Rauch et al. 2010). Während der Effekt „Loss-of-Skills“ anhand objektiver Leistungsmerkmale recht gut gemessen werden kann, treten bei der Bestimmung des Konstrukts „Situation-Awareness“ erhebliche Probleme auf (Gradenegger et al. 2010).



Darüber hinaus müssen bei der Betrachtung der Out-of-the-Loop-Problematik im Fahrzeugkontext auch klassische Ablenkungsfragen mit berücksichtigt werden. Zusätzlich zu der von Endsley proklamierten Auswirkung von Automation wirken sich auch diese auf die Einbindung des Fahrers in die Fahrer-Fahrzeug-Regelschleife aus. Das in Abbildung 3-3 dargestellte Modell zeigt eine erweiterte Version des von Bubb (1975) erarbeiteten Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises. Neben der eigentlichen Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug sind in dem dargestellten Modell die Bearbeitung einer Nebenaufgabe und die Unterstützung des Fahrers durch ein Automationssystem integriert.

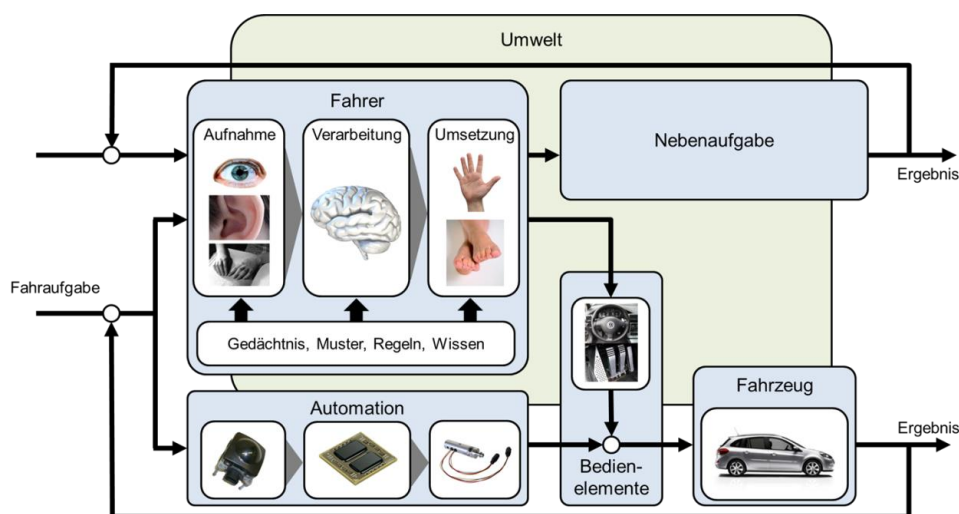


Abbildung 3-3: Allgemeiner Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis.

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, können die parallel verlaufenden Schleifen sowohl der Nebenaufgabe als auch der Automationsunterstützung den eigentlichen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis stören und sich auf „Driver-in-the-Loop“ auswirken. Die dabei wirkenden Mechanismen sind jedoch völlig unterschiedlicher Natur.

Im Falle eines „Out-of-the-Loop“-Effektes aufgrund einer Nebenaufgabenbearbeitung tauchen die bereits vielfach untersuchten Probleme der Aufmerksamkeits- bzw. Ressourcenverteilung auf. Man kann also von einer simplen „Ablenkungswirkung“ sprechen. Dieser Effekt ist bereits gut untersucht und kann anhand von Kennwerten wie Blickabwendungsdauer oder Reaktionszeit klassifiziert werden. Die Defizite in diesem Fall liegen in der Regel bereits bei der Informationsaufnahme. Durch die Aufmerksamkeitsaufteilung werden wichtige Informationen aus der Primäraufgabe (Autofahren) übersehen, was dazu führt, dass die nachgeschalteten Prozesse der Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung evtl. fehlerhaft ausgeführt werden. Aber auch hinsichtlich der für die Informationsverarbeitung zur Verfügung stehenden Kapazitäten muss hier eine Aufteilung zwischen Haupt- und Nebenaufgabe in Kauf genommen werden. Kognitiv anspruchsvolle Nebenaufgaben können durchaus dazu führen, dass Entscheidungen in der Hauptaufgabe aufgrund der begrenzten Kapazi-



täten falsch getroffen und umgesetzt werden. Übersteigt die gleichzeitige Bearbeitung einer Nebenaufgabe und der Fahraufgabe die Kapazitäten des Fahrers, führt dies u. U. dazu, dass er den Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis nicht mehr ordnungsgemäß durchlaufen kann. Dementsprechend ist es legitim, nicht nur in Zusammenhang mit einer Automation von „Out-of-the-Loop“ zu sprechen, auch die Bearbeitung von Nebenaufgaben kann denselben Effekt hervorrufen.

In der Literatur ist kein quantitatives Maß für den „Out-of-the-Loop“-Einfluss zu finden. Ein fehlendes bzw. schlechtes Situationsbewusstsein oder das Auftreten von „Out-of-the-Loop“ äußert sich meist in langsameren Reaktionszeiten und einer steigenden Anzahl fehlerhafter Reaktionen. Unter Umständen kann damit nachträglich qualitativ beurteilt werden, ob der Fahrer in einzelnen Situationen im Regelkreis war oder nicht. Eine quantitative Skalierung ist dadurch jedoch nicht möglich.

Eine Echtzeitbestimmung des Fahrerzustandes hinsichtlich „Out-of-the-Loop“ ist dementsprechend schwierig und bisher nicht vorhanden. Zwar erlauben verschiedene Indikatoren wie Blickverhalten (vgl. Gengenbach 1997, Schweigert 2003), Pupillometrie (Marshall 2007, Schwalm 2009) oder physiologische Parameter (Reimer et al. 2011, Mehler et al. 2012) eine Einschätzung einzelner Aspekte des Gesamtkonstrukts. Ein Rückschluss auf die Involvierung in die Hauptaufgabe lässt sich dadurch jedoch nicht ziehen. Ein grundsätzliches Problem aller Messmethoden für „Out-of-the-Loop“ und für Situation Awareness ist die Tatsache, dass objektive Daten nicht in allen Bereichen des Informationsverarbeitungsprozesses auf praktikable Art aufgenommen werden können. Während Blickbewegungen auf der Eingangsseite der Informationsverarbeitung sowie die tatsächlich ausgeführte Reaktion auf der Ausgangsseite objektiv zu erheben sind, können die dazwischen liegenden Prozesse (z. B. Entscheidungsgenerierung oder Handlungsauswahl) größtenteils nur interpretativ oder durch Befragungen beurteilt werden.

3.6 Von der Reaktions- zur Übernahmezeit

Im selben Maß, wie sich der Fahrer mit zunehmender Automationsunterstützung vom aktiven Bediener zum passiven Überwacher entwickelt (Lee & See 2004), tritt auch die Reaktionszeit als Hinweis auf den Fahrerzustand in den Hintergrund und wird von einer wesentlich längeren Übernahmezeit abgelöst. Die Reaktionszeit ist definiert als die „Zeit zwischen dem Eintritt des Reizes und dem (Eintritt) der Reaktion...“ (Dorsch 1970, S. 348) bzw. die „Zeit, die zwischen Reizdarbietungsbeginn und Auftreten der reizbezogenen Verhaltensantwort des Individuums verstreicht“ (Zimmer 1995, S. 388). Der Begriff Reaktionszeit beschreibt also den Zeitraum vom Auftreten eines Reizes bis zum Beginn der darauffolgenden Reaktion. Angelehnt an diese Definition wird die menschliche Reaktionszeit in der Fahrzeugtechnik hauptsächlich interpretiert als die Zeit vom Auftreten einer fahrrelevanten Information bis zum Beginn der Reak-



tionsumsetzung an den Bedienelementen. In den meisten Fällen handelt es sich um Bremsreaktionszeiten. Bei nahezu allen bestehenden Untersuchungen ist der Fahrer dabei sowohl auf der Führungs- als auch auf der Stabilisierungsebene in den Fahrzeugführungsprozess eingebunden. Auch wenn der Fahrer in vielen Studien durch eine Nebenaufgabe abgelenkt ist, muss er dennoch die Fahraufgabe weiterhin erfüllen. Aufgrund dieser Überlegungen können folgende Voraussetzungen formuliert werden, um von Reaktionszeiten zu sprechen:

- Der Fahrer ist zumindest teilweise aktiv in den Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis eingebunden und
- er übt die operative Kontrolle über das System aus.

Anders verhält es sich bei der Nutzung hochautomatisierter bzw. autonomer Systeme zur Fahrzeugführung. Solange die Automation arbeitet, muss der Fahrer auf keiner Ebene der Fahrzeugführung eingreifen, d. h. er wird vollständig oder zumindest teilweise aus dem Loop genommen. Bei Unzulänglichkeiten der Assistenz können dabei unterschiedliche Anforderungen an das menschliche Verhalten entstehen.

Im Falle von Systemfehlern oder Systemausfällen, die nicht von der Automation als solche erkannt werden, besteht die Gefahr, dass der Fahrer den Handlungsbedarf erst spät oder gar nicht bemerkt. Beim Auftreten von Systemgrenzen, welche das System selbst als solche erkennen kann (z. B. Wegfall der Fahrbahnmarkierungen in 100 m), muss die Fahraufgabe wieder an den Fahrer übergeben werden. Der hier ablaufende Prozess geht weit über eine einfache Reaktion hinaus. Bei einem solchen Übergabe-/Übernahmeprozess laufen wesentlich komplexere Vorgänge ab, da sich der Fahrer zunächst seiner Situation und Umgebung bewusst werden muss, um adäquat reagieren zu können. Dementsprechend ist zu erwarten, dass die Übernahmeprozessdauer auch wesentlich länger als die reine Reaktionszeit ist.

Angelehnt an die Definition der Reaktionszeit lässt sich die Übernahmezeit folglich als Zeit vom Auftreten einer Übernahmeaufforderung bzw. einer Situation, die die Übernahme erforderlich macht, bis zur vollzogenen Aneignung der Kontrolle über das System beschreiben. Vor einem Übernahmeprozess

- ist der Mensch weitgehend von der operativen Systemkontrolle entbunden,
- und maximal noch passiv als Überwacher tätig.

Zusätzlich zur Unterscheidung von Reaktion und Übernahme anhand der Einbindung des Fahrers in die Fahraufgabe ist es sinnvoll, eine Differenzierung nach Anzahl der Handlungsalternativen durchzuführen. Ist beim Eingriff eine Entscheidung zwischen mehreren möglichen Handlungen nötig, kann analog zur Wahlreaktionszeit (vgl. Teichner & Krebs 1974) von einer Wahlübernahmezeit gesprochen werden.



Sowohl die Anzahl der Handlungsalternativen als auch die Involvierung in die Fahraufgabe dienen dabei nicht nur der Klassifizierung, sondern haben auch Auswirkungen auf die Dauer der für eine Reaktion bzw. Übernahme benötigten Zeit. Darüber hinaus existiert eine Reihe weiterer Einflussfaktoren, die diese Zeiten positiv (z. B. günstige MMI-Gestaltung) oder negativ (z. B. Nebenaufgabe) beeinflussen können. Abbildung 3-4 zeigt eine grafische Zusammenfassung der Begrifflichkeiten sowie der Einflussfaktoren auf die Reaktions- bzw. Übernahmezeit.

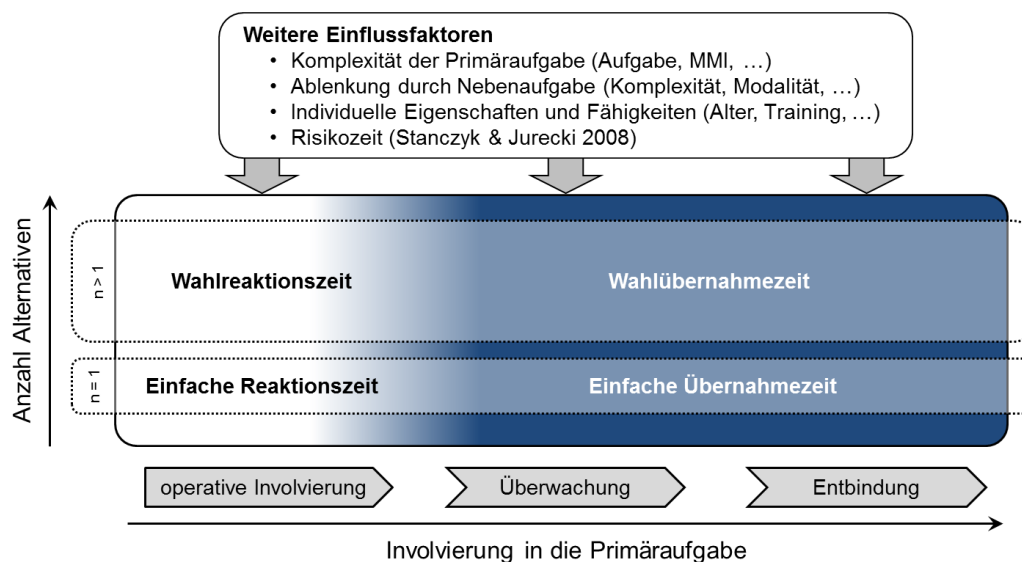


Abbildung 3-4: Unterscheidung von Reaktions- und Übernahmezeit sowie Einflussfaktoren.

Neben den Faktoren, die die tatsächliche Fähigkeit zum Eingreifen limitieren, muss auch die subjektiv empfundene Dringlichkeit eines Eingriffs berücksichtigt werden. Diese von Stanczyk & Jurecki (2008) mit dem Begriff „Risikozeit“ beschriebene Größe führt dazu, dass z. B. Reaktionen in ähnlichen Szenarien umso schneller ablaufen, je dringlicher sich die Situation darstellt. Es spielt also nicht nur die reine Eingriffsfähigkeit, sondern auch der Eingriffswille eine Rolle.



4 Forschungsbedarf

Wie in Kapitel 3.5 dargelegt wurde, haben sowohl die Beschäftigung mit einer Nebenaufgabe wie auch die zunehmende Automatisierung im Fahrzeug Einfluss auf die Einbindung des Fahrers in den Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis und wirken sich demnach auf die Reaktions- bzw. Übernahmezeit aus. In diesem Kapitel werden ausgewählte Forschungstätigkeiten der neueren Zeit auf diesem Gebiet kurz zusammengefasst und der weiterhin notwendige Forschungsbedarf abgeleitet.

4.1 Bestehende Forschung

Im Hinblick auf eine isolierte Betrachtung der Ablenkungswirkung durch Tertiäraufgaben gibt es eine ganze Reihe von Untersuchungen, die belegen, dass eine Nebenaufgabenbearbeitung zu Reaktionszeitverlängerungen innerhalb der Hauptaufgabe führt. Die weitreichende Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet wurde hauptsächlich angestoßen durch die zunehmende Verbreitung mobiler Telefone und deren Verwendung während der Fahrt.

Untersuchungen zu Nebenaufgaben und Reaktion

Hancock (1999, zitiert in Spießl 2011) konnte z. B. nachweisen, dass die Bedienung eines Mobiltelefons zu bis zu 30 % längeren Reaktionszeiten und einer bis zu 15 % schlechteren Fahrleistung führt. Laut Salvucci & Macuga (2002) spielt dabei auch die Art und Weise, wie das Telefon bedient wird, eine entscheidende Rolle. Das manuelle Wählen einer Telefonnummer führte in seinen Versuchen zu einer nachweisbar schlechteren Fahrleistung als z. B. die Anwendung der Sprachwahlfunktion. Aber nicht nur bezogen auf den konkreten Anwendungsfall der Mobiltelefonie können Leistungseinbußen bei der Ausführung der Fahraufgabe nachgewiesen werden. Lansdown et al. (2004) konnte allgemein zeigen, dass die Bedienung einer Nebenaufgabe während der Fahrt zu einer Performanzminderung bei der Fahrzeugführung führt und gleichzeitig der empfundene Workload steigt. Einen umfassenden Überblick über die Auswirkungen von Fahrerablenkung geben Young et al. (2003) in ihrer Zusammenfassung bestehender Literatur.

Im Hinblick auf die Informationsvielfalt in heutigen Fahrzeugen stellt sich darüber hinaus die Frage nach einem Informationsmanagement, zur Koordination der Informationen, die dem Fahrer in bestimmten Situationen angezeigt werden, ohne ihn von der Fahraufgabe abzulenken. Hibberd et al. (2010) beschäftigen sich in diesem Kontext nicht nur mit dem Einfluss unterschiedlicher Ablenkungsmodalitäten, sondern auch mit dem Zeitpunkt der Ablenkung. Dabei zeigt sich, dass sowohl die Art (visuell, auditiv, haptisch) wie auch der Zeitpunkt der Ablenkung vor einem Bremsereignis Einfluss auf die Reaktionszeit haben. Entsprechend des mehrdimensionalen Ressourcenmodells nach Wickens & Hollands (1999) verlängern visuelle Ablenkungen



die Reaktionszeit generell erheblich mehr als auditive oder haptische Ablenkungen. Darüber hinaus ist eine zunehmende Interferenz der Nebenaufgabenbearbeitung mit der Fahrleistung zu erkennen, je näher die Ablenkung und Bremsereignis zeitlich beieinander liegen. Bei einer Reizpräsentation der Ablenkung von weniger als 350ms vor dem Bremsreiz wird die Bremsreaktionszeit länger je näher der Ablenkungsreiz an den Bremsreiz rückt.

Untersuchungen zu Automation und Nebenaufgabe

Den Ansatz einer Kombination aus Ablenkungsaufgaben und assistierter bzw. automatisierter Fahrt zeigen Stolzmann et al. (2010). Sie betrachten in einem Realversuch die Auswirkungen unterschiedlicher, anwendungsnaher Nebenaufgaben (z. B. Radiosender suchen) auf die Reaktionszeiten bei einer ACC-geregelten Fahrt. Ebenso wie die Ablenkungsuntersuchungen bei manueller Fahrzeugführung führen auch in diesem Versuch insbesondere Ablenkungen mit visueller Komponente (z. B. Radio- und Navigationseinstellung) zu längeren Reaktionszeiten. Einschränkend ist zu diesem Versuch anzumerken, dass nicht die Reaktionszeit auf tatsächliche Ereignisse in der Fahraufgabe gemessen wird. Vielmehr wird eine Wahlreaktionsaufgabe, bei der auf Anzeigen im Head-Up Display mit Betätigung von Lenkradtasten reagiert werden muss, als Grundlage für die Reaktionszeitmessung herangezogen.

Einen Schritt weiter gehen Merat et al. (2012). In einem dynamischen Simulator untersuchen sie die Auswirkungen der Bearbeitung einer kognitiv belastenden Nebenaufgabe und stellen dabei manuelles Fahren einer automatisierten Fahrt gegenüber. Betrachtet wird das Fahrerverhalten mit und ohne Nebenaufgabe, sowohl während einer ereignisfreien Fahrt wie auch während eines notwendigen Fahrmanövers. Das Fahrmanöver ist in Form eines angekündigten Fahrstreifenwechsels gestaltet, der sowohl in der manuellen wie auch in der automatisierten Fahrt durchgeführt werden muss. In der automatisierten Fahrt müssen die Probanden dazu die Fahraufgabe übernehmen. Für die Thematik der vorliegenden Arbeit ist dieses Fahrerverhalten während des Fahrstreifenwechsels von besonderem Interesse. Die Untersuchungsergebnisse zeigen hier eine Wechselwirkung zwischen Automationsgrad und Nebenaufgabenbearbeitung. Ohne Nebenaufgabe führen die Probanden den Fahrstreifenwechsel in beiden Automationsgraden in sehr ähnlicher Weise durch. Tritt der Fahrstreifenwechsel jedoch während der Bearbeitung einer Nebenaufgabe auf, reagierten die Probanden in der manuellen Fahrt mit einer deutlicheren Geschwindigkeitsreduktion, um sich an die Gegebenheiten anzupassen. Die Übernahme aus der automatisierten Fahrt erfolgt mit deutlich höheren Geschwindigkeiten. Merat et al. führen dies auf einen Mangel an Situationsbewusstsein in der automatisierten Fahrt zurück, der sich aus der Aufmerksamkeitsverschiebung hin zur Nebenaufgabe ergibt.



Auch Carsten et al. (2012) untersuchen den Einfluss des Automationsgrades auf den Umgang mit einer Nebenaufgabe. In ihrer Untersuchung werden drei Automationsstufen berücksichtigt:

- Fahrt ohne Assistenz (manuell)
- Fahrt mit Quer- oder mit Längsführung (semiautomatisiert)
- Fahrt mit kombinierter Quer- und Längsführung (hochautomatisiert)

Bei der semiautomatisierten Variante differenzieren Carsten et al. gezielt nach der Dimension der Unterstützung. Die eine Hälfte der Probanden fährt mit einer Automation in Längsrichtung, die andere Hälfte mit einer Automation in Querrichtung. Die manuelle Fahrt sowie die hochautomatisierte Fahrt werden von allen Probanden gleichermaßen absolviert. Während der Fahrten erhalten die Versuchspersonen die Möglichkeit sich mit unterschiedlichen, realitätsnahen Nebenaufgaben zu beschäftigen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Angebot, sich ein Video anzusehen, da diese visuell ablenkende Aufgabe am meisten mit der Fahraufgabe interferiert. In diesem Zusammenhang zeigen Carsten et al., dass das DVD-Angebot mit zunehmendem Automationsgrad deutlich intensiver genutzt wird. Die Probanden wenden sich also in zunehmendem Maße der Nebenaufgabe zu. Hinsichtlich der unterschiedlichen Unterstützung in der semiautomatisierten Bedingung zeigt sich eine intensivere Nutzung des DVD-Angebotes bei Probanden mit automatisierter Querführung, gegenüber den Probanden mit Automation in der Längsführung. Als ein Kritikpunkt an der Untersuchung von Carsten et al. ist die Tatsache zu sehen, dass während der gesamten Fahrt keine unvorhergesehenen Ereignisse auftraten. Die Automation arbeitete zu jedem Zeitpunkt absolut zuverlässig und die Probanden wurden dahingehend instruiert.

Untersuchungen zu Automation und Reaktion

Zusätzlich zu den bereits sehr umfassend untersuchten und gut dokumentierten Effekten einer Nebenaufgabenbearbeitung treten in den letzten Jahren immer mehr die Folgen zunehmender Fahrzeugautomation in den Vordergrund. Auch in den DFG-Projekten H-Mode und Conduct-by-Wire werden die Auswirkungen auf den Fahrer thematisiert. So zeigt Flemisch (2008a), dass bei einem Systemausfall in einer Kurve fünf von fünf Probanden in der Lage sind auf der Straße zu bleiben, wenn sie trotz Automatisierung weiter in die Fahraufgabe eingebunden bleiben. Demgegenüber führt der Ausfall einer Vollautomation in fünf von fünf Fällen zu einem Abkommen von der Straße.

Niederée und Vollrath (2009) zeigen, dass die Reaktionszeit auf Systemfehler nachweisbar vom Grad der Unterstützung und tendenziell von der Systemzuverlässigkeit abhängt. Je höher die Automationsstufe des Fahrzeuges und je geringer die Fehlerwahrscheinlichkeit der Automation, umso länger ist die Reaktionszeit beim Eintreten von Systemfehlern.



Merat & Jamson (2009) beschäftigen sich im Rahmen des Projektes CityMobil (Tofeti et al. 2009) mit den Auswirkungen hochautomatisierter Fahrzeugführung auf das Fahrerverhalten. Dazu stellen sie manuelle und automatisierte Fahrzeugführung einander gegenüber und untersuchen den Einfluss auf die Antizipationsfähigkeit kritischer Szenarien. Dabei tritt eine Reaktion auf sich anbahnende kritische Events im automatisierten Fahrmodus signifikant später auf als bei manueller Fahrzeugführung.

Untersuchungen zur Übernahme der Fahraufgabe

Mit der zunehmenden Anzahl an möglichen Automationsstufen ergeben sich auch Forschungstätigkeiten hinsichtlich der Zeit, die ein Fahrer benötigt, um zwischen unterschiedlichen Automationsstufen zu wechseln. Petermann betrachtet zusammen mit Kiss (Petermann & Kiss 2010) sowie zusammen mit Schlag (Petermann & Schlag 2010) im Kontext des EU-Projektes HAVEit die Übergangszeiten zwischen unterschiedlichen Automationsgraden. Aufbauend auf einer für HAVEit adaptierten Version des Automationsspektrums nach Flemisch (2008b) werden dabei folgende Automationsstufen berücksichtigt:

- Fahrt ohne Assistenz
- Tempomat (nur in Petermann & Schlag 2012)
- ACC-geregelte Fahrt
- Fahrt mit kombinierter Quer- und Längsführung, wobei die Spurhaltung nur unterstützt wird
- Fahrt mit kombinierter Quer- und Längsführung, wobei die Spurhaltung vom System übernommen wird

Die Untersuchungen beinhalten alle Kombinationen von Übergängen zwischen den vorhandenen Automationsstufen inklusive eines vollständigen Systemabwurfes (Übergang auf manuell). Letzteres stellt den interessantesten Aspekt dieser Versuche dar, da insbesondere hier mit Problemen zu rechnen ist, sollte der Fahrer aufgrund von Automationseffekten nicht in der Lage sein, die Fahraufgabe ordnungsgemäß zu übernehmen. In Petermann & Kiss (2010) wird der Fahrer aufgrund eines Hindernisses (Reh) auf der Fahrbahn zur Übernahme aufgefordert und muss ein Ausweichmanöver durchführen. Ohne konkrete Zeiten zu nennen, wird deutlich, dass die Rücktransition an den Fahrer schneller und mit einer höheren Qualität abläuft je niedriger die Automationsstufe ist, aus der übernommen werden muss. In Petermann & Schlag (2010) wird die Zeit bis zur manuellen Übernahme der Fahraufgabe aus der höchsten Automationsstufe heraus mit 1,6 Sekunden angegeben. Leider ist nicht näher spezifiziert, unter welchen Umständen (Szenario, Übernahmeaufforderung) diese Übernahme durchgeführt wurde und nach welchen Kriterien Anfang und Ende des Übernahmevorgangs festgelegt wurden.

Aufbauend auf dieser Auswahl veröffentlichter Untersuchungen ergibt sich ein großes Forschungsfeld mit offenen Fragestellungen. Im Folgenden werden die in dieser



Arbeit behandelten Forschungsfragen aufgeführt. Darüber hinaus wird begründet, warum die Klärung dieser Probleme für die Entwicklung automatisierter Fahrzeugsysteme von Bedeutung ist.

4.2 Auswirkungen steigender Automation auf das Fahrerverhalten

In Kapitel 3.5 wurde auf theoretischer Basis deutlich gemacht, dass sich sowohl steigende Automationsgrade wie auch die Bearbeitung von Nebenaufgaben auf die Einbindung des Fahrers in die Fahrzeugführung auswirken und damit Einfluss auf die Out-of-the-Loop-Problematik haben. Darüber hinaus wurde im vorangegangenen Kapitel gezeigt, dass zwar einige Forschungsergebnisse zu jedem einzelnen der beiden Teilbereiche vorliegen, diese jedoch nur selten in Kombination untersucht wurden. Einen Anstoß zu Forschungen auf diesem Gebiet stellen die Veröffentlichungen von Merat et al. (2012) und Carsten et al. (2012) dar. Einschränkend ist zu diesen Untersuchungen jedoch zu anmerken, dass die Probanden stets eine fehlerfreie Automation erlebten. Bei Merat et al. (2012) war zwar ein Fahrereingriff nötig, dieser erfolgte jedoch aufgrund eines Übernahmehinweises mit einer sehr langen Vorlaufzeit von ca. 45 Sekunden. Eine Entdeckung kritischer Situationen und, darauf aufbauend, ein Eingriff zu ihrer Bewältigung waren nicht nötig.

Die erste in dieser Arbeit behandelte Forschungsfrage zielt daher, ähnlich wie die beiden genannten Untersuchungen, darauf ab, die Auswirkungen zunehmender Automation auf den Umgang des Fahrers mit einer Nebenaufgabe zu evaluieren. Dabei müssen die Probanden jedoch während der automatisierten Fahrten weiterhin in der Lage sein, auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren. Diese Reaktionsfähigkeit, das Verhalten und die benötigte Reaktionszeit in solchen Situationen ist ebenfalls Gegenstand der Fragestellung. Insbesondere vor dem dargestellten Hintergrund einer zunehmenden Automation im Fahrzeug, kombiniert mit der stetig wachsenden Anzahl mobiler Endgeräte sowie der steigenden Bereitschaft junger Fahrer sich während der Fahrt mit Nebenaufgaben zu beschäftigen (Kubitzki 2011), ist eine detailliertere Beleuchtung dieses Themas von großem Interesse. Die in Kapitel 6.1 vorgestellte Studie geht den formulierten Fragen systematisch nach. Basierend auf den weiter oben beschriebenen Grundlagen der Informationsverarbeitung ist von den im Folgenden kurz beschriebenen Annahmen ausgegangen worden. Die spezifischen, überprüfbaren Hypothesen, die sich aus diesen theoretischen Überlegungen ergeben, sind in Kapitel 6.1.2 detailliert aufgeführt.

Mit zunehmendem Automationsgrad wird die Bearbeitung einer Nebenaufgabe intensiviert und es tritt eine Verschiebung der Aufmerksamkeit weg von der eigentlichen Fahraufgabe hin zur Nebenaufgabe auf. Diese Annahme basiert auf den Ausführungen von DeWaard (1996), wonach der Mensch bestrebt ist, ein gewisses Anregungslevel zu halten und Monotonie zu vermeiden. Während bei der manuellen Fahrt da-



von auszugehen ist, dass der Schwerpunkt der Ressourcenzuweisung auf die Fahraufgabe konzentriert ist und nur eine Kontrolle der Nebenaufgabe erfolgt, wird angenommen, dass bei automatisierter Fahrt die Nebenaufgabe in den Fokus rückt (Abbildung 4-1).

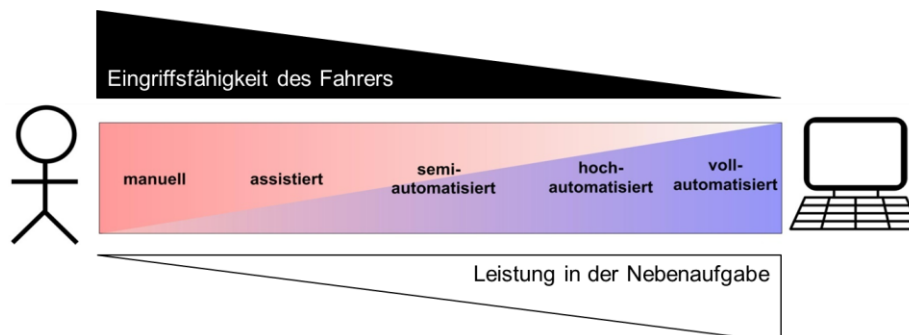


Abbildung 4-1: Vermutete Abhängigkeit der Nebenaufgabenleistung und der Eingriffsfähigkeit vom Automationsgrad.

Die eigentliche Fahraufgabe wird in zunehmendem Maße nur noch über Kontrollblicke abgesichert. Im Falle unvorhergesehener Unzulänglichkeiten des Systems (Fehler, Ausfälle, Grenzen) kann dies dazu führen, dass der Fahrer die Problematik zu spät erkennt und dementsprechend verzögert reagiert. Hinsichtlich der Beanspruchung des Fahrers ist davon auszugehen, dass der Workload aufgrund der Entlastung von der Primäraufgabe „Fahrzeugführung“ sinkt. Die dabei frei werdenden Kapazitäten werden jedoch zum Teil wieder in die Bearbeitung der Nebenaufgabe investiert.

4.3 Identifikation der Übernahmedauer

Neben dem Sicherheitsgewinn im Straßenverkehr ist die Steigerung des Komforts durch die Entlastung des Fahrers ein weiteres Ziel steigender Fahrzeugautomatisierung (z. B. ACC, Lane Assist). Die Verbreitung von Automationssystemen und deren Funktionsumfang werden aus den beiden genannten Gründen tendenziell weiter zunehmen. Gleichzeitig besteht wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt die Gefahr, dass Personen dazu neigen, sich bei steigendem Automationsgrad zunehmend mit der Bearbeitung von Nebenaufgaben zu beschäftigen. Unter dem Aspekt der Nutzbarkeit von Fahrzeit, z. B. für berufliche Tätigkeiten, kann dies ein erheblicher Vorteil und somit ein Argument für die Fahrzeugautomatisierung sein. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es trotz der stetigen Entwicklung der Sensorik in absehbarer Zeit immer Szenarien geben kann, bei denen die Automation an Grenzen stößt. Solange also Situationen vorkommen können, die durch das System nicht gelöst werden, muss die Automation in solchen Fällen die Fahraufgabe mit einer ausreichenden Zeitreserve an den Fahrer zurückdelegieren. Für den Fahrer bedeutet dies, dass er die Möglichkeit erhalten muss, die Fahrzeugführung rechtzeitig zu übernehmen,



um die bevorstehende Situation auflösen zu können. Die notwendige Übernahmezeit hängt u. a. davon ab, wie lange der Fahrer braucht, sein Umfeld vollständig über Blicke zu erfassen, ein angemessenes Situationsbewusstsein zu erlangen und die Regelung des Fahrzeugs vom System zu übernehmen. Dabei spielen verschiedene Faktoren, wie z. B. die Komplexität der Fahrsituation oder auch individuelle Eigenschaften eine Rolle. Es ist eine Übernahmezeit anzustreben, innerhalb der nicht nur objektiv erfolgreich übernommen werden kann. Die Übernahme sollte darüber hinaus vom Fahrer auch als komfortabel wahrgenommen werden. Daher stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt vor dem Erreichen einer Systemgrenze der Fahrer spätestens durch eine Übernahmeaufforderung (Take Over Request - TOR) zum Eingreifen aufgefordert werden muss, damit der Übernahmeprozess nicht nur objektiv erfolgreich, sondern auch in einer für den Fahrer komfortablen Art und Weise geschehen kann. Untersuchungen dieser Art sind in der aktuellen Literatur nicht zu finden.

Um diese Übernahmezeiten bei hochautomatisiertem Fahren experimentell zu überprüfen, ist es sinnvoll, den Fahrer maximal aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis zu nehmen, damit auch Worst-Case-Szenarien mit in die Betrachtung einbezogen werden. Dies bedeutet, dass der Fahrer durch geeignete Mittel vollständig von seinen primären Fahraufgaben abgelenkt ist. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die Probanden zur Übernahme lediglich die zur Verfügung gestellte Zeit benutzen und die Situation nicht früher erfassen können. Dieser Ansatz wurde in der in Kapitel 6.2 beschriebenen Simulator-Studie verfolgt, um eine erste Aussage über die Mindestzeit für eine sichere und komfortable Übernahme zu erhalten. Betrachtet wurden drei verschiedene Prüfzenarien, deren Bewältigung seitens des Fahrers über die Querführung stattfinden musste. Die Übernahmesituationen wurden auf Basis der Ebenen der Fahrzeugführung (Stabilisierung, Führung, Navigation) nach Donges (1982) bzw. der menschlichen Verhaltensebenen (fertigkeitbasiert, regelbasiert, wissensbasiert: SRK-Modell) nach Rasmussen (1983) kategorisiert.

5 Messtechnik

In diesem Kapitel wird eine kurze Übersicht über den grundsätzlichen Aufbau der Simulatorumgebung und die in den Versuchen verwendete Messtechnik gegeben. Die detaillierten Anpassungen an die Anforderungen der einzelnen Versuchsreihen werden in den jeweiligen Versuchsbeschreibungen näher ausgeführt.

5.1 Fahrsimulator – grundsätzlicher Versuchsaufbau

Die Vorteile eines Fahrsimulators gegenüber realen Testfahrten liegen vor allem in der Möglichkeit, präzise Einstellungen vorzunehmen und in der hohen Reproduzierbarkeit der zu bewertenden Szenarien. Ein wichtiger Vorteil ist zudem die Einsatzmöglichkeit zur Untersuchung von – in der Realität – potenziell gefährlichen Situationen. Da auch in den nachfolgend beschriebenen Versuchsreihen solche Situationen enthalten sind, wird als Versuchsumgebung der statische Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie der TU München gewählt.

Als Basis des statischen Simulators dient ein mit der Simulatorumgebung vernetztes BMW 6er Cabrio (BMW E64). Das Fahrzeug ist mit einem simulierten Vier-Gang-Automatikgetriebe ausgestattet. Die Vorderansicht wird über drei in Trapezform angeordnete Leinwände mit annähernd 180° Sichtbereich realisiert (Abbildung 5-1). Für die Rückansicht (Innen- und Außenspiegel) findet eine Projektion auf drei Leinwände hinter dem Fahrzeug statt. Der gesamte Versuchsaufbau befindet sich in einer vollständig abgedunkelten Versuchshalle.

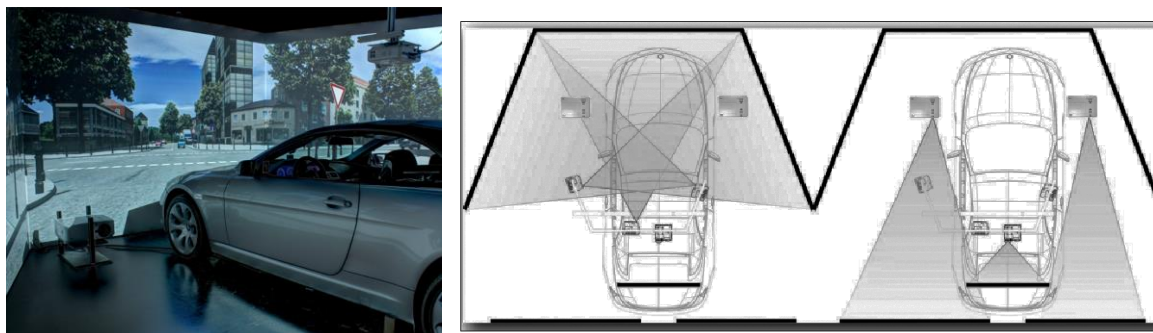


Abbildung 5-1: Fahrsimulator am Lehrstuhl für Ergonomie und Schemazeichnung der Sichtprojektion.

Die Softwarebasis des Simulators bildet die Simulationsumgebung SILAB des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW), mit deren Hilfe alle relevanten fahrdynamischen Parameter ausgelesen und aufgezeichnet werden können.

5.2 Blickerfassung

Während der Experimente wird das Blickverhalten der Probanden mithilfe des kopfbasierten Blickerfassungssystems Dikablis erfasst und unter Anwendung der Auswertesoftware D-Lab aufbereitet. Mit Hilfe von Dikablis können Blickbewegungen mit minimalen Einschränkungen bzgl. der Sicht und der Bewegungsfreiheit der Probanden erfasst werden. Das zentrale Element des Systems ist die in Abbildung 5-2 dargestellte Spezialbrille, auf der zwei Kameras montiert sind.

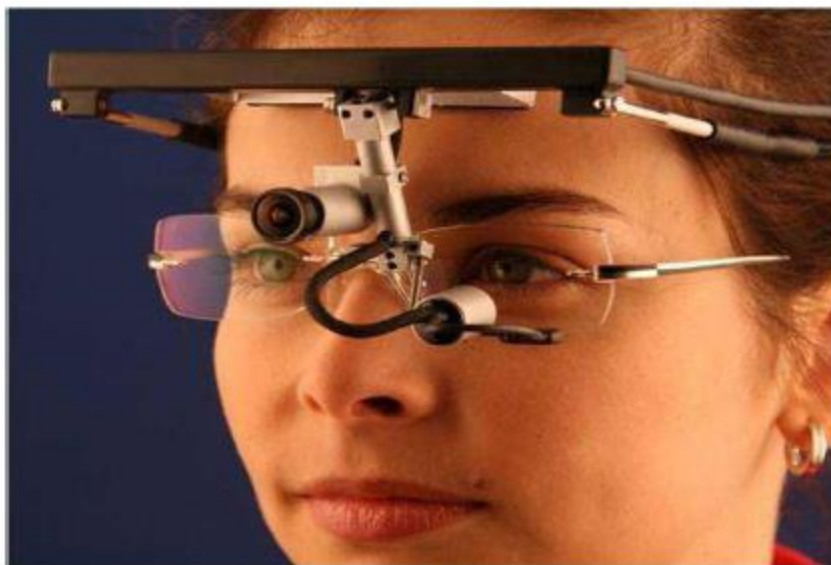


Abbildung 5-2: Kopfeinheit des Blickerfassungssystems Dikablis (Ergoneers).

Die nach vorne gerichtete Szenenkamera erfasst die Umgebung (Field of View). Die zweite Kamera erfasst das von einer Infrarotleuchtdiode ausgeleuchtete Auge, um die Pupille und somit die Blickbewegungen zu erkennen. Beide Kameras arbeiten mit einer Frequenz von 25 Hz. Durch eine Überlagerung der beiden aufgenommenen Videos (Szenenbild und Augenbild) und einer geeigneten Kalibrierung aufeinander kann über den Mittelpunkt der Pupille der aktuelle Blickort der Probanden identifiziert werden.

Die Markierung der Blickbewegungen im Szenenbild erfolgt durch ein Fadenkreuz (Abbildung 5-3 links). Im Post-Processing der Versuchsdurchführung wurden die automatisch per Bildverarbeitung erkannten Blickbewegungsdaten manuell kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. Auf diese Weise ergeben sich im Rahmen der Aufzeichnungsfrequenz hochgenaue Messwerte für Blickzuwendungen und Reaktionszeiten.



Abbildung 5-3: Aufnahmesoftware für Blickfassungssystem.

5.3 Videoauswertung

Parallel zur Messung der einzelnen Parameter über Silab und Dikablis wurden während der Versuche Videos der Probanden aufgezeichnet. Diese Videos waren zum einen als Rückfallebene bei einem Ausfall einzelner Messsysteme gedacht, zum anderen wurden sie zur Kontrolle herangezogen, falls die Fahrdaten auf den ersten Blick ungewöhnliche Ergebnisse zeigten. Weiterhin wurden basierend auf den Videoaufzeichnungen stichprobenartige Kontrollen der Datenaufzeichnung durchgeführt.



6 Versuchsreihen

In diesem Kapitel werden zwei Versuchsreihen vorgestellt, deren Ziel es war, den in Kapitel 4 formulierten Forschungsbedarf zu klären.

6.1 Nebenaufgabenbearbeitung in Abhängigkeit vom Automationsgrad

In der ersten Versuchsreihe wurde der Frage nachgegangen, wie sich unterschiedliche Automationsgrade auf den Umgang mit einer Nebenaufgabe auswirken und welche Effekte hinsichtlich Bearbeitungsleistung, Beanspruchung und Eingriffsverhalten des Fahrers zu erwarten sind. Die verwendete Methodik (Kap. 6.1.1) basiert auf den in Kapitel 4.2 formulierten Fragestellungen und Annahmen. Die statistisch überprüfbaren Hypothesen (Kap. 6.1.2), die sich aus diesen Annahmen ergeben, sind aus Zwecken der Übersichtlichkeit der Ergebnisdarstellung (Kap. 6.1.3) direkt vorangestellt und damit erst im Anschluss an die Darstellung der Methodik zu finden. Abschließend werden die aufgestellten Hypothesen den empirischen Daten gegenübergestellt und die Ergebnisse diskutiert (Kap. 6.1.4).

6.1.1 Methodik

6.1.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuch wurde im statischen Fahrsimulator durchgeführt. Zusätzlich zur Standardausstattung wurden die im Folgenden beschriebenen Automationssysteme und Szenarien implementiert sowie eine Nebenaufgabe eingeführt.

Automation

Die durchgeführte Grundlagenstudie zielte nicht darauf ab, bestehende Einzelsysteme bzw. Systemkomponenten zu testen, sondern das Fahrerverhalten zu beobachten. Daher wurde als Automation kein vorhandenes oder in der Entwicklung befindliches Assistenzsystem verwendet. Stattdessen wurde auf eine, am LfE vorhandene generische Automation zurückgegriffen, die im Rahmen des DFG-Projektes H-Mode entwickelt wurde. Auf deren Basis wurden die im Versuch eingesetzten Systemausprägungen umgesetzt. Insgesamt umfasste das eingesetzte Automationspektrum die im Folgenden beschriebenen vier Stufen.

Manuell: Die manuelle Fahrt diente als Vergleichsgrundlage der Verhaltensänderung in den weiteren Automationsstufen. Aufgrund der Vorgaben der Simulator-konfiguration wird das Getriebe automatisch geschaltet. Alle weiteren primären und sekundären Bedienhandlungen sind vom Fahrer selbst auszuführen.

Assistiert: Bei der als „assistiert“ bezeichneten Automationsstufe lag der überwiegende Teil der Fahrzeugkontrolle weiterhin beim Fahrer. Die Eingriffe des Systems



waren hinweisender bzw. warnender Natur. In der Längsführung erhielt der Fahrer über ein aktives Gaspedal (Lange et al. 2008a und 2008b) haptisches Feedback über die angemessene Geschwindigkeit. Durch einen deutlich spürbaren Druckpunkt wurde dem Fahrer die zur Einhaltung der vorgeschlagenen Geschwindigkeit notwendige Gaspedalstellung vermittelt. Der Geschwindigkeitswunsch der Automation wurde auf Grundlage der erlaubten Höchstgeschwindigkeit und der Zeitlücke zum Vorderfahrzeug bestimmt. Bei einer Verringerung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit (z. B. von 100 km/h auf 80 km/h) wurde der Druckpunkt am Gaspedal frühzeitig verändert. Hielt sich der Fahrer an die Vorgaben der Assistenz, war das Ausrollen des Fahrzeugs ausreichend, um die neue Höchstgeschwindigkeit zu erreichen, kurz bevor das limitierende Verkehrszeichen passiert wurde. Im Versuch lag der Eingriffszeitpunkt der Assistenz in der Regel bei 100 m vor dem Verkehrszeichen. Im Fall einer Erhöhung der Geschwindigkeitsbegrenzung wurde das Gaspedal erst bei Erreichen des Schildes freigegeben. In Querrichtung wurde ein Spurhalteassistent simuliert, der bei Annäherung der Fahrzeugkante an die Fahrstreifenmarkierungen durch ein korrigierendes Lenkmoment in Richtung Fahrstreifenmitte eingriff. Der Betrag des, von der Automation aufgebrachten Lenkmomentes, war dabei U-förmig (vgl. Penka 2001). Die Lenkunterstützung der Automation reichte in dieser Automationsstufe nicht aus, um das Fahrzeug innerhalb des Fahrstreifens zu halten. Es diente vielmehr als Hinweis und Unterstützung für den Fahrer.

Teilautomatisiert mit Händen am Lenkrad (teilautom_mH): Die Funktionalität dieser Automationsstufe bestand in Längsrichtung aus einer Regelung der Geschwindigkeit analog eines ACC-Systems mit zusätzlicher Erkennung und Berücksichtigung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit. Wurde in diesem Modus eine sich verringern- de Höchstgeschwindigkeit detektiert, begann die Automation in einem Abstand von 100 m vor dem limitierenden Schild mit der Verzögerung. Im Falle einer Erhöhung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit wurde die Beschleunigung beim Passieren des Verkehrszeichens eingeleitet. Ähnlich zum assistierten Modus wurde in Querrichtung ein Spurhalteassistent simuliert, der das Fahrzeug innerhalb des eigenen Fahrstreifens hielt. Die Führung erfolgte in diesem Automationsgrad mittenzentriert mit einem Lenkmoment mit V-förmig ansteigenden Betrag. Das System griff hier korrigierend ein, sobald eine Abweichung des Fahrzeugschwerpunktes von der Fahrstreifenmitte auftrat. Das aufgebrachte Lenkmoment war höher als im Modus „assistiert“ und ausreichend, um das Fahrzeug automatisiert innerhalb des aktuellen Fahrstreifens zu halten. Die Probanden wurden in diesem Modus angewiesen, die Hände trotz der Selbstständigkeit der Automation am Lenkrad zu behalten.

Teilautomatisiert ohne Hände am Lenkrad (teilautom_oH): Die Funktionalitäten dieser Stufe entsprachen exakt dem Automationsgrad „teilautom_mH“. Allerdings wurden die Probanden instruiert, während der automatisierten Fahrt die Hände vom Lenkrad zu nehmen. Auf diese Weise wurde der Einfluss der haptischen Rückmel-



dung über das Lenkrad – ohne aktive Einbindung des Fahrers in die Fahraufgabe – auf das Fahrerverhalten untersucht. Abbildung 6-1 zeigt eine Übersicht über die simulierten Automationsstufen.



Abbildung 6-1: Implementierte Systemausprägungen mit ansteigendem Automationsgrad.

Die Verfügbarkeit der Automationsunterstützung wurde den Probanden unabhängig von der Systemausprägung über die Darstellung eines grauen Symbols im Kombi-Instrument angezeigt (Abbildung 6-2). Nur bei Anzeige dieses Symbols war eine Aktivierung der Automation möglich. Diese erfolgte durch die Probanden selbst über die Betätigung der „Check“-Taste am Blinkerhebel. Bei aktiv arbeitender Automation wurde das Automationssymbol farbig dargestellt. Während jedes Versuchsdurchganges war nur jeweils eine der beschriebenen Automationsstufen verfügbar.



Abbildung 6-2: Links: Anzeige für eine verfügbare (grau) bzw. aktive (farbig) Automationsunterstützung. Rechts: Die Aktivierung der Automation erfolgte durch die Probanden selbst über Betätigung der „Check“-Taste am Blinkerhebel.

Durch ein erneutes Drücken der „Check“-Taste konnte das System abgeschaltet werden. Auch eine Betätigung der Bremse oder das Überstimmen eines von der Automation aufgebrachten maximalen Lenkmomentes führte zu einer vollständigen Übertragung der Fahraufgabe an den Fahrer. Damit sollte sichergestellt werden, dass weder Bremsmanöver noch vom Fahrer eingeleitete Fahrstreifenwechsel durch die Automation behindert werden.



Szenarien

Neben der allgemeinen Verhaltensänderung lag die Wahrnehmungsleistung der Probanden hinsichtlich kritischer Situationen bzw. Systemfehler und -ausfälle im Fokus der Untersuchung. Zu diesem Zweck wurden drei Situationen unterschiedlicher Charakteristik in den Streckenverlauf integriert, bei denen die Automation nicht gemäß der Funktionsdefinition reagierte und somit ein Fahrereingriff nötig wurde. Hinsichtlich dieser Situationen bestand die Aufgabe der Probanden darin, die ausbleibende Systemreaktion wahrzunehmen und die Fahraufgabe durch Abschalten bzw. Überstimmen des Systems zu übernehmen.

- **Verkehrszeichen (VZ):** Alle Automationsgrade verfügten über eine simulierte Verkehrszeichenerkennung. Die Gesamtanzahl der vorhandenen Geschwindigkeitsbegrenzungen in den einzelnen Messfahrten lag zwischen 18 und 22, variierend aufgrund der zufälligen Zusammensetzung der Strecken. Pro Versuchsdurchgang wurde jeweils eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h auf 80 km/h nicht detektiert. Diese Situation entspricht dem Auftreten eines Detektionsfehlers des Systems mit einer Auftrittswahrscheinlichkeit von ca. 5 % (vgl. auch Niederée und Vollrath 2009).
- **Fahrzeugunfall (FZG):** Das Vorderfahrzeug führte in dieser Situation ein plötzliches Bremsmanöver aus, ohne dass die Automation darauf reagierte. Aufgrund entgegenkommenden Verkehrs war ein Ausweichen nicht möglich. Die Situation musste durch Bremsen entschärft werden. In allen Automationsgraden sowie der manuellen Fahrt blieben den Probanden - vom Einsetzen der Bremslichter bis zum Aufprall - sechs Sekunden Zeit für eine Reaktion. Mit dieser Situation wurde ein partieller Systemausfall der ACC-Funktionalität simuliert. Durch das bremsende Vorderfahrzeug ergab sich eine erhöhte Kritikalität und damit eine höhere Notwendigkeit eines Fahrereingriffes.
- **Wildunfall (WS):** In dieser Situation lief ein Wildschwein quer zur Straße auf die Fahrbahn. Die Automation detektierte das von rechts kommende Hindernis nicht. Es war kein entgegenkommender Verkehr vorhanden. Ebenso wie bei „Fahrzeugunfall“ hatten die Probanden auch hier sechs Sekunden Zeit vom ersten Auftauchen des Wildschweins bis zum Aufprall. Da die Probanden zu Beginn der Versuchsfahrt darauf hingewiesen wurden, dass derartige Situationen (querende Hindernisse) nicht im Bereich der Systemfunktionalitäten liegen, entspricht diese Situation einer vom System nicht erkannten Systemgrenze.

Jede der oben beschriebenen Situationen kam pro Automationsgrad jeweils einmal vor. Eine Ausnahme bildet hier die Situation „Verkehrszeichen“. In der manuellen



Fahrt hat diese Situation keine Auswirkungen, da sie sich nicht von den übrigen Geschwindigkeitsbegrenzungen unterschied.

Nebenaufgabe

Als Nebenaufgabe wurde eine visuell ablenkende Erkennungs-Aufgabe ausgewählt. Die Aufgabenpräsentation erfolgte im zentralen Navigationsdisplay (Abbildung 6-3, Central Information Display = CID).

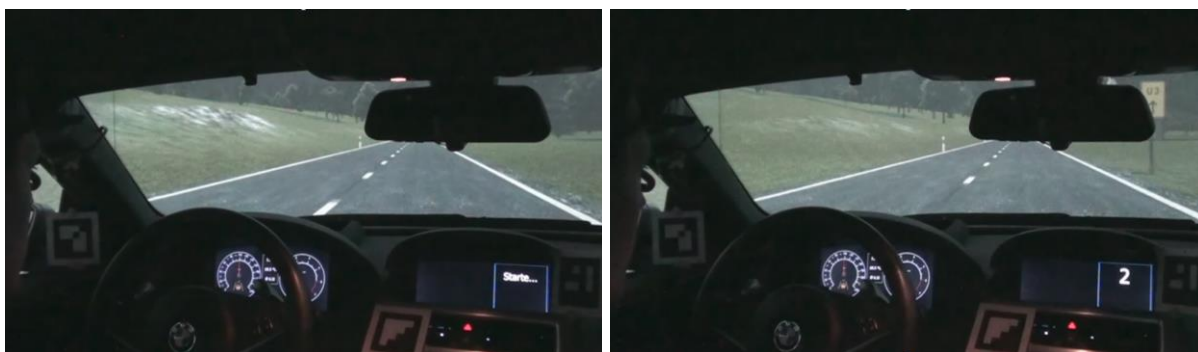


Abbildung 6-3: Visuell ablenkende Nebenaufgabe im CID. Links: Aufgabenstart begleitet von akustischem Hinweis. Rechts: Einblendung von Zufallszahlen zwischen 1 und 3 mit einer Dauer von jeweils 500 ms.

Die Zahlen 1, 2 und 3 wurden wiederholt und in zufälliger Reihenfolge eingeblendet. Aufgabe der Probanden war es, jede wahrgenommene 2 verbal mit „ja“ zu bestätigen. Die jeweilige Darbietungsdauer bis zur darauffolgenden Zahl betrug 500 ms. Diese Zeit wurde gewählt, um den Probanden auch während der Aufgabenbearbeitung kurze Kontrollblicke auf die Szenerie zu ermöglichen (vgl. Rauch et al. 2009). Die Aufgabe war extern getaktet und konnte von den Probanden nicht unterbrochen werden. Sie war nicht während der gesamten Fahrt verfügbar, sondern wurde in regelmäßigen Abständen angeboten (vgl. Kapitel 6.1.1.3). Die Ankündigung der Verfügbarkeit der Nebenaufgabe (Aufgabenangebot) erfolgte über einen akustischen Hinweis in Form von vier aufeinander folgenden Signaltönen sowie der visuellen Anzeige „Starte ...“ im CID (Abbildung 6-3). Mit dem vierten Ton startete die Aufgabe.

6.1.1.2 Probandenkollektiv

Die Stichprobe der Versuchsreihe bestand aus 24 Probanden (20 männlich, 4 weiblich). Diese waren zwischen 23 und 57 Jahre alt. Das Durchschnittsalter betrug 30.5 Jahre bei einer Standardabweichung von 9.1 Jahren (männlich: $M = 29.5$, $SD = 8.9$; weiblich: $M = 35.8$, $SD = 9.2$). Entsprechend der Altersverteilung ergab sich eine durchschnittliche Dauer des Führerscheinbesitzes von 11.6 Jahren ($SD = 9.1$ Jahre).

Das Versuchspersonenkollektiv setzte sich hauptsächlich aus Studierenden und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Ergonomie der TU München zusammen. Dadurch ergab



sich, wie in Abbildung 6-4 (links) zu sehen, eine große Anzahl Versuchspersonen in der Altersschicht von 20 bis 35 Jahren. Weiterhin verfügte ein hoher Anteil an Probanden bereits über Versuchserfahrung sowohl im Simulator wie auch im Realfahrzeug.

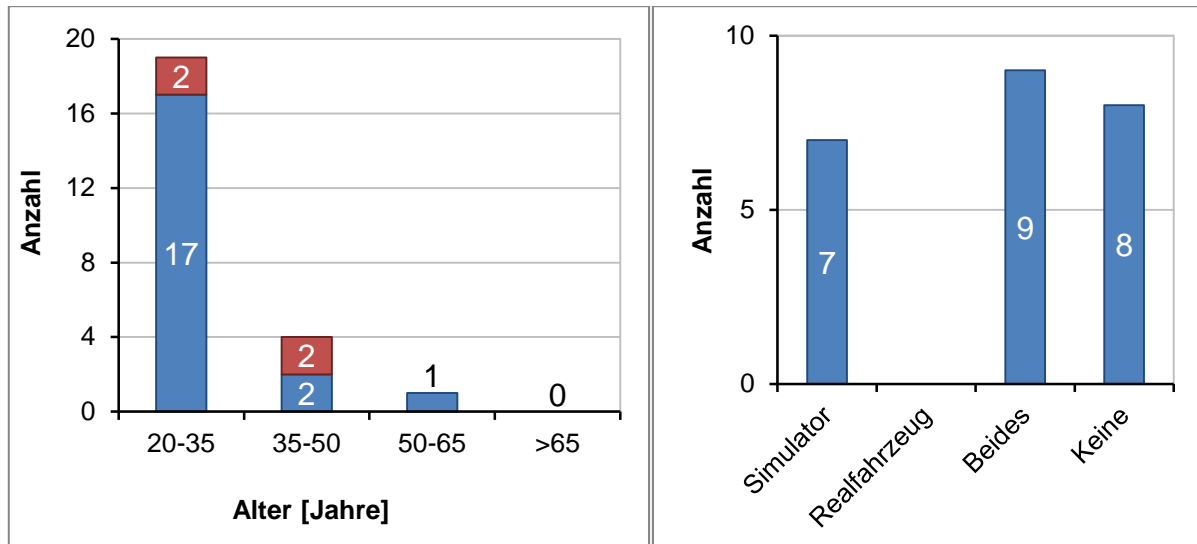


Abbildung 6-4: Altersverteilung (blau: Männer, rot: Frauen) und Versuchserfahrung des Probandenkollektivs.

Alle Probanden verfügten über normale bzw. durch optische Hilfsmittel korrigierte Sehschärfe und keinerlei Einschränkungen der motorischen Fähigkeiten.

6.1.1.3 Versuchsablauf

Für jeden Probanden setzte sich der Versuch aus vier Messfahrten auf kreuzungsfreien Bundesstraßen zusammen. Jede Messfahrt wurde dabei mit einem der unterschiedlichen Automationsgrade durchgeführt. Eine schematische Darstellung des Versuchsablaufes für eine fiktive, beispielhafte Versuchsperson zeigt Abbildung 6-5.

Nach einer Einweisung in die Fahrsimulation, die grundlegende Fahrzeugbedienung sowie den Umgang mit der Nebenaufgabe absolvierten die Probanden die vier Versuchsdurchgänge in zufälliger Reihenfolge. Dies diente dem Ausschluss von Reihenfolge-Effekten durch Lernen oder Strategiebildung während der anschließenden Messfahrten von jeweils ca. 15 Minuten Dauer. Jeder Messfahrt war eine Eingewöhnungs- und Lernfahrt von ca. 10 Minuten vorangestellt. Ziel der Eingewöhnung war, die Probanden an das jeweils aktuelle Automationssystem zu gewöhnen. Darüber hinaus musste die Mode Awareness der Probanden sichergestellt werden, d. h. die Probanden mussten das Verhalten der aktuellen Automation verstanden und ihr inneres Modell dem aktuellen Assistenzgrad angepasst haben. Im Laufe jeder Eingewöhnungsfahrt wurden die Probanden dazu angewiesen, sich während der Messfahrt an die Geschwindigkeitsbegrenzungen zu halten. In den Versuchsdurchgängen



mit assistierter bzw. automatisierter Fahrt wurden die Probanden instruiert, das System zu überwachen und im Falle von Systemfehlern oder kritischen Situationen sofort einzugreifen, um das System zu überstimmen bzw. abzuschalten.

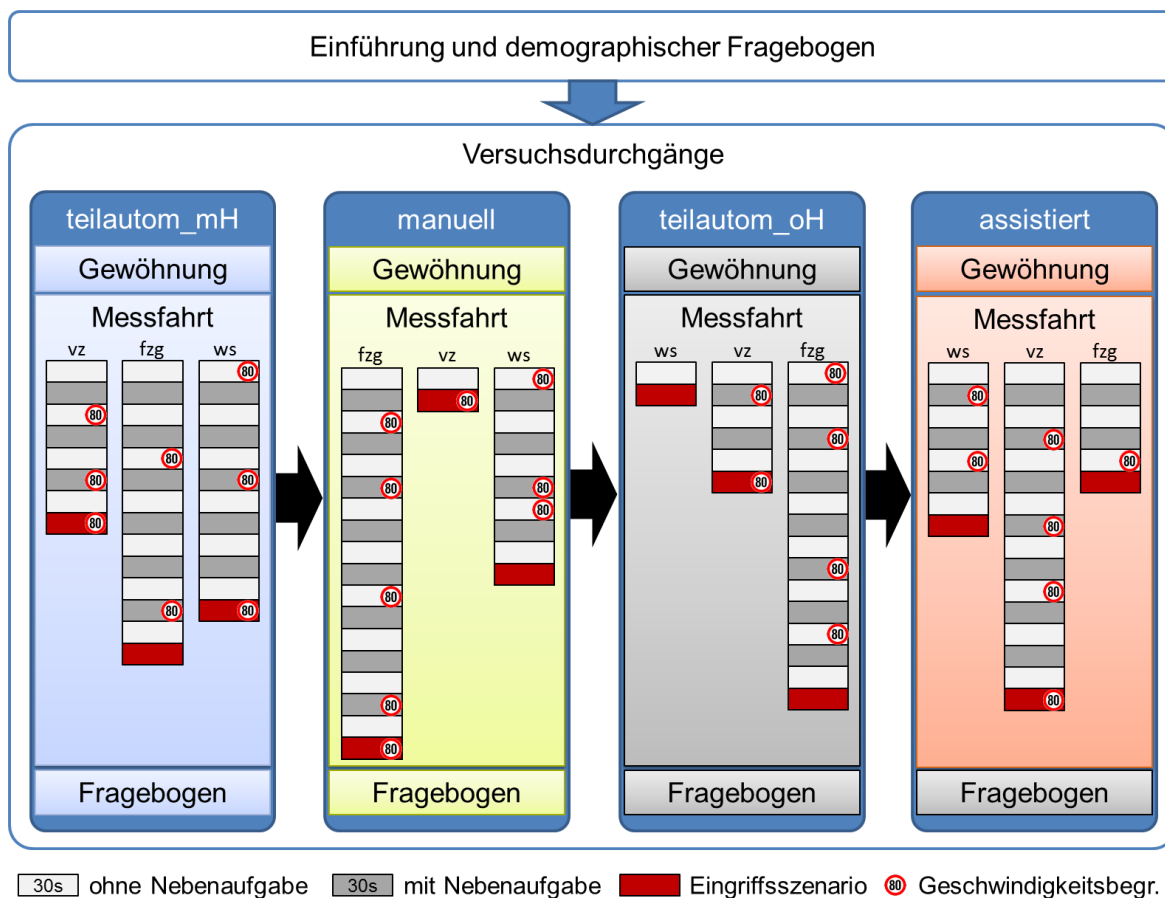


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung eines beispielhaften Versuchsaufbaues. Zufällige Verteilung der Reihenfolge der Automationsgrade und Eingriffsszenarien (vz, fz, ws). Auch die Zeiten zwischen den Eingriffsszenarien sowie das Vorhandensein von Geschwindigkeitsbegrenzungen waren zufällig verteilt.

Die Möglichkeit eines Auftretens von Systemfehlern bzw. des Ausbleibens von Systemreaktionen wurde dabei ausdrücklich angesprochen. Die Probanden wurden während der Eingewöhnung weiterhin dazu aufgefordert die Automation nach jeder Abschaltung – absichtlich oder unabsichtlich – zum nächstmöglichen Zeitpunkt wieder zu aktivieren.

Während jeder der vier Messfahrten erhielten die Probanden in regelmäßigen Abständen Angebote, die Nebenaufgabe zu bearbeiten. Dabei wechselten sich jeweils 30 Sekunden freie Fahrt (im Bild hellgrau dargestellt) ab mit 30 Sekunden Bearbeitungszeit (dunkelgrau) und vice versa. Der Grund, warum die Nebenaufgabe nicht dauerhaft, sondern abschnittsweise angeboten wurde, war zum einen die hohe Belastung der Probanden durch die Dualtasksituation, zum anderen wurde ihnen damit



die Gelegenheit gegeben, auch während der Messfahrten die Automationsfunktionen zu erleben.

Da eine Bundesstraßenumgebung als Versuchsstrecke für die Messfahrten diente, lag die maximale Höchstgeschwindigkeit generell bei 100 km/h. In zufälligen Abschnitten der Strecke wurde die erlaubte Geschwindigkeit über die Beschilderung auf 80 km/h reduziert. In Abbildung 6-5 sind diese Streckenabschnitte mit dem entsprechenden Vorschriftszeichen gekennzeichnet. Sowohl die Begrenzung wie auch die darauffolgende Freigabe der Höchstgeschwindigkeit lagen im gleichen 30-Sekunden-Abschnitt. Die Geschwindigkeitswechsel kamen sowohl in Abschnitten mit wie auch in Abschnitten ohne Nebenaufgabenbearbeitung vor. Mit Ausnahme des Eingriffszenarios „VZ“ reagierte die Automation korrekt auf die Vorgaben der Beschilderung.

Jedes der drei Eingriffsszenarios trat pro Messfahrt bzw. Automationsgrad jeweils einmal auf. Um den Eintrittszeitpunkt für die Probanden unvorhersehbar zu gestalten, wurde die Zeit zwischen den einzelnen Eingriffsszenarios in jeder Messfahrt im Bereich von einer und neun Minuten zufällig variiert. Im Fallbeispiel der in Abbildung 6-5 dargestellten fiktiven Versuchsperson tritt bei Messfahrt 1 (teilautom_mH) in der vierten Minute der Fahrt der Detektionsfehler des Verkehrsschildes (VZ) auf. Etwa sieben Minuten nach dieser Situation ereignet sich der Systemausfall mit dem bremsenden Fahrzeug (FZG) und weitere sechs Minuten später „läuft das Wildschwein auf die Straße“ (WS). Der Eintrittszeitpunkt der Eingriffsszenarios wurde jeweils variabel in den Zeitraum einer Aufgabendarbietung gelegt. Notwendige Übernahmen fielen demnach immer mit einer Ablenkung des Fahrers zusammen. Den Abschluss der einzelnen Versuchsdurchgänge bildete eine Befragung zur Beanspruchung mittels eines NASA-TLX¹¹-Fragebogens (Hart & Staveland 1988).

6.1.1.4 Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen

Untersuchungsschwerpunkt des Versuches war der Einfluss unterschiedlicher Automationsgrade auf das Fahrerverhalten insbesondere in Kombination mit einer Nebenaufgabe. Entsprechend dieser Fragestellung stellt der Automationsgrad einen Faktor des Versuchsdesigns dar. Ein weiterer Faktor ergibt sich aus dem Streckenaufbau bzw. dem Versuchsablauf. Da die Probanden angewiesen wurden, die Automation zu überwachen, ist anzunehmen, dass sich Änderungen der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf die Kontrollblicke zur Systemüberwachung auswirken. Bei auftretenden Geschwindigkeitswechseln ist eine Zustandsänderung der Automation nötig, was zu einem erhöhten Kontrollaufwand führt. Daher ergibt sich ein weiterer zu berücksichtigender Faktor aus dem Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein von Geschwindigkeitswechseln. Dem Versuch liegt demnach ein zweifaktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung auf beiden Faktoren Automationsgrad (AG) und

¹¹ Task Load Index



Geschwindigkeitswechsel (GW) zugrunde. Alle 24 Probanden erleben dabei jeden Automationsgrad.

Da eine vollständige Permutation aller auftretenden Variablen nicht möglich war, wurden sowohl die Reihenfolge der Automationsgrade wie auch die Reihenfolge der Eingriffsszenarien für jede Versuchsperson zufällig gestaltet. Weiterhin erfolgte für jede Messfahrt eine Randomisierung der Zeiten zwischen den Eingriffsszenarien sowie der Verteilung der Geschwindigkeitswechsel (Abbildung 6-5). Auf diese Weise wurden, bezogen auf die gesamte Stichprobe, Reihenfolgen- und Lerneffekte abgeschwächt.

Die Evaluierung des Einflusses der Faktoren auf das Fahrerverhalten erfolgte anhand mehrerer, nachfolgend beschriebener, unabhängiger Variablen. Da für den vorliegenden Versuch die Verhaltensänderung bei der Kombination aus Automationsunterstützung und Nebenaufgabenbearbeitung im Vordergrund stand, lag der Fokus der Auswertung auf den 30-Sekunden-Abschnitten mit Nebenaufgabenbearbeitung. Zur Beurteilung von Änderungen im Blickverhalten wurden Blickparameter innerhalb definierter Bereiche (AOI = Area of Interest) betrachtet, wie in Abbildung 6-6 dargestellt wurden der Tacho, die Szenerie sowie der Ort der Nebenaufgabendarbietung (CID) als AOI festgelegt.

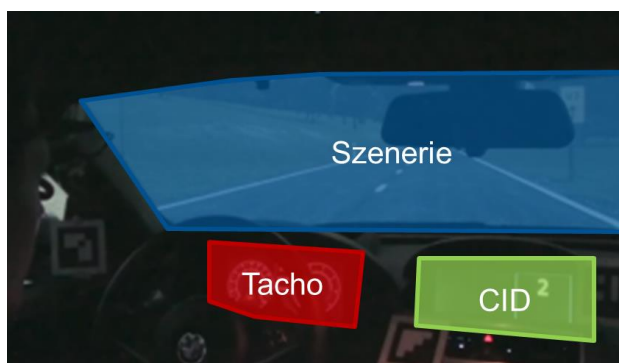


Abbildung 6-6: AOI für die Auswertung der Blickkennwerte.

Die Auswertung der Blickdaten erfolgte im Hinblick auf eine Änderung der Blickstrategie sowie einer Verschiebung der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung. Dazu wurden, bezogen auf die jeweiligen AOI, die Frequenzen mit denen Informationen abgerufen wurden und die mittleren Verweildauern (EN ISO 15007-1) der Blicke betrachtet (Blickstrategie). Die sich aus der Blickstrategie ergebende visuelle Aufmerksamkeitsverteilung wurde anhand der prozentualen Blickanteile auf die einzelnen AOI bestimmt.

Zur Bewertung der Nebenaufgabenbearbeitung wurde zusätzlich zu den Blickkennwerten die Erkennungsleistung in der visuellen Aufgabe betrachtet, d. h. es wurde ausgewertet, welcher Prozentsatz der auftretenden Zeichen von den Probanden detektiert und verbal bestätigt wurde. Um die Probanden zu motivieren, die Nebenauf-



gabe zu bearbeiten, ohne dabei die Fahraufgabe zu vernachlässigen, wurde das in Tabelle 6-1 dargestellte Punktesystem eingeführt. Aufgrund der fehlenden realen Gefahren im Simulator unterliegen Dualtask-Versuche der Gefahr einer unrealistisch starken Zuwendung zur Nebenaufgabe. Mithilfe des hier eingeführten Punktesystems wurde versucht, dieser Gefahr entgegenzusteuern, indem Fehler in der Fahraufgabe durch Punkteabzug bestraft wurden. Durch eine erfolgreiche Bearbeitung der Nebenaufgabe war es den Probanden möglich, im Durchschnitt pro Nebenaufgabendurchgang 30 Punkte zu gewinnen. Bei Fehlern in der Fahraufgabe wurden je nach Schwere des Fahrfehlers Punkte abgezogen. Die Probanden konnten dabei Punkte im Wert eines vollständig korrekten Nebenaufgabendurchgangs verlieren, wenn sich aus dem Fehlverhalten potenziell kritische Situationen ergaben. Im Fall tatsächlicher Kollisionen oder eines Abkommens von der Fahrbahn wurden Punkte im zweieinhalbfachen Wert eines Durchgangs abgezogen. Die negativen Auswirkungen der Fahrfehler waren demnach um ein Vielfaches höher als die positiven Auswirkungen der Nebenaufgabenbearbeitung. Diese Priorisierung erfüllte den Zweck, die Probanden zu einer kontinuierlichen Überwachung der Automation zu animieren und gleichzeitig eine Motivation zur Nebenaufgabenbearbeitung zu schaffen. Die drei Probanden mit der besten Gesamtleistung erhielten eine zusätzliche monetäre Vergütung.

Tabelle 6-1: Positiv und Negativ-Punkte für Neben- und Fahraufgabe.

Punkte	Kriterium
+3	Korrekt bestätigte Zwei
0	Übersehene Zwei
-3	Fälschlicherweise detektierte Zwei
-10	Zu langsames oder zu schnelles Fahren (± 10 km/h)
-30	Überschreiten der seitlichen Fahrstreifenmarkierungen
-75	Kollisionen, Unfälle und vollständiges Verlassen des Fahrstreifens

Inwieweit die Aufmerksamkeitsverschiebung das Verhalten der Probanden im Fall von Systemfehlern, -ausfällen und -grenzen beeinflusst, wurde anhand der Reaktionen während der Eingriffsszenarien untersucht. Dabei wurde betrachtet, bei wie vielen der Probanden in den jeweiligen Situationen eine Reaktion ausblieb bzw. wie viele der Probanden nicht ausreichend früh eingriffen, um die Situation nicht „kritisch“ werden zu lassen. Unter „kritisch“ ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass in den Kollisionsszenarien „FZG“ und „WS“ eine Kollision nicht mehr hätte verhindert werden können, wäre die Situation nicht durch die Simulationsprogrammierung aufgelöst worden. Um Unfälle während des Versuches zu vermeiden, beschleunigte das vorausfahrende Fahrzeug in der Situation FZG vor Eintritt der Kollision, während in der Situation WS das Wildschwein am Straßenrand stehen blieb. In der Situation



„VZ“ ist die Bedingung der Kritikalität dann erfüllt, wenn mit überhöhter Geschwindigkeit in die beschränkte Zone gefahren wird. Falls über den gesamten Situationsverlauf eine Reaktion ausblieb, wurde die Situation mit „nicht reagiert“ gewertet. Die Kriterien, ab wann die Fahrerreaktion als zu spät beurteilt wurde, sind in Tabelle 6-2 dargestellt. Neben der reinen Betrachtung, ob die Probanden überhaupt eine Reaktion zeigten (Reaktionshäufigkeit), wurde weiterhin untersucht, zu welchem Zeitpunkt diese erfolgte (Reaktionszeit).

Um den Einfluss des Automationsgrades auf die mentale Beanspruchung der Versuchspersonen untersuchen zu können, wurde für jede Messfahrt der Workload mittels eines ungewichteten NASA-TLX Fragebogens aufgenommen. Zusätzlich dazu wurden in den Streckenabschnitten ohne Nebenaufgabenbearbeitung die Blickparameter Blinzelfrequenz und Scanningverhalten untersucht. Beide können als Kennwerte für mentale Belastung dienen (Cain 2007, Mayhew & Simpson 1996). Die Frage, wie sich die unterschiedlichen Automationsgrade auf die mentale Beanspruchung inklusive der entsprechenden Blickkennwerte auswirken, war zwar nicht grundlegender Bestandteil für den durchgeführten Versuch, liefert unter Umständen jedoch wertvolle Hinweise auf den Zustand der Probanden.

Tabelle 6-2: Kriterien für einen erfolgreichen Fahrereingriff bzw. für eine zu spät erfolgte Reaktion in den einzelnen Szenarien.

	Aufgabe	Pass-Kriterium	Zu später Eingriff
VZ	Anpassen der Geschwindigkeit.	<ul style="list-style-type: none"> Anpassung der Geschwindigkeit. Bremseingriff vor Passieren des Verkehrszeichens. 	<ul style="list-style-type: none"> Anpassung der Geschwindigkeit. Bremseingriff nach Passieren des Verkehrszeichens.
FZG	Verhindern einer Kollision mit vorausfahrenden Fzg.	<ul style="list-style-type: none"> Bremseingriff vor potenzieller Kollision mit dem Fahrzeug. Kollision verhindert. 	<ul style="list-style-type: none"> Bremseingriff vor / nach potenzieller Kollision mit dem Fahrzeug. Kollision nicht mehr verhinderbar.
WS	Verhindern einer potenziellen Kollision mit dem Wild.	<ul style="list-style-type: none"> Lenk- bzw. Bremsreaktion vor Erreichen des Wildschweins Kollision durch Lenken und / oder Bremsen verhindert. 	<ul style="list-style-type: none"> Lenk- bzw. Bremsreaktion vor / nach Erreichen des Wildschweins Kollision durch Lenken und / oder Bremsen nicht verhindert.

Bei der Auswertung der Messdaten für die mentale Beanspruchung wurde ausschließlich der Faktor „Automationsgrad“ betrachtet. Der Faktor „Geschwindigkeitswechsel“ wurde nicht berücksichtigt.

6.1.2 Hypothesen

Nachfolgend sind die statistisch überprüfbaren Hypothesen des Versuchs aufgeführt. Der Einfluss der Faktoren „Automationsgrad“ (AG) und „Geschwindigkeitswechsel“ (GW) auf das menschliche Verhalten wird dabei hinsichtlich des Blickverhaltens



(Tabelle 6-3) und der Leistung in der Nebenaufgabe (Tabelle 6-4) strukturiert. Für den Faktor „Automationsgrad“ wird diese Systematisierung um die Reaktion auf Systemfehler bzw. kritische Situationen ergänzt (Tabelle 6-5). Die Tabellen beinhalten zudem die zur Hypothesenüberprüfung heranzuziehenden unabhängigen Variablen bzw. Kennwerte. Für diese Betrachtung wurden nur die Abschnitte der Versuchsstrecke herangezogen, innerhalb derer eine Nebenaufgabenbearbeitung angeboten wurde.

Tabelle 6-3: Hypothesen hinsichtlich des Blickverhaltens.

Hypothesen – Blickverhalten		Kennwerte	
Automationsgrad	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst die Frequenz, mit der Informationen aus den unterschiedlichen Areas of Interest (AOI) abgerufen werden, nicht.	Blickfrequenz auf Szenerie, Tacho und Nebenaufgabe (CID)
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst die Frequenz, mit der Informationen aus den AOI abgerufen werden.	
	H ₀	Die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI ändert sich mit zunehmendem Automationsgrad nicht.	mittlere Verweildauern auf Szenerie, Tacho und Nebenaufgabe (CID)
	H ₁	Mit zunehmendem Automationsgrad ändert sich die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI.	
	H ₀	Die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit ändert sich mit zunehmendem Automationsgrad nicht.	kumulierte Verweildauer auf Szenerie, Tacho und Nebenaufgabe (CID)
	H ₁	Mit zunehmendem Automationsgrad steigt die visuelle Aufmerksamkeit auf die Nebenaufgabe.	
Geschwindigkeitswechsel	H ₀	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Frequenz, mit der Informationen aus den unterschiedlichen Areas of Interest (AOI) abgerufen werden, nicht.	Blickfrequenz auf Szenerie, Tacho und Nebenaufgabe (CID)
	H ₁	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Frequenz, mit der Informationen aus den AOI abgerufen werden.	
	H ₀	Die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI ändert sich nicht durch vorhandene Geschwindigkeitswechsel.	mittlere Verweildauern auf Szenerie, Tacho und Nebenaufgabe (CID)
	H ₁	Die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI ändert sich durch vorhandene Geschwindigkeitswechsel.	
	H ₀	Die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit ändert sich mit vorhandenen Geschwindigkeitswechseln nicht.	prozentuale Verweildauer auf Szenerie, Tacho und Nebenaufgabe (CID)
	H ₁	Die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit ändert sich mit vorhandenen Geschwindigkeitswechseln.	



Tabelle 6-4: Hypothesen hinsichtlich der Erkennungsleistung in der Nebenaufgabe.

Hypothesen - Nebenaufgabenbearbeitung			Kennwerte
Automationsgrad	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst die Leistung in der Nebenaufgabe nicht.	Erkennungsrate in der Nebenaufgabe
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst die Leistung in der Nebenaufgabe.	
Geschwindigkeitswechsel	H ₀	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Leistung in der Nebenaufgabe nicht.	Erkennungsrate in der Nebenaufgabe
	H ₁	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Leistung in der Nebenaufgabe.	

Tabelle 6-5: Hypothesen hinsichtlich der Fahrerreaktionen in den Eingriffsszenarien.

Hypothesen - Fahrerreaktionen			Kennwerte
Automationsgrad	H ₀	Die Anzahl der Probanden, die bei Systemfehlern bzw. kritischen Situationen nicht oder zu spät reagieren, wird vom Automationsgrad nicht beeinflusst.	Anzahl Probanden ohne oder mit verspäteter Reaktion
	H ₁	Die Anzahl der Probanden, die bei Systemfehlern bzw. kritischen Situationen nicht oder zu spät reagieren, wird vom Automationsgrad beeinflusst.	
	H ₀	Die Reaktionszeit auf Systemausfälle bzw. kritische Situationen bleibt vom Automationsgrad unbeeinflusst.	Reaktionszeit der Probanden, die in allen Automationsgraden reagiert haben
	H ₁	Die Reaktionszeit auf Systemausfälle bzw. kritische Situationen wird vom Automationsgrad beeinflusst.	

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, wurde auch die Auswirkung zunehmender Automation auf die Probanden hinsichtlich mentaler Belastung untersucht. Die diesbezüglich formulierten Hypothesen und die betrachteten Kennwerte sind in Tabelle 6-6 aufgeführt. Da die NASA-TLX-Befragung erst am Ende der Versuchsfahrt durchgeführt wurde, kann der Einfluss des Faktors „Geschwindigkeitswechsel“ für diese Auswertung nicht betrachtet werden. Eine Unterscheidung hinsichtlich des Vorhandenseins von Geschwindigkeitswechseln ist für diese Befragung deshalb nicht sinnvoll, da bezweifelt wird, ob die Probanden in der Lage sind, die



Fahrt ausreichend zu differenzieren. Weiterhin wurden für eine objektive Betrachtung der mentalen Belastung anhand der Blinzelfrequenz nur die Streckenabschnitte ohne Nebenaufgabenbearbeitung herangezogen.

Tabelle 6-6: Hypothesen bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Automationsgrade auf die mentale Belastung.

Hypothesen – Workload			Kennwerte
Automationsgrad	H ₀	Die Bewertung der Beanspruchung ist unabhängig vom Automationsgrad.	NASA-TLX Overall Workload
	H ₁	Die Bewertung der Beanspruchung ist abhängig vom Automationsgrad.	
	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst das Blinzelnverhalten nicht.	Blinzelfrequenz
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst das Blinzelnverhalten.	
	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst das Scanningverhalten der Probanden nicht.	Scanningverhalten in horizontaler Richtung
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst das Scanningverhalten.	

Das Signifikanzniveau aller statistischen Testverfahren wurde für diesen Versuch auf eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ festgelegt.

6.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung spiegelt die im vorangegangenen Kapitel eingeführte Gruppierung der unabhängigen Variablen in die vier Untersuchungskategorien Blickverhalten, Leistung in der Nebenaufgabe, Reaktionen auf Systemfehler und Workload wider. Die jeweils ermittelten Resultate sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

6.1.3.1 Blickverhalten

Der Mensch erzeugt durch Aufnahme und Verarbeitung von Informationen aus der umgebenden Umwelt eine mentale Repräsentation der Situation (vgl. Kapitel 2). Durch regelmäßiges Auffrischen der zur Verfügung stehenden Informationen wird dieses innere Modell aktuell gehalten. Bereiche, die einer höheren Dynamik unterliegen, müssen dabei generell hochfrequenter aktualisiert werden, um alle essenziellen Zustandsänderungen zeitnah in das innere Situationsmodell zu integrieren und bei Bedarf entsprechend reagieren zu können. In Kombination mit der Verweildauer des



Blickes kann die Frequenz, mit der der Mensch Informationen aus einem bestimmten Bereich aktualisiert, zudem ein Indikator dafür sein, welchen Stellenwert er diesem zumisst. Dabei gilt: Je höher die Frequenz und je länger die Verweildauer umso höher die Priorität. Um die Prioritätszuteilung der Probanden in Abhängigkeit von den festgelegten Faktoren („Automationsgrad“ und „Geschwindigkeitswechsel“) evaluieren zu können, wird für jede AOI die Blickfrequenz und die Verweildauer gesondert betrachtet. Für die statistische Auswertung der Blickkennwerte wurden zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholungen verwendet. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt. Abbildung 6-7 zeigt die Blickkennwerte für die AOI „Tacho“.

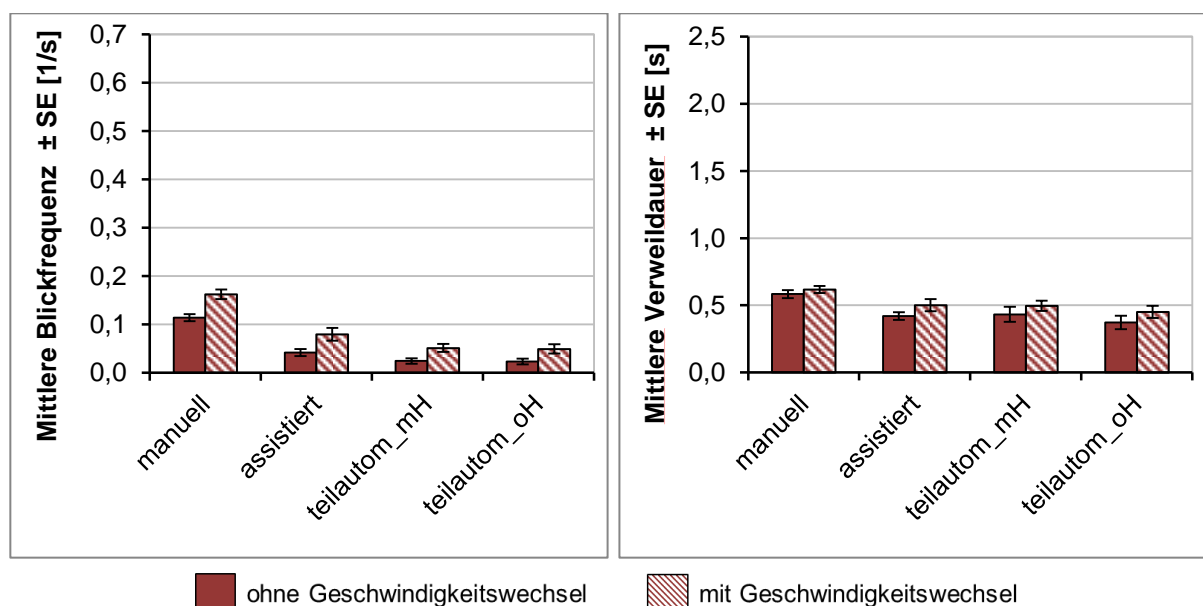


Abbildung 6-7: Mittlere Blickfrequenz und mittlere Verweildauer in Abhängigkeit der Faktoren „Automationsgrad“ und „Geschwindigkeitswechsel“ (AOI „Tacho“; $N = 24$).

Allgemein sind die Frequenzen, mit denen Informationen aus dem Tacho aktualisiert werden, in allen vier Messfahrten vergleichsweise gering, was auf eine niedrige Priorisierung der angebotenen Information hindeutet. Ebenso weisen die kurzen mittleren Verweildauern im Bereich von 0,5 Sekunden darauf hin, dass die Tachoblicke in erster Linie nur einer kurzen Kontrolle des Systemzustandes dienen. Hinsichtlich der Faktoren zeigt sich ein signifikanter Einfluss sowohl des Automationsgrades wie auch vorhandener Geschwindigkeitswechsel auf beide abhängigen Variablen. Die Interaktion „AG x GW“ ist zwar bezüglich der Blickfrequenz signifikant ($F_{AG \times GW}(3, 69.000) = 3.157, p = .030, \eta^2 = .12$), aufgrund des stark ordinalen Charakters des Interaktionseffekts können die Haupteffekte jedoch getrennt voneinander interpretiert werden.

In den Streckenabschnitten, in denen eine Änderung der Höchstgeschwindigkeit auftrat, wird gegenüber Streckenabschnitten ohne Geschwindigkeitswechsel mit nach-



weisbar höherer Frequenz auf den Tacho geblickt ($F_{GW}(1, 23.000) = 38.065$, $p < .001$, $\eta^2 = .62$). Auch die mittlere Verweildauer der Einzelblicke auf den Tacho erhöht sich im Fall notwendiger Geschwindigkeitsanpassungen signifikant ($F_{GW}(1, 23.000) = 7.882$, $p = .010$, $\eta^2 = .26$). Demnach erfolgt nicht nur die Informationsaktualisierung mit einer höheren Frequenz, wenn Geschwindigkeitsanpassungen erforderlich sind. Die Versuchspersonen nehmen sich darüber hinaus auch mehr Zeit, die Information aufzunehmen und zu verstehen. In der manuellen Fahrt ist dies darauf zurückzuführen, dass die Probanden die Geschwindigkeit selbst anpassen mussten und deshalb einen höheren Aufwand zum Abgleich von Soll- und Ist-Geschwindigkeit hatten. In den assistierten bzw. automatisierten Messfahrten deutet dieses Ergebnis darauf hin, dass die Probanden das Systemverhalten überwachen. Im Fall eines notwendigen Zustandswechsels der Automation in Form einer Geschwindigkeitsanpassung zeigen sich daher wie vermutet vermehrte und längere Kontrollblicke auf den Tacho, mit denen die Probanden die Adaption der Automation kontrollieren.

Mit steigendem Automationsgrad sinkt die Aktualisierungsfrequenz ($F_{AG}(2.273, 52.273) = 75.162$, $p < .001$, $\eta^2 = .77$) des AOI „Tacho“. Sowohl mit wie auch ohne Geschwindigkeitswechsel werden die entsprechenden Informationen seltener abgerufen. Post-Hoc-Tests zeigen, dass die Kontrollblicke auf den Tacho in der manuellen Messfahrt mit einer signifikant höheren Frequenz auftreten als in allen anderen Messfahrten (jeweils $p < .001$). Der assistierte Modus unterscheidet sich hinsichtlich der Frequenz signifikant von der teilautomatisierten Variante mit Händen am Lenkrad ($p = .027$) und tendenziell von der freihändigen Variante ($p = .099$). Zwischen den beiden teilautomatisierten Varianten ist kein Unterschied nachweisbar ($p > .999$). Während die Probanden bei der manuellen Fahrt die Geschwindigkeitshaltung bzw. -anpassung selbstständig vornehmen mussten, wurden sie in der assistierten Variante über den Druckpunkt am Gaspedal geführt. In den beiden teilautomatisierten Varianten wurde ihnen die Längsführung dagegen nahezu völlig abgenommen. Der Grad der Unterstützung spiegelt sich dabei in den Blickdaten wieder. Da die Probanden die Längsführung nicht mehr vollständig selbst ausführen müssen, messen sie einem Abgleich von Soll und Ist-Geschwindigkeit bei zunehmender Unterstützung weniger Bedeutung bei. Sie verlassen sich auf die Funktion des Systems. Dies hat zur Folge, dass die Überwachungsaufgabe hinsichtlich der Längsführung mit reduzierter Frequenz ausgeführt und damit das innere Modell des Systemzustandes weniger oft aktualisiert wird. Der Automationsgrad der beiden teilautomatisierten Varianten unterscheidet sich in seiner Funktionalität nicht, weshalb auch hier bezüglich der Frequenz der Kontrollblicke keine Unterschiede nachzuweisen sind.



Auch die mittlere Verweildauer auf den Tacho verringert sich mit zunehmendem Automationsgrad ($F_{AG}(3, 69) = 8.287, p < .001, \eta^2 = .27$). Hinsichtlich der Dauer der Einzelblicke zeigen Post-Hoc-Tests eine signifikant höhere mittlere Verweildauer auf dem Tacho bei der manuellen Fahrt gegenüber den drei unterstützten Varianten (jeweils $p < .001$). Die assistierte und die beiden teilautomatisierten Varianten weisen keine Unterschiede zueinander auf (jeweils $p > .999$). Während in der manuellen Fahrt vergleichsweise viele Kontrollblicke auf den Tacho durchgeführt werden und sich die Probanden dabei mehr Zeit für die Informationsaufnahme nehmen, reduziert sich sowohl die Zahl wie auch die Dauer dieser Kontrollblicke mit Einführung einer Assistenz bzw. Automation. Mit den längeren Blickzeiten in der manuellen Fahrt ist eine erhöhte Informationsaufnahme verbunden. Die Probanden müssen nicht nur den aktuellen Status anhand der Position der Tachonadel erfassen, sondern auch die Auswirkungen der eigenen Aktionen (bremsen, beschleunigen) anhand der Bewegung der Tachonadel kontrollieren und den zukünftigen Systemzustand antizipieren. Durch den Druckpunkt am aktiven Gaspedal in der assistierten Fahrt wird ein Großteil der visuell vermittelten Geschwindigkeitsinformationen zusätzlich über den haptischen Kanal übertragen. Dadurch wird die Informationsaufnahme erleichtert (vgl. auch Lange 2008) und der visuelle Kanal entlastet, was sich in einer Reduktion der Blickzeiten widerspiegelt. In den teilautomatisierten Varianten sind größtenteils nur noch kurze Kontrollblicke für eine Statusüberprüfung notwendig.

Im Gegensatz zu der AOI „Tacho“ mit kurzen Kontrollblicken niedriger Frequenz stellen sich die Blickkennwerte für die Nebenaufgabe (AOI „CID“) völlig anders dar. Aufgrund der vergleichsweise hohen Frequenzen in Kombination mit langen Verweildauern ist hier nicht mehr von Kontrollblicken zu sprechen. Vielmehr zeigt sich aufgrund der in Abbildung 6-8 dargestellten Werte bereits in der manuellen Fahrt eine intensive Beobachtungstätigkeit der Probanden, die sich mit zunehmender Automatisierung weiter intensiviert.

Die Blickfrequenz auf die AOI „CID“ ist in den Streckenabschnitten mit Geschwindigkeitswechseln tendenziell geringer als in den Streckenabschnitten ohne Geschwindigkeitswechsel ($F_{GW}(1, 23.000) = 4.148, p = .053, \eta^2 = .15$). Wie Abbildung 6-8 (links) zeigt, neigen die Probanden zumindest in der manuellen und der assistierten Fahrt dazu, die Frequenz der Informationsauffrischung für die Nebenaufgabe zu reduzieren, wenn Geschwindigkeitswechsel durchgeführt werden müssen. Ein Einfluss des Faktors „GW“ auf die mittleren Verweildauern ist nicht nachzuweisen ($F_{GW}(1, 23.000) = .037, p = .849, \eta^2 < .01$). Während der Faktor „GW“ keinen sonderlich ausgeprägten Einfluss auf das Blickverhalten aufweist, zeigt sich ein Haupteffekt des Faktors „Automationsgrad“ sowohl die Blickfrequenz ($F_{AG}(2.425, 55.770) = 22.215, p < .001, \eta^2 = .49$) als auch die mittlere Verweildauer ($F_{AG}(1.524, 35.024) = 14.676, p < .001, \eta^2 = .39$) betreffend. Die Interaktion



„AG x GW“ ist bezogen auf die Blickfrequenz ($F_{AG \times GW}(3, 69.000) = 3.930, p = .012, \eta^2 = .15$) signifikant, weist aber wiederum einen stark ordinalen Charakter auf. Auch hier können die Haupteffekte demnach getrennt voneinander interpretiert werden.

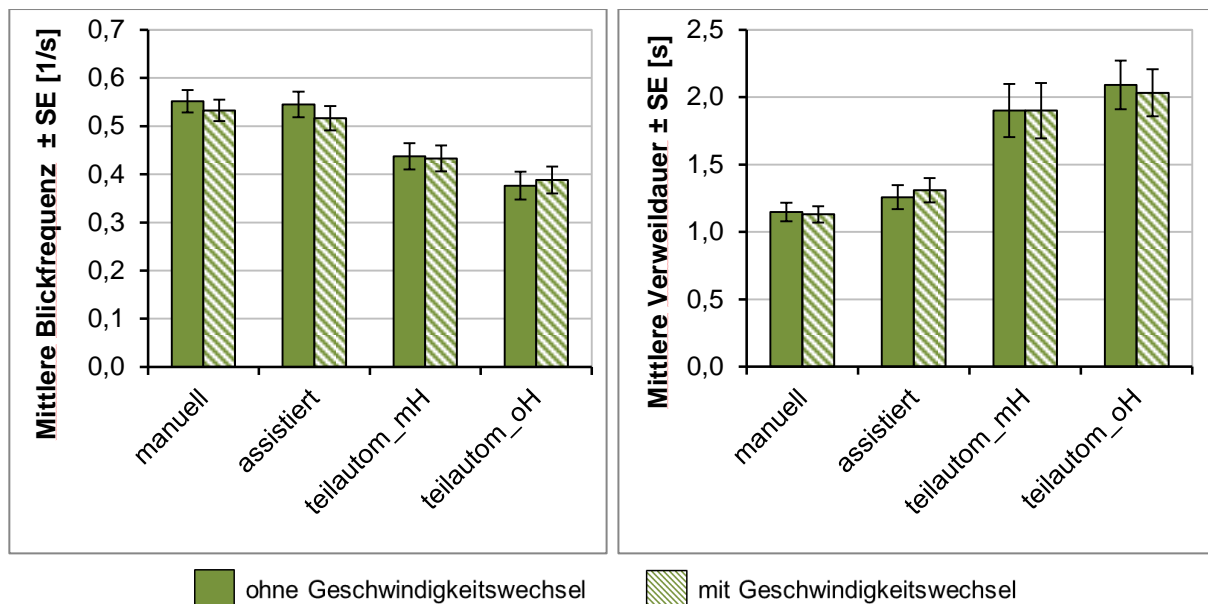


Abbildung 6-8: Mittlere Blickfrequenz und mittlere Verweildauer in Abhängigkeit der Faktoren „Automationsgrad“ und „Geschwindigkeitswechsel“ (AOI „CID“; $N = 24$).

Mit zunehmendem Automationsgrad nimmt die Blickfrequenz und damit die Anzahl der Blicke auf das CID ab. Dabei unterscheidet sich die manuelle Fahrt signifikant von den teilautomatisierten Fahrten mit ($p = .002$) und ohne ($p = .000$) Hände am Lenkrad, jedoch nicht von der assistierten Fahrt ($p > .999$). Die assistierte Fahrt weist ebenfalls signifikante Unterschiede zu den beiden teilautomatisierten Varianten auf (mH: $p = .001$, oH: $p = .000$). Der Post-Hoc-Test zwischen den beiden höchsten Automationsstufen zeigt kein signifikantes Ergebnis ($p = .436$). Hinsichtlich der Blickfrequenz auf die Nebenaufgabe sind jeweils die beiden niedrigeren Automationsstufen manuell und assistiert sowie die beiden höheren Automationsstufen teilautom_mH und teilautom_oH auf demselben Niveau anzusiedeln.

Im Gegensatz zur abnehmenden Blickfrequenz nimmt die mittlere Verweildauer mit zunehmendem Automationsgrad zu. D. h. je höher der Automationsgrad, umso weniger, dafür längere Blicke treten auf. Post-Hoc-Tests zeigen jedoch ein sehr ähnliches Ergebnis hinsichtlich der Unterschiede zwischen den vier Stufen. Die mittlere Verweildauer bei der manuellen Fahrt ist signifikant geringer verglichen mit den beiden teilautomatisierten Fahrten (mH: $p = .001$, oH: $p = .000$). Ein Unterschied von manuell und assistiert ist nur tendenziell ($p = .086$) festzustellen. Ein Vergleich der assistierten Fahrt mit den beiden teilautomatisierten Varianten zeigt eine signifikante Zunahme der mittleren Verweildauer auf dem CID mit Erhöhung des



Automationsgrades (mH: $p = .002$, oH: $p = .001$). Ein Unterschied der beiden höchsten Automationsstufen untereinander ist hier, ebenso wie bei der Blickfrequenz, nicht nachzuweisen ($p > .999$).

Die Auswertung der Blickdaten auf das CID zeigt eine sehr starke Abhängigkeit sowohl der Blickfrequenz wie auch der Verweildauer vom Automationsgrad. Entsprechend des eingangs dieses Kapitels erläuterten Zusammenhangs zwischen Informationspriorisierung und Blickfrequenz könnte die Reduzierung bei höheren Automationsgraden als sinkendes Interesse an der Nebenaufgabe fehlinterpretiert werden. Bei zusätzlicher Betrachtung der mittleren Verweildauern fällt jedoch auf, dass die Abnahme der Blickfrequenz durch eine überproportionale Zunahme der mittleren Verweildauer auf die AOI mehr als kompensiert wird. Es tritt an dieser Stelle besonders beim Übergang von der assistierten auf die teilautomatisierte Fahrt eine Strategieänderung bei der Informationsaufnahme auf. Bei Blicken auf die Nebenaufgabe wird das CID deutlich länger fokussiert. Gleichzeitig reduziert sich die Frequenz, mit der die Informationen aus der betreffenden AOI aufgefrischt werden. Diese Reduzierung der Informationsaktualisierung ist sowohl bei den Blicken auf den Tacho wie auch in den CID-Blicken zu finden. Wie Abbildung 6-9 zeigt und im Folgenden erläutert wird, ergibt sich dasselbe Phänomen auch für die Blicke auf die AOI „Fahrszene“.

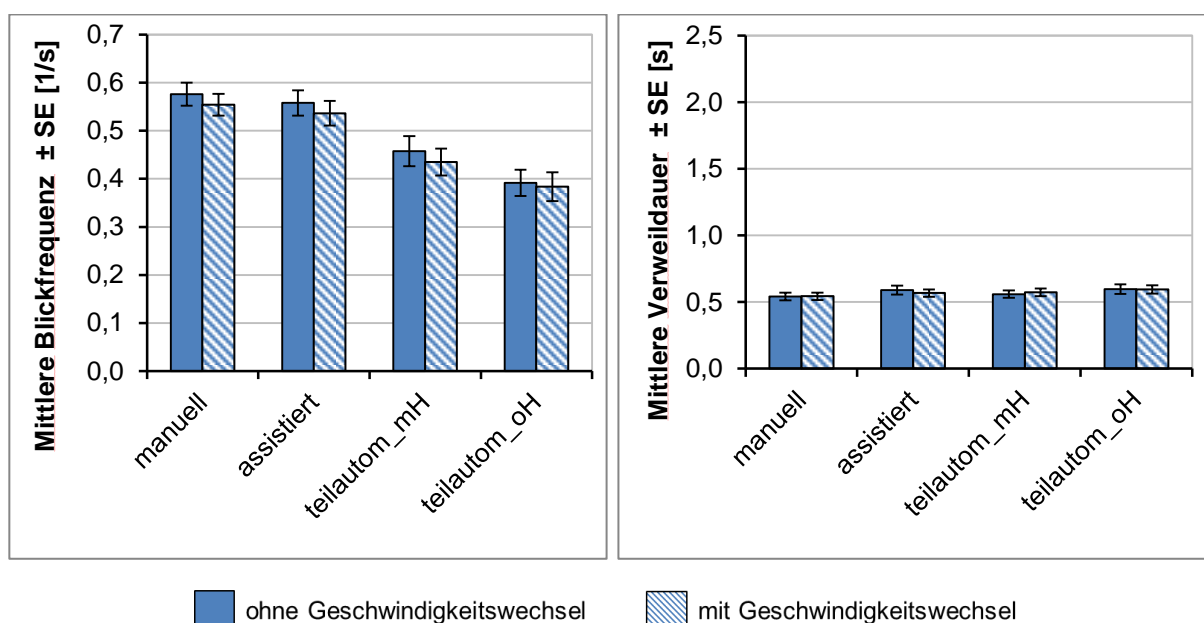


Abbildung 6-9: Mittlere Blickfrequenz und mittlere Verweildauer in Abhängigkeit der Faktoren „Automationsgrad“ und „Geschwindigkeitswechsel“ (AOI „Szenerie“; $N = 24$).

Allgemein treten bei der Fahrszene verhältnismäßig kurze Verweildauern von ca. 0.5 Sekunden auf. Die Informationsauffrischung erfolgt hingegen mit einer hohen Frequenz, da die Dynamik der Fahrszene sehr hoch ist und Änderungen in der



Fahrsituation möglichst zeitnah in das mentale Modell integriert werden müssen, um adäquat reagieren zu können. Die Kombination aus hoher Frequenz und kurzer Verweildauer deutet ähnlich wie bei der AOI „Tacho“ darauf hin, dass die Fahrszene von den Probanden nicht intensiv beobachtet, jedoch durch häufige Kontrollblicke regelmäßig aufgefrischt wird.

In der detaillierten Betrachtung der abhängigen Variablen ergibt sich für die Blickfrequenz auf die „Szenerie“ ein signifikanter Effekt des Faktors „Geschwindigkeitswechsel“. Muss die Geschwindigkeit an neue Vorgaben angepasst oder die Reaktion der Automation auf Geschwindigkeitsbeschränkungen überwacht werden, ist die Frequenz der Blicke auf die Fahrszene geringer ($F_{GW}(1, 23.000) = 12.100, p = .002, \eta^2 = .35$). Zusammen mit der nur tendenziellen Verringerung der Blickfrequenz auf die Nebenaufgabe sowie der signifikanten Zunahme der Blickfrequenz auf den Tacho lässt dieses Ergebnis den Schluss zu, dass im Falle von Geschwindigkeitswechseln die Steigerung der Aktualisierungsrate des Tachos auf Kosten der AOI „Szenerie“ durchgeführt wird. Hinsichtlich der mittleren Verweildauern ist kein Effekt ($F_{GW}(1, 23.000) = 1.102, p = .752, \eta^2 < .01$) festzustellen, d. h. unabhängig vom Faktor „Geschwindigkeitswechsel“ erachten die Probanden eine mittlere Verweildauer von ca. 0.5 Sekunden als ausreichend, um die Informationen aus der Fahrszenerie abzurufen.

Wie bei den beiden vorangegangenen AOI nimmt die mittlere Blickfrequenz mit zunehmendem Automationsgrad ab ($F_{AG}(2.289, 52.641) = 31.846, p < .001, \eta^2 = .58$). Die manuelle Fahrt weist dabei signifikant höhere Blickfrequenzen auf als die beiden teilautomatisierten Fahrten (mH: $p < .001$, oH: $p < .001$), ohne sich nachweisbar von der assistierten Fahrt zu unterscheiden ($p = .730$). Für die assistierte Variante ergeben sich ebenfalls signifikant höhere Blickfrequenzen auf die Fahrszene verglichen mit der teilautomatisierten Fahrt mit ($p < .001$) und ohne ($p < .001$) Hände am Lenkrad. Gemäß der Post-Hoc-Tests für die Gegenüberstellung der beiden teilautomatisierten Systeme ergeben sich keine nachweisbaren Unterschiede in den Blickfrequenzen ($p = .236$). Erklären lassen sich diese Ergebnisse damit, dass in den beiden niedrigen Automationsstufen die automatisierte Querführung nicht vorhanden (manuell) bzw. schwach ausgeprägt (assistiert) und dadurch zu großen Teilen noch vom Fahrer selbst auszuführen ist. Damit einher geht die Notwendigkeit für den Fahrer, sich der Position des Fahrzeugs im Fahrstreifen sowie der Time-to-Line-Crossing (TTLC) in hohem Maße bewusst zu sein. Dies macht eine hochfrequente Aktualisierung des mentalen Modells der Fahrsituation notwendig. Bei den beiden teilautomatisierten Varianten wird die Querführung zu einem überwiegenden Teil vom System übernommen, was den Probanden unter Umständen mehr zeitlichen Spielraum hinsichtlich der Auffrischung des mentalen Situationsmodells ermöglicht.



Hinsichtlich der mittleren Verweildauer auf die AOI „Szenerie“ ergibt sich ebenfalls ein Haupteffekt des Faktors Automationsgrad ($F_{AG}(2.289, 52.641) = 31.846, p = .030, \eta^2 = .12$). Dabei nimmt die mittlere Verweildauer auf der Fahrscene mit zunehmender Unterstützung des Fahrers leicht zu. Wie an der Blickfrequenz zu sehen ist, frischen die Probanden die Informationen aus der Umgebung jedoch weniger oft auf. Unter Umständen benötigen sie deshalb etwas mehr Zeit pro Einzelblick, um die Situation zu erfassen, zu verarbeiten und ihr inneres Modell zu aktualisieren. Post-Hoc-Tests zeigen hier jedoch, dass ein signifikanter Unterschied nur zwischen der manuellen und der teilautomatisierten Fahrt ohne Hände am Lenkrad besteht ($p = .050$), d. h. dass nur in der höchsten Automationsstufe die Einzelblicke im Mittel etwas länger dauern als in der manuellen Fahrt. Verglichen mit der assistierten ($p = .102$) und der teilautomatisierten Variante ($p > .999$) mit Händen am Lenkrad ergeben sich für die manuelle Fahrt keine statistisch signifikanten Unterschiede. Auch die weiteren Einzelvergleiche der assistierten zu den teilautomatisierten Fahrten (mH: $p > .999$, oH: $p > .999$) weisen, ebenso wie der Vergleich der beiden teilautomatisierten Fahrten untereinander ($p = .706$), keine signifikanten Unterschiede auf. Dieses Ergebnis ist vermutlich dadurch zu erklären, dass der Fahrer in der höchsten Automationsstufe völlig von der Fahraufgabe entkoppelt ist, und auch haptisch keinerlei Informationen über den Fahrzeug- und Umgebungszustand erhält. Das Informationsdefizit macht sich daher in diesem Fall besonders in Form eines längeren, notwendigen Zeitbudgets zum Aufbau der mentalen Repräsentation der Fahrsituation bemerkbar. Dadurch sind speziell bei der höchsten Automationsstufe signifikant längere mittlere Verweildauern erforderlich.

Die bisher in diesem Kapitel aufgeführten und detailliert betrachteten Blickkennwerte können, wie in Abbildung 6-10 gezeigt zu einem Diagramm der Aufmerksamkeitsverteilung zusammengefasst werden. Dargestellt ist die Verteilung der Blickzuwendungen auf die einzelnen AOI während der 30-Sekunden-Abschnitte mit Nebenaufgabenbearbeitung. Die Abbildung gibt einen Überblick darüber, wie viel Prozent der Zeit durchschnittlich auf die einzelnen AOI geblickt wurde. Es ist damit eine Visualisierung der Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit. Da gemäß der AOI-Definition während der Fahrt auch Blicke auf Objekte außerhalb der festgelegten AOI vorkommen können, wird ein Gesamtwert von 100 % nicht erreicht.

Ebenso wie in der vorangegangenen Betrachtung der Blickfrequenzen und der Verweildauern ist auch in diesem Diagramm zunächst augenscheinlich, dass sich das Vorhandensein von Geschwindigkeitswechseln auf die Aufmerksamkeitsverteilung auswirkt. Müssen Änderungen der gefahrenen Geschwindigkeit durchgeführt werden, intensivieren sich unabhängig vom Automationsgrad die Aufmerksamkeitszuwendungen zum Tacho ($F_{GW}(1, 23.000) = 31.138, p < .001, \eta^2 = .58$). Die zunehmenden Kontrollblicke gehen sowohl zulasten der Nebenaufgabe



($F_{GW}(1, 23.000) = 6.416, p = .019, \eta^2 = .22$) als auch der Fahrscene ($F_{GW}(1, 23.000) = 10.002, p = .004, \eta^2 = .30$). Die Aufmerksamkeitszuwendung zu diesen AOI wird verringert. Eine Interaktion „AG x GW“ tritt nur für die AOI „Tacho“ auf ($F_{AG*GW}(3, 69.000) = 4.693, p = .005, \eta^2 = .17$). Aufgrund des ausgeprägt ordinalen Charakters können jedoch auch hier die Haupteffekte getrennt voneinander interpretiert werden.

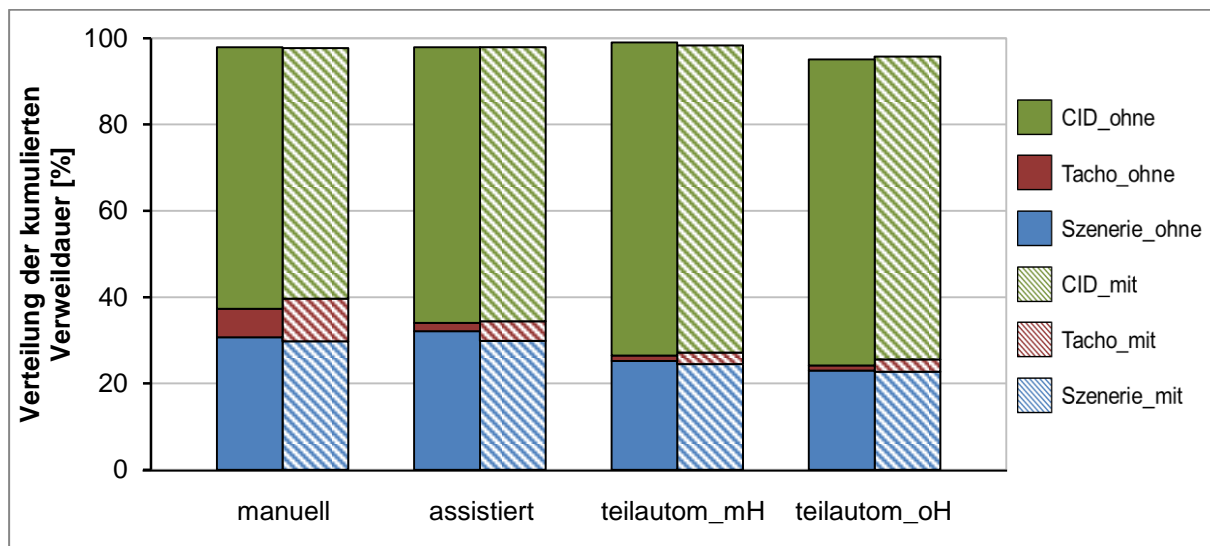


Abbildung 6-10: Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit während der Nebenaufgabenbearbeitung. Als Maß für die Aufmerksamkeit wird die prozentuale Verteilung der kumulierten Verweildauer auf die einzelnen AOI während des Nebenaufgabenangebots herangezogen (N=24). Die schraffierten bzw. durchgehenden Flächen stellen das Blickverhalten in Abschnitten mit bzw. ohne Geschwindigkeitswechsel dar.

Die weiter oben bereits erwähnte Tatsache, dass bereits in der manuellen Fahrt eine intensive Bearbeitung der Nebenaufgabe stattfindet, spiegelt sich auch in dieser Darstellung wider. Im Schnitt blickten die Probanden auch ohne Automationsunterstützung 59.3 % der möglichen Bearbeitungszeit auf das CID. Diese Aufmerksamkeitszuwendung wird mit steigendem Automationsgrad weiter verstärkt. Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors „AG“ ($F_{AG}(1.422, 32.712) = 11.569, p < .001, \eta^2 = .34$). Gegenüber der manuellen Fahrt findet sowohl bei der assistierten ($p = .002$) als auch bei den beiden teilautomatisierten Varianten (mH: $p < .001$, oH: $p = .003$) eine deutliche Aufmerksamkeitsverschiebung hin zur Nebenaufgabe statt mit dem Resultat einer durchschnittlichen Blickzuwendung von ca. 70 % in den beiden teilautomatisierten Modi. Weiterhin zeigen Post-Hoc-Tests einen signifikanten Anstieg der prozentualen Blickzuwendung zur Nebenaufgabe zwischen der assistierten Fahrt und der teilautomatisierten Fahrt mit motorischer Einbindung ($p < .001$). Ein Unterschied zwischen „assistiert“ und „teilautom_oH“ ist statistisch ebenso wenig nachzuweisen ($p = .273$) wie ein Einfluss der Hands-On-Bedingung ($p > .999$).



Ein interessanter Aspekt hinsichtlich der Auswirkungen von Automation zeigt sich darin, dass abhängig von der Automationsunterstützung Aufmerksamkeit von unterschiedlichen Informationsquellen abgezogen wird, um die Nebenaufgabenbearbeitung zu intensivieren. Analysiert man den Übergang von der manuellen zur assistierten Fahrt, fällt zunächst auf, dass sich in diesem Fall insbesondere die Blickanteile auf den Tacho erheblich reduzieren. Der Haupteffekt des Faktors „AG“ ist hinsichtlich der AOI „Tacho“ signifikant ($F_{AG}(2.412, 55.469) = 89.379, p < .001, \eta^2 = .80$) und Post-Hoc-Tests zeigen eine statistisch nachweisbare Reduzierung der prozentualen Blickzuwendung durch das Umschalten der Assistenzfunktion ($p < .001$). Diese Reduktion ist auf die Ausprägung der Geschwindigkeitsassistenz in Form des aktiven Gaspedals zurückzuführen. Durch die haptische Rückmeldung der empfohlenen Geschwindigkeit in Form des Druckpunktes wird der visuelle Kanal des Fahrers entlastet und die freiwerdenden Ressourcen werden in die Bearbeitung der Nebenaufgabe investiert. In den beiden teilautomatisierten Varianten tritt dieser Effekt aufgrund der kompletten Übernahme der Längsführung durch die Automation ebenfalls auf. Verglichen mit der manuellen Fahrt ist eine signifikante Abnahme der Aufmerksamkeitszuwendung zum Tacho (mH: $p < .001$, oH: $p < .001$) nachzuweisen. Aber auch gegenüber der assistierten Fahrt, d. h. der Längsführung mit aktivem Gaspedal führt eine völlige Entlastung durch die Automation zu einer weiteren Abnahme der Blickzuwendungen. Zwar sind die Ergebnisse hier nicht eindeutig (mH: $p = .033$, oH: $p = .159$), jedoch verringert sich die prozentuale Blickverteilung zum Tacho zumindest tendenziell. Ob die Probanden durch die Hände am Lenkrad motorisch eingebunden waren oder nicht, hat keinen statistisch nachweisbaren Einfluss ($p > .999$).

In der assistierten Fahrt wird der laterale Teil der Fahraufgabe zwar unterstützt, muss vom Fahrer zu großen Teilen jedoch noch selbst durchgeführt werden. Diese anhaltende Involvierung des Fahrers in die Querführungsaufgabe äußert sich in der Aufmerksamkeitszuteilung zur AOI „Szenerie“. Der Faktor „AG“ weist hier zwar einen signifikanten Haupteffekt auf ($F_{AG}(2.374, 54.613) = 20.247, p < .001, \eta^2 = .47$), jedoch zeigen Post-Hoc-Tests keinen Unterschied zwischen der manuellen und der assistierten Fahrt ($p > .999$). Im Gegensatz zur assistierten Längsführung, bei der es das aktive Gaspedal ermöglicht, Tachoblicke zu minimieren, wird der Fahrer durch die Gestaltung der Querführung dazu gezwungen, weiterhin aufmerksam die Umgebung zu beobachten. Eine Verschiebung der visuellen Ressourcen, weg von der Fahrscene, hin zur Nebenaufgabe, ist dadurch nicht möglich. Erst beim Übergang vom assistierten auf die teilautomatisierten Modi und der damit verbundenen, weitgehenden Entlastung von der Querführung findet eine Abnahme der Blickanteile auf die Fahrscene statt. Die Aufmerksamkeitszuwendung zur AOI „Szenerie“ ist dabei in den teilautomatisierten Varianten sowohl im Vergleich zur manuellen Fahrt (mH: $p = .002$, oH: $p < .001$) als auch im Vergleich zur assistierten Fahrt (mH: $p < .001$, oH: $p = .003$) geringer. Die abgezogene Aufmerksamkeit wird in die Nebenaufgabe



investiert. Ob die Hände am Lenkrad gehalten wurden oder nicht, hat hingegen keinen signifikanten Einfluss ($p > .999$) auf die Aufmerksamkeitszuwendung zur Fahrscene.

Angesichts dieser Ergebnisse ist festzustellen, dass sich der Grad der Unterstützung in den unterschiedlichen Führungsdimensionen direkt auf das Fahrerverhalten auswirkt. Im assistierten Fahrmodus mit hauptsächlich Unterstützung in der Längsführung geschieht die Aufmerksamkeitszuwendung zur Nebenaufgabe überwiegend auf Kosten der Tachoblicke. In den teilautomatisierten Varianten führt die Übernahme sowohl der Längs- als auch der Querführung darüber hinaus zu einer weiteren Aufmerksamkeitsverschiebung hin zur Nebenaufgabe, diesmal auch zulasten der Blickzuwendung zur Fahrszenarie.

6.1.3.2 Leistung in der Nebenaufgabe

Die im vorangegangenen Kapitel dargestellte Auswertung der Blickdaten zeigt in allen Automationsgraden eine intensive Aufmerksamkeitszuwendung zur Nebenaufgabe. Eine zunehmende Entlastung von der Fahraufgabe durch Assistenz/Automation führt darüber hinaus zu einer weiteren Intensivierung der Blickzuwendungen zum CID. Wie Abbildung 6-11 zeigt, wirkt sich das Ausmaß der visuellen Zuwendung zur Nebenaufgabe auch auf die Leistung in der Nebenaufgabe aus.

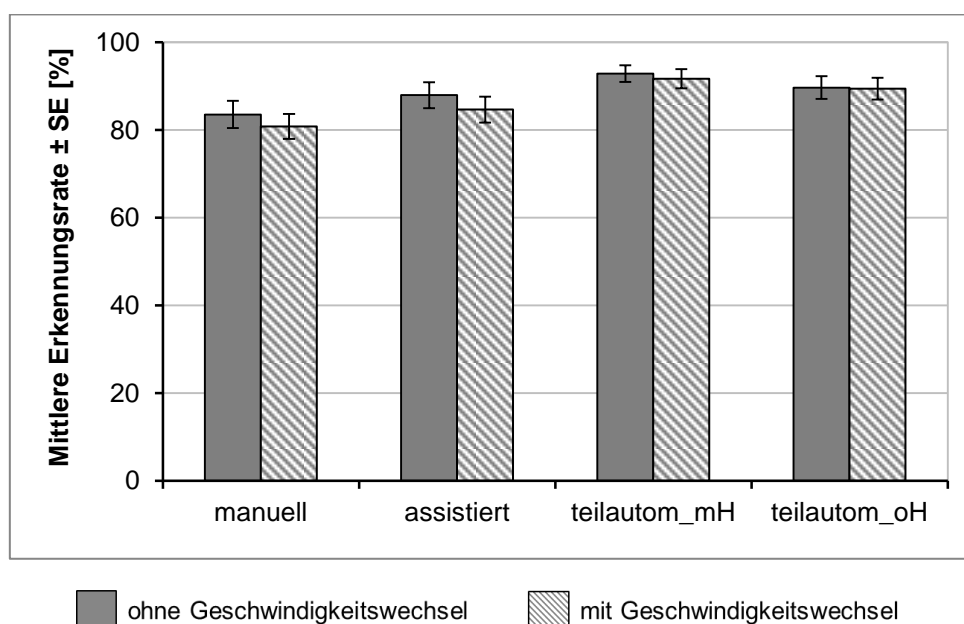


Abbildung 6-11: Qualität der Nebenaufgabenbearbeitung in Form der prozentualen Erkennungsrate der im CID dargestellten Zweien ($N = 24$).

Als Maßstab für die Qualität der Nebenaufgabenbearbeitung im CID dient die Erkennungsrate, d. h. der prozentuale Anteil an den tatsächlich dargestellten Zweien, der von den Probanden identifiziert und gemeldet wurde. Für die statistische Auswertung der Nebenaufgabenbearbeitung wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit



Messwiederholungen verwendet. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt. Es ergeben sich sowohl für den Faktor „Geschwindigkeitswechsel“ ($F_{GW}(1, 23.000) = 15.298, p < .001, \eta^2 = .40$) als auch für den Faktor „Automationsgrad“ ($F_{AG}(2.259, 51.952) = 11.060, p < .001, \eta^2 = .33$) signifikante Haupteffekte.

Analog zum Blickverhalten wirken sich Änderungen in der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf die Erkennungsrate aus. Da die Probanden in Abschnitten mit Geschwindigkeitswechseln die Blickzuwendung zum CID reduzieren, werden weniger der dargestellten Zweien erkannt. Die Qualität der Erkennungsleistung sinkt, wenn Geschwindigkeitsanpassungen durchgeführt (manuell, assistiert) oder kontrolliert werden müssen (automatisiert).

Auch hinsichtlich des Faktors „Automationsgrad“ spiegelt die Erkennungsrate die Ergebnisse der Blickdatenauswertung wider. Je mehr die Fahrer in der Fahraufgabe unterstützt werden, umso besser wird deren Leistung in der Nebenaufgabe. Zurückzuführen ist dies auf die Verschiebung der visuellen Aufmerksamkeit hin zum CID. Wie Post-Hoc-Tests zeigen, ist eine signifikante Verbesserung der Erkennungsrate allerdings nur beim direkten Vergleich der manuellen Fahrt mit den beiden automatisierten Varianten (mH: $p < .001$, oH: $p = .003$) nachzuweisen. Die assistierte Fahrt führt gegenüber der manuellen Variante hingegen nur zu tendenziellen ($p = .068$) Verbesserungen. Vergleicht man die automatisierten Varianten mit der assistierten Fahrt, so ist eine Erhöhung der Erkennungsleistung ebenfalls nur tendenziell (mH: $p = .087$) bzw. überhaupt nicht erkennbar (oH: $p = .223$). Die Hands-On Bedingung in den automatisierten Varianten hat keinen nachweisbaren Einfluss auf die Qualität der Nebenaufgabenbearbeitung ($p = .695$).

6.1.3.3 Reaktion in Eingriffsszenarien

Im Folgenden wird dargestellt, wie sich die Aufmerksamkeitsverschiebung hin zur Nebenaufgabe auf die Reaktionsfähigkeit in den Eingriffsszenarien auswirkt. Dazu wurde zunächst die Anzahl ausbleibender bzw. verspäteter Eingriffe in den einzelnen Szenarien betrachtet. Für die statistische Auswertung wurde der Q-Test nach Cochran verwendet, wobei die einzelnen Automationsgrade unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) paarweise miteinander verglichen wurden. Abbildung 6-12 zeigt die Häufigkeiten der nicht rechtzeitig erfolgten Eingriffe.

Die Analyse der Situation „VZ“ beschränkt sich auf die Fahrten mit Assistenz bzw. Automation, da nur bei diesen Modi ein einzelnes, definiertes Verkehrszeichen betrachtet werden kann, bei dem eine Fehlfunktion auftrat. In der manuellen Fahrt unterschied sich keines der vorhandenen Verkehrszeichen in ähnlicher Weise von den restlichen, weshalb eine vereinzelt und isolierte Betrachtung nicht sinnvoll ist. Betrachtet man jedoch die Gesamtheit der Geschwindigkeitsbeschränkungen, bei de-



nen während der manuellen Fahrt die Nebenaufgabe bearbeitet wurde, so zeigt sich, dass in jeweils 3 % der Fälle überhaupt nicht bzw. zu spät reagiert wurde. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Probanden in der manuellen Fahrt auf eine Geschwindigkeitsbeschränkung entsprechend der definierten Kriterien unzureichend reagierten, lag demnach in Summe bei 6 %.

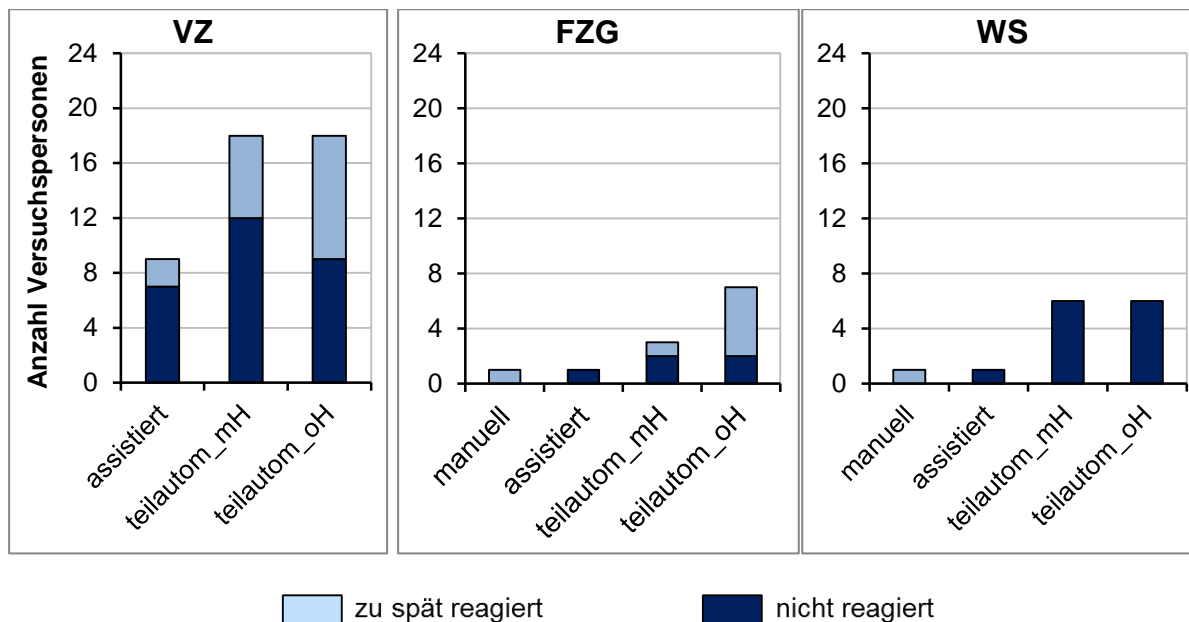


Abbildung 6-12: Anzahl der Versuchspersonen ohne bzw. mit verspäteter Reaktion in den einzelnen Szenarien (N = 24).

Für die unterstützten Modi ergibt sich im Szenario „VZ“ ein Haupteffekt des Faktors Automationsgrad ($Q(2) = 36.52, p < .001$) bezüglich der Häufigkeit fehlender bzw. zu spät erfolgter Eingriffe. Post-Hoc-Tests zeigen, dass verglichen mit dem assistierten Modus in beiden automatisierten Varianten signifikant mehr Probanden mit überhöhter Geschwindigkeit in oder durch die begrenzte Zone fahren (mH: $Q(1) = 7.36, p = .020$; oH: $Q(1) = 7.36, p = .020$). Hinsichtlich der Hands-On Bedingung zeigt sich einmal mehr kein Einfluss auf die abhängige Variable ($Q(1) < 0.00, p > .999$).

Auch im Szenario „FZG“ wirkt sich der Automationsgrad signifikant auf die Anzahl fehlender bzw. verspäteter Reaktionen der Fahrer aus, wodurch sich ein Haupteffekt ergibt ($Q(3) = 8.47, p = .037$). Mit zunehmender Unterstützung zeigen mehr Probanden ausbleibende bzw. verspätete Reaktionen. Aus den Post-Hoc-Tests ergeben sich dabei jedoch keine signifikanten Unterschiede. Dies ist auf die geringere Teststärke der einzelnen, paarweisen Vergleiche zurück zu führen. Ausgehend von der manuellen Fahrt ist kein Unterschied im Eingriffsverhalten der Probanden nachzuweisen, wenn eine Assistenzfunktion ($Q(1) = 0.00, p > .999$) aufgeschaltet wird. Auch bei den Automationsvarianten mit Händen am Lenkrad ($Q(1) = 1.00, p > .999$) bzw. ohne Hände am Lenkrad ($Q(1) = 4.50, p = .203$) zeigt sich keine nachweisbare Verschlechterung der Probandenreaktionen gegenüber der manuellen Fahrt. Die paar-



weisen Vergleiche des assistierten mit den beiden automatisierten Modi ergeben ebenfalls keine signifikanten Unterschiede (mH: $Q(1) = 1.00, p > .999$; oH: $Q(1) = 4.50, p = .203$) hinsichtlich des Eingriffsverhaltens. Ob in den automatisierten Varianten die Hände am Lenkrad gehalten werden oder nicht hat ebenfalls keinen nachweisbaren Effekt ($Q(1) = 2.00, p = .944$).

Ein sehr ähnliches Bild zeigt sich in der Situation „WS“. Auch hier weist die Betrachtung der Häufigkeiten fehlender bzw. zu später Reaktionen einen Haupteffekt des Faktors Automationsgrad ($Q(3) = 10.71, p = .013$), auf, ohne dass die paarweisen Einzelvergleiche signifikant werden. Dabei stehen die manuelle und die assistierte Fahrt mit jeweils einer ausbleibenden bzw. verspäteten Reaktion auf einer Stufe ($Q(1) = 0.00, p > .999$). Demgegenüber stehen die beiden automatisierten Fahrten mit jeweils sechs Nicht-Reaktionen ($Q(1) = 0.00, p > .999$). Ein signifikanter Unterschied zwischen diesen beiden Niveaustufen ist nicht nachzuweisen ($Q(1) = 5.00, p = .152$).

Auch wenn die Unterschiede in den Einzelvergleichen nicht immer nachgewiesen werden konnten, zeigen die in allen Szenarien auftretenden Haupteffekte des Faktors „AG“ sowie die in Abbildung 6-12 dargestellten Häufigkeiten doch, dass mit steigendem Automationsgrad eine zunehmende Anzahl an Probanden verspätet bzw. nicht auf die Eingriffsszenarien reagierte. Um näher zu untersuchen, warum einzelne Versuchspersonen keine Reaktion zeigten, wurde das Blickverhalten dieser Probanden gesondert betrachtet. Für das Szenario „VZ“ zeigt Tabelle 6-7, dass die ausbleibenden Reaktionen auf Defizite im Aufbau des Situationsbewusstseins zurückzuführen sind. Diese Probleme verschieben sich mit zunehmendem Automationsgrad zu früheren Phasen des Informationsverarbeitungsprozesses.

Tabelle 6-7: Blickverhalten der Probanden ohne Reaktion im Szenario Verkehrszeichen. Prozentzahlen sind bezogen auf die Anzahl der Nicht-Reagierer im jeweiligen Automationsgrad.

		assistiert		teilautom_mH		teilautom_oH	
nicht reagiert		7		12		9	
Blick auf	Szenerie	7	100 %	9	75 %	6	67 %
	Schild	5	71 %	4	33 %	0	0 %
	Tacho	2	29 %	1	8 %	0	0 %

In der assistierten Fahrt wies jeder der sieben Nicht-Reagierer Kontrollblicke auf die Szenerie auf. Fünf Probanden blickten nachweislich auf das Verkehrszeichen. Zwei davon glichen sogar die erlaubte mit der gefahrenen Geschwindigkeit ab (Tachoblick). Obwohl diese Probanden über die notwendigen Informationen verfügten, griffen sie nicht in die Fahrzeugführung ein. Die Informationsaufnahme stellte demnach in dieser Bedingung weniger das Problem dar als die nachgeschaltete Informationsverarbeitung, also das Verstehen der Situation. Mit zunehmendem Automationsgrad



wurde hingegen bereits die Phase der Informationsaufnahme vernachlässigt. Die Kontrollblicke auf die Szenerie nahmen kontinuierlich ab, was eine Entdeckung der Eingriffsszenarien naturgemäß erschwerte. Zusätzlich wurde auch das Verkehrszeichen von weniger Probanden wahrgenommen. In der assistierten Fahrt wurde es von 71 % der Nicht-Reagierer angeblickt. Diese Zahl verringerte sich auf 33 % in der teilautomatisierten Fahrt mit Händen am Lenkrad. In der Bedingung ohne Hände am Lenkrad wurde das Verkehrszeichen überhaupt nicht mehr beachtet. Während bei der assistierten Fahrt also die Problematik eher im Verständnis des Systemfehlers liegt, erhöhte sich mit zunehmendem Automationsgrad zusätzlich die Wahrscheinlichkeit ihn zu übersehen.

In den Szenarien „FZG“ und „WS“ ist nicht die Informationsaufnahme das eigentliche Problem. Wie Tabelle 6-8 zeigt, nimmt der überwiegende Teil der Probanden die notwendigen Umgebungsinformationen (Wildschwein, Bremslichter) wahr.

Tabelle 6-8: Blickverhalten der Probanden ohne Reaktion in den Szenarien „FZG“ und „WS“. Prozentzahlen sind bezogen auf die Anzahl der Nicht-Reagierer im jeweiligen Automationsgrad.

		manuell		assistiert		teilautom_mH		teilautom_oH	
FZG	nicht reagiert	0		1		2		2	
	Blick auf Szenerie	0	-	1	100 %	2	100 %	2	100 %
WS	nicht reagiert	0		1		6		6	
	Blick auf Szenerie	0	-	1	100 %	5	83 %	5	83 %

Die Probanden sind jedoch, insbesondere in den automatisierten Varianten, nicht in der Lage, die gesehenen Informationen korrekt zu verknüpfen, die sich ergebende, kritische Situationen vorherzusehen und die daraus resultierenden Handlungsschritte abzuleiten. Insbesondere im Szenario „WS“ wird die Informationsinterpretation in den automatisierten Modi zusätzlich erschwert. Dies führt zu einer erhöhten Zahl an Nicht-Reagierern, obwohl die notwendigen Informationen bzw. Schlüsselreize in fünf von sechs Fällen wahrgenommen wurden. Das Ausbleiben von Reaktionen in diesem Versuch ist generell auf die ersten beiden Phasen des Informationsverarbeitungsprozesses bzw. die ersten beiden Ebenen des Situationsbewusstseins (Endsley 1995a) zurückzuführen: Wahrnehmung (Problem nicht gesehen) und Verstehen (Problem gesehen, aber nicht erkannt).

6.1.3.4 Reaktionszeiten

Eine absolute Betrachtung des Situationsablaufes, allein anhand der digitalen Klassifizierung, ob eine Reaktion stattfindet oder nicht, zeichnet kein umfassendes Bild der Reaktionsfähigkeit. Automationseffekte können sich nicht nur im Ausbleiben von Reaktionen äußern, sondern sich auch auf die Reaktionszeiten bei erfolgten Eingriffen auswirken. Reaktionszeitverlängerungen können darauf hinweisen, dass keine aus-



reichende mentale Repräsentation der Situation vorhanden ist. Der Aufbau des inneren Modells erfordert Zeit und ist abhängig vom aktuellen Stand des Situationsbewusstseins. Die hier durchlaufenen Prozesse der Informationsverarbeitung spielen sich auf der zweiten und dritten Ebene des Situationsbewusstseins nach Endsley ab: Verstehen bzw. Antizipieren.

Daher liegt der Fokus im Folgenden auf der Evaluierung, ob sich die Reaktionszeit mit zunehmendem Automationsgrad verlängerte. Die statistische Auswertung der Reaktionszeitpunkte erfolgte mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt. Da nur diejenigen Probanden für die Auswertung herangezogen wurden, bei denen in allen Automationsgraden eine Reaktion auftrat, bestehen die Stichproben der einzelnen Szenarien jeweils nur aus einer Teilmenge der gesamten Probanden.

Für das Szenario „VZ“ wurde untersucht, bei welcher Entfernung vor dem, von den Automationsvarianten nicht detektierten, Verkehrsschild die Geschwindigkeitsanpassung durch Bremsen bzw. Ausrollen eingeleitet wurde. Hierbei wird auch die manuelle Fahrt in die Betrachtung mit einbezogen. Es ist davon auszugehen, dass sich das Geschwindigkeitsverhalten in der manuellen Fahrt an den einzelnen Verkehrszeichen nicht voneinander unterscheidet. Demnach ist es zulässig das entsprechende Szenario „VZ“ als repräsentative Vergleichsgrundlage heranzuziehen. Abbildung 6-13 zeigt die Eingriffspunkte in den unterschiedlichen Automationsgraden. Da eine große Anzahl an Versuchspersonen in diesem Szenario nicht reagierte, besteht die Stichprobengröße aus nur neun Probanden.

Es ergibt sich ein Haupteffekt des Faktors Automationsgrad ($F_{AG}(3, 24) = 10.484, p < .001, \eta^2 = .63$). Post-Hoc-Tests zeigen keinen Unterschied in den Eingriffspunkten der manuellen gegenüber der assistierten Fahrt ($p > .999$). Die beiden automatisierten Varianten hingegen weisen im Vergleich zur manuellen Fahrt signifikant spätere Eingriffe auf (mH: $p = .001$, oH: $p = .001$). In diesen Fahrmodi greifen die betrachteten neun Versuchspersonen im Mittel sogar erst nach Passieren des Verkehrszeichens ein. Gegenüber der assistierten Fahrt ist kein (mH: $p = .397$) bzw. nur ein tendenzieller (oH: $p = .097$) Unterschied zu verzeichnen. Ob die Hände am Lenkrad gehalten wurden oder nicht, hat keinen signifikanten Einfluss ($p > .999$). Tendenziell zeigen die Ergebnisse, dass sich im Szenario „VZ“ mit zunehmendem Automationsgrad nicht nur die Gesamtanzahl ausbleibender Reaktionen erhöht, sondern sich auch der Eingriffspunkt nach hinten verschiebt, d. h. die Reaktionszeit verlängert.

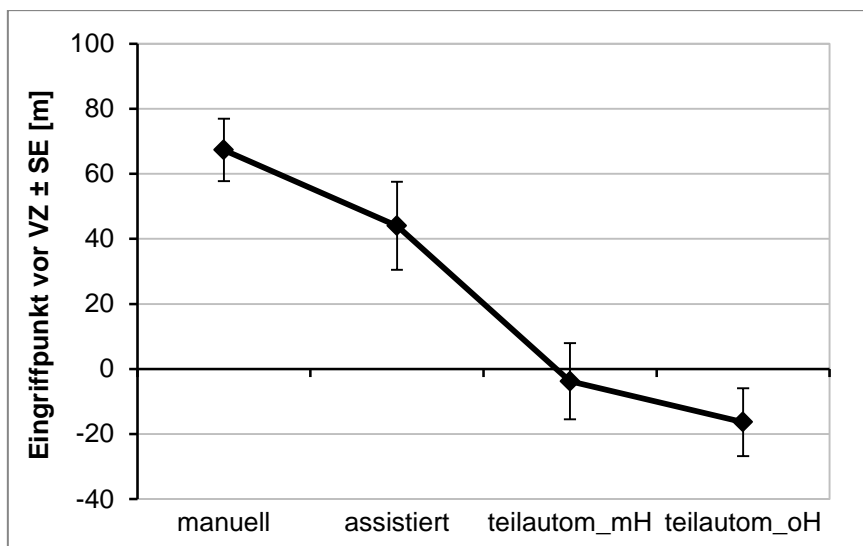


Abbildung 6-13: Reaktionspunkt bei Szenario „VZ“ in Abhängigkeit vom Automationsgrad. Eingriffszeitpunkt in Meter vor (positiv) bzw. hinter (negativ) dem Verkehrszeichen. Mittelwerte der Probanden, die in allen Automationsgraden reagiert haben ($N = 9$).

Aufgrund der Auflösung des Blickerfassungssystems und der Simulationsdarstellung kann in diesem Szenario jedoch nicht genau festgelegt werden, wann der erste Blick auf das Verkehrszeichen erfolgte. Damit ist, wie oben bereits erwähnt, nicht eindeutig zu klären, ob die Reaktionszeitverlängerung auf eine verspätete Informationsaufnahme oder eine verlangsamte Informationsverarbeitung zurückzuführen ist. In den Szenarien „FZG“ und „WS“ konnte dieser Umstand berücksichtigt werden. Die im Folgenden dargestellten Zeiten beziehen sich auf die Zeitspanne vom ersten Blick auf das Kollisionsobjekt (Fahrzeug bzw. Wildschwein) bis zum Beginn der erfolgten Reaktion. Da laut Stanczyk & Jurecki (2008) die Reaktionszeit in Unfallsituationen stark von der verbleibenden „Risikozeit“ (äquivalent zur Time to Collision) abhängt, enthalten die folgenden Abbildungen zusätzlich zur Reaktionszeit (rechts) auch die verbleibende Zeit bis zur potenziellen Kollision (links). Auch für die Risikozeit liegt der Bezugspunkt der Messung auf dem Zeitpunkt der ersten Blickzuwendung zum relevanten Kollisionsobjekt. Im Falle des bremsenden Fahrzeuges war die Entwicklung der Situation aufgrund der aufleuchtenden Bremslichter bereits eindeutig identifizierbar.

Abbildung 6-14 zeigt sowohl die Risikozeit wie auch die Reaktionszeit im Szenario „FZG“ in Abhängigkeit vom Automationsgrad. Für diese Auswertung konnten 18 Probanden herangezogen werden, die in allen Automationsgraden eine Reaktion zeigten.

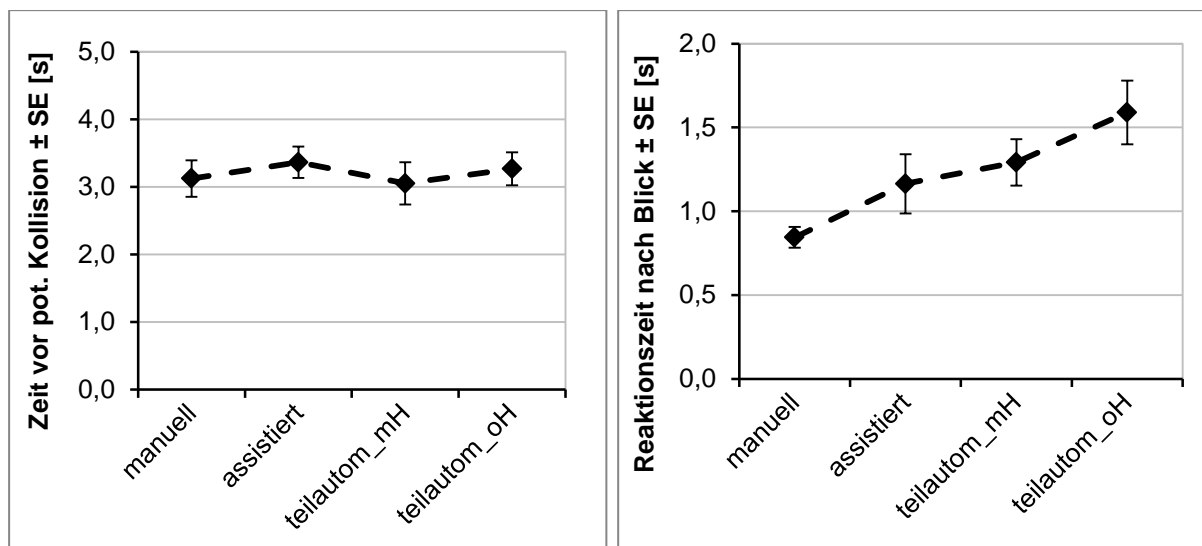


Abbildung 6-14: Verbleibende Zeit bis zur potenziellen Kollision (Risikozeit, links) und Reaktionszeit (rechts) im Szenario „FZG“ in Abhängigkeit vom Automationsgrad. Startpunkt der Zeitmessung war der erste Blick auf das Kollisionsobjekt „Fahrzeug“ bei erkennbaren Bremslichtern (N = 18).

Hinsichtlich der Risikozeit weist der Faktor Automationsgrad keinen signifikanten Haupteffekt auf ($F_{AG}(3, 51) = .325, p = .807, \eta^2 = .02$), d. h. zum Zeitpunkt des ersten Blicks auf das Kollisionsobjekt waren die Probanden in allen Automationsgraden ähnlich weit von der potenziellen Kollision entfernt. Im Durchschnitt blieben den Probanden etwas mehr als 3 Sekunden Zeit. Die erlebte Dringlichkeit der Situation war demnach in allen Automationsgraden vergleichbar und hat keinen Einfluss auf die Reaktionszeit. Der Faktor „Automationsgrad“ hingegen weist einen Haupteffekt ($F_{AG}(2.205, 37.489) = 4.053, p = .022, \eta^2 = .20$) auf. Mit zunehmender Automatisierung verlängert sich die benötigte Reaktionszeit. Post-Hoc-Tests weisen ausgehend von der manuellen Fahrt keinen nachweisbaren Unterschied zur assistierten Fahrt auf ($p = .582$). Die automatisierten Varianten zeigen hingegen tendenziell längere Reaktionszeiten mit Händen am Lenkrad ($p = .064$) bis hin zu signifikant längeren Reaktionszeiten ohne Hände am Lenkrad ($p = .005$). Die assistierte Fahrt unterscheidet sich von keiner der beiden automatisierten Fahrten nachweisbar (mH: $p > .999$, oH: $p = .913$). Auch aus der Bedingung, ob die Hände am Lenkrad gehalten werden müssen oder nicht, ergibt sich keinen signifikanten Einfluss ($p > .999$).

Wie Abbildung 6-15 zeigt, ergibt sich für das Szenario „WS“ ein sehr ähnliches Bild. Für diese Auswertung konnten 13 Probanden herangezogen werden, die in allen Automationsgraden eine Reaktion zeigten.

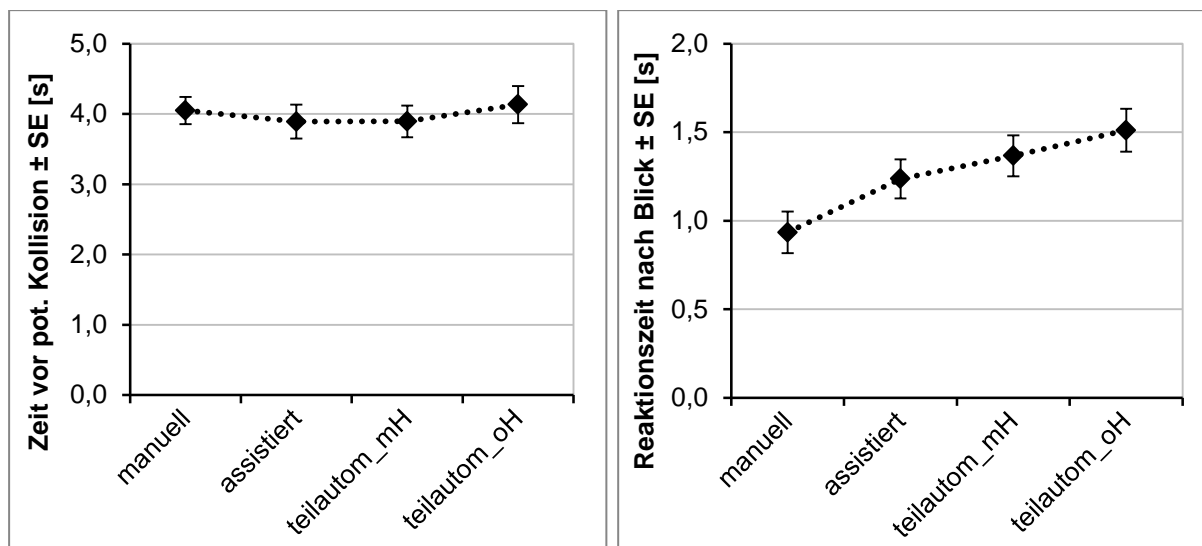


Abbildung 6-15: Verbleibende Zeit bis zur potenziellen Kollision (Risikozeit, links) und Reaktionszeit (rechts) im Szenario „WS“ in Abhängigkeit vom Automationsgrad. Startpunkt der Zeitmessung war der erste Blick auf das Kollisionsobjekt „Wildschwein“ (N=13).

Analog zum Szenario „FZG“ ergibt sich auch hier kein Haupteffekt des Faktors Automationsgrad ($F_{AG}(3, 36) = .246, p = .863, \eta^2 = .02$). Der erste Blick auf das Kollisionsobjekt Wildschwein erfolgte in diesem Szenario, unabhängig vom Automationsgrad, durchschnittlich ca. 4 Sekunden vor dem potenziellen Zusammenstoß. Eine Beeinflussung der Reaktionszeit durch unterschiedliche Risikozeiten ist auszuschließen. Die statistische Auswertung der Reaktionszeiten ergibt einen Haupteffekt des Faktors Automationsgrad ($F_{AG}(3, 36) = 5.767, p = .003, \eta^2 = .35$). Auch in diesem Szenario verlängert sich die Zeit für die Informationsverarbeitung mit zunehmendem Automationsgrad. Post-Hoc-Tests zeigen signifikante Unterschiede zwischen der manuellen Fahrt und der automatisierten Fahrt ohne Hände am Lenkrad ($p = .022$). Die assistierte Fahrt ($p = .469$) und die automatisierte Fahrt mit Händen am Lenkrad ($p = .130$) unterscheiden sich hingegen nicht nachweislich von der manuellen Bedingung. Eine paarweise Gegenüberstellung der assistierten und der beiden automatisierten Varianten zeigt weiterhin, dass auch hier nur die Variante ohne Hände am Lenkrad signifikant längere Reaktionszeiten aufweist (mH: $p > .999$, oH: $p = .034$). Die Hands-On Bedingung wirkt sich nicht nachweisbar auf die Reaktionszeit aus ($p > .999$).

Sowohl im Szenario „FZG“ wie auch im Szenario „WS“ zeigen sich hinsichtlich der Automationsgrade keine Unterschiede in den Zeitpunkten der Wahrnehmung der kritischen Situation. Der nachgeschaltete Prozess der Informationsverarbeitung hingegen ist abhängig vom Automationsgrad. Die gefundenen Haupteffekte lassen den Schluss zu, dass die Informationsverarbeitung in höheren Automationsgraden langsamer verläuft, d. h. die Dauer von der Wahrnehmung bis zur Reaktionsumsetzung



länger ist. Dies ist auf ein fehlendes oder unvollständiges Situationsbewusstsein zurückzuführen, dessen Aufbau eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. Erst im Anschluss daran kann eine Reaktion erfolgen. In höheren Automationsgraden fällt dieser Mangel an Situationsbewusstsein aufgrund der stärkeren Entbindung von der Fahraufgabe stärker ins Gewicht, was die Zunahme der Reaktionszeit erklärt.

6.1.3.5 Workload

Die subjektiv empfundene Beanspruchung der Probanden wurde im Anschluss an jede einzelne Messfahrt mithilfe eines NASA-TLX-Fragebogens aufgenommen. Es war davon auszugehen, dass die Probanden zu diesem Zeitpunkt nicht mehr in der Lage waren ihre Bewertung zwischen Abschnitten mit und ohne Nebenaufgabenbearbeitung zu differenzieren. Die ermittelten und in Abbildung 6-16 dargestellten Werte für den ungewichteten NASA-TLX beziehen sich demnach auf die Bewertung der Beanspruchung während der kompletten Messfahrt.

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt. Es ergibt sich ein Haupteffekt des Faktors „Automationsgrad“ ($F_{AG}(2.117, 50.072) = 24.807, p < .001, \eta^2 = .52$).

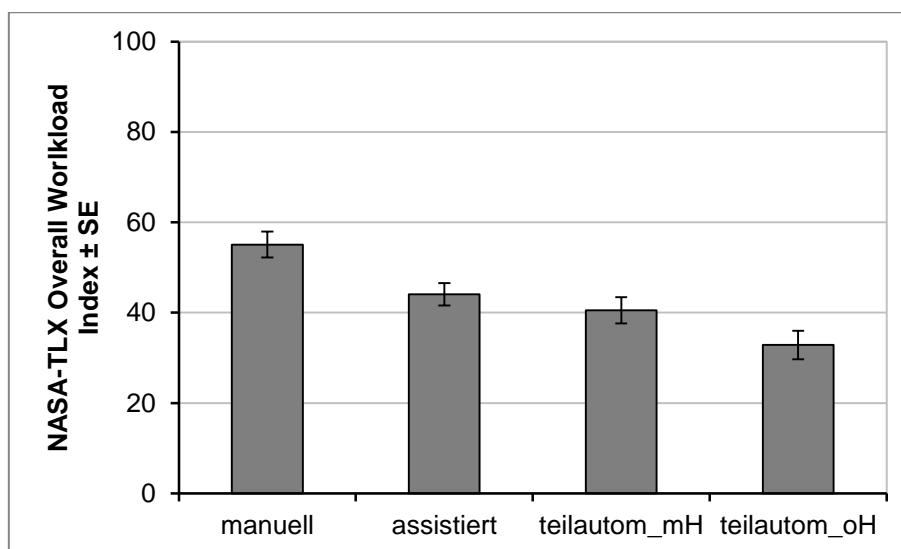


Abbildung 6-16: Ungewichteter NASA-TLX in Abhängigkeit vom Automationsgrad. Bewertung der gesamten Fahrt mit/ohne Nebenaufgabenbearbeitung ($N = 24$).

Die paarweisen Einzelvergleiche zeigen, dass die manuelle Fahrt verglichen mit der assistierten Fahrt ($p < .001$) und den beiden automatisierten Varianten (mH: $p = .001$, oH: $p < .001$) signifikant höhere Beanspruchungswerte aufweist, da hier der Fahrer am intensivsten in die Fahraufgabe eingebunden ist. Ein Vergleich der Assistenz mit der Automation weist keine Unterschiede auf, wenn die Probanden die Hände am



Lenkrad halten müssen ($p = .656$). Erst durch den Wegfall des Hands-On-Zwanges sinkt die Beanspruchung nachweisbar. Die automatisierte Variante ohne Hände am Lenkrad weist signifikant geringere Beanspruchungswerte auf als sowohl die assistierte ($p = .002$) wie auch die automatisierte Fahrt mit Händen am Lenkrad ($p = .005$). Die sinkende Beanspruchung ist ein Indiz dafür, dass sich die Probanden noch weiter aus der Fahraufgabe zurückziehen, wenn die motorische Einbindung entfällt.

6.1.3.6 Blinzelfrequenz und Scanningverhalten

Neben der subjektiven Selbsteinschätzung anhand des NASA-TLX-Fragebogens wurde auch die Blinzelfrequenz der Probanden zur Beurteilung der mentalen Beanspruchung herangezogen. Die Datenanalyse beschränkt sich dabei auf die Streckenteile ohne Nebenaufgabenbearbeitung, d. h. die Single-Task-Situationen. Die bisher dargestellten Ergebnisse der Blickdatenauswertung zeigten, dass in den Abschnitten mit Nebenaufgabe bei zunehmendem Automationsgrad zumindest ein Teil der frei werdenden Ressourcen in die Aufgabenbearbeitung investiert wurde. Die Frage, ob und in welchem Maß die zunehmende Automation den Fahrer entlastet, ist daher in diesen Abschnitten nur schwer zu beantworten.

Laut Cain (2007) kann die Blinzelfrequenz als Indikator für die Beanspruchung dienen. Dabei ist jedoch zu unterscheiden, welche Charakteristik die Aufgabe aufweist (vgl. auch Recarte et al. 2008). Bei der Verarbeitung visueller Reize führt ein verringerter Workload zu einer Zunahme der Blinzelfrequenz (Fogarty & Stern 1989). Bei rein kognitiven Aufgaben, wie z. B. Kopfrechnen, führt ein verringerter Workload zu einer Steigerung der Blinzelfrequenz (Wilson 2004). Stern et al. (1994) weisen darüber hinaus nach, dass die Blinzelfrequenz mit zunehmender Müdigkeit ansteigt. Aufgrund der Vielzahl miteinander interferierender Abhängigkeiten ist eine eindeutige Aussage ohne den Kontext der Aufgabencharakteristik daher nur schwer möglich (Castor 2003). Im vorliegenden Fall stellt die Fahrzeugführung die Aufgabe dar. Diese ist laut Rockwell (1971) zu 90 % visueller Natur. Der Einfluss der Müdigkeit wurde durch die Permutation der Reihenfolge der Automationsgrade über die Versuchsbedingungen ausbalanciert. Darüber hinaus wurde den Probanden während der Versuchsdurchführung ausreichend Erholungszeit zur Verfügung gestellt. Die ermittelten Werte für die Blinzelfrequenz sind daher zum einen unabhängig von eventuellen Müdigkeitseffekten, zum anderen muss bei der Interpretation der Daten von einer stark visuell geprägten Aufgabe ausgegangen werden. Abbildung 6-17 zeigt den Verlauf der Blinzelfrequenz in Abhängigkeit vom Automationsgrad.

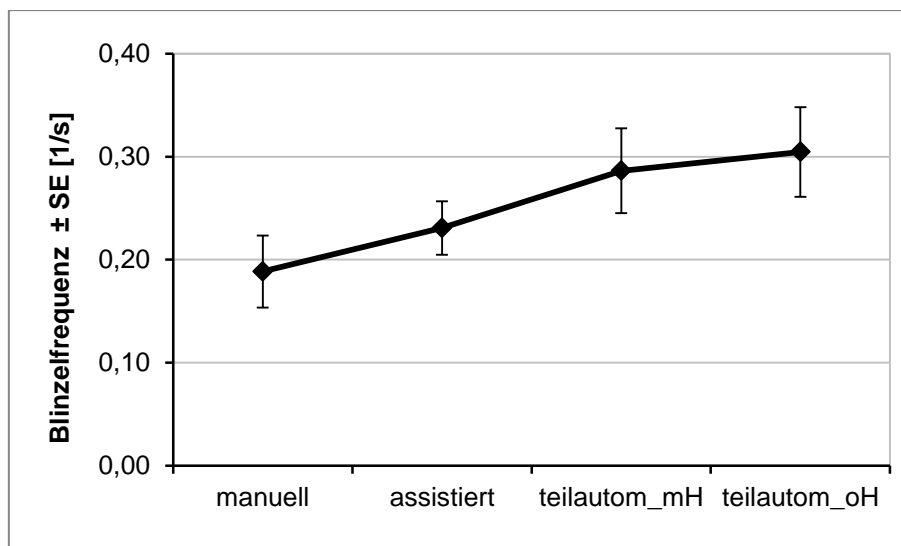


Abbildung 6-17: Blinzelfrequenz als Maß für die Beanspruchung durch die visuelle Aufgabe „Fahrzeugführung“. Darstellung in Abhängigkeit vom Automationsgrad. Berücksichtigt sind nur Abschnitte ohne Nebenaufgabenbearbeitung (N = 24).

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt. Für die Blinzelfrequenz ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors „Automationsgrad“ ($F_{AG}(3, 69.000) = 4.397, p = .007, \eta^2 = .16$), d. h. mit zunehmendem Automationsgrad nimmt auch die Blinzelfrequenz zu. Verglichen mit der manuellen Fahrt lässt sich dieser Zuwachs nur in den beiden automatisierten Varianten (mH: $p = .011$, oH: $p = .043$), nicht jedoch in der assistierten Fahrt ($p = .878$) nachweisen. Letztere zeigt wiederum keinen signifikanten Unterschied zu den beiden automatisierten Fahrten (mH: $p = .611$, oH: $p = .545$). Auch ein Einfluss der Hands-On Bedingung ist nicht zu belegen ($p > .999$). Ausgehend von den postulierten Annahmen, dass es sich bei der Fahrzeugführung um eine primär visuelle Tätigkeit handelt und der Einfluss der Müdigkeit in diesem Versuch vernachlässigt werden kann, ist davon auszugehen, dass die steigende Blinzelfrequenz auf eine Entlastung von der Aufgabe schließen lässt. Dementsprechend bestätigen die Ergebnisse das subjektive NASA-TLX-Rating der Probanden, dass mit zunehmendem Automationsgrad die Beanspruchung durch die Fahraufgabe sinkt.

Zusätzlich zu den subjektiven und objektiven Maßen für die mentale Beanspruchung wurde das Scanningverhalten der Probanden in den unterschiedlichen Automationsgraden betrachtet. Wie bei der Blinzelfrequenz beschränkt sich diese Analyse auf die Streckenabschnitte ohne Nebenaufgabenbearbeitung, also auf die Single-Task-Situation mit reiner Fahrzeugführung. Abbildung 6-18 zeigt die Streuung der Blicke in horizontaler Richtung abhängig vom Automationsgrad. Diese ist ein Maß dafür, wie groß der von den Probanden abgescannte Bereich ist.

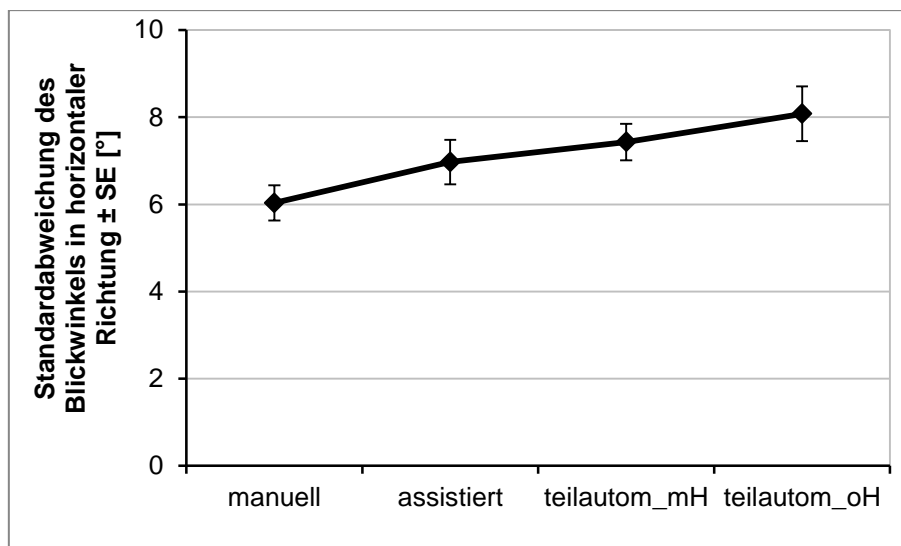


Abbildung 6-18: Standardabweichung des Blickwinkels in horizontaler Richtung in Abhängigkeit vom Automationsgrad. Maß für die Größe des abgescannten Bereiches. Berücksichtigt sind nur Abschnitte ohne Nebenaufgabenbearbeitung ($N = 24$).

Eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen ergibt einen Haupteffekt des Faktors Automationsgrad ($F_{AG}(2.219, 51.037) = 6.362, p = .003, \eta^2 = .22$). Mit zunehmender Entbindung von der Fahraufgabe vergrößert sich der abgescannte Winkelbereich. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt. Diese zeigen, dass in der manuellen Fahrt ein signifikant geringerer Winkelbereich abgescannt wird als in den beiden automatisierten Varianten (mH: $p < .001$, oH: $p = .006$). Gegenüber der assistierten Fahrt ergibt sich kein signifikanter Unterschied ($p = .325$). Ebenso wenig unterscheidet sich die assistierte Fahrt von den beiden automatisierten Varianten (mH: $p > .999$, oH: $p = .172$). Auch ein Effekt der motorischen Einbindung durch „Hands-On“ ist in den automatisierten Modi nicht nachzuweisen ($p > .999$).

Die Zunahme des Winkelbereiches, der von den Probanden abgescannt wird, ist darauf zurückzuführen, dass die Probanden in höheren Automationsgraden weniger konzentriert auf die zentrale Straßenführung blicken. Es werden vermehrt auch periphere Objekte angeblickt, wie z. B. nicht relevante Verkehrsschilder, Bäume oder passierender Verkehr. Ein ähnlicher Effekt zeigt sich beim Vergleich von Fahranfängern mit erfahrenen Fahrern (vgl. Mayhew & Simpson 1996, Drummond 1989). Letztere werden von der Fahrzeugführung selbst weniger beansprucht und nutzen die frei gewordenen Ressourcen zur umfassenderen Beobachtung der Umgebung.

6.1.4 Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion

Die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zeigen deutlich, dass sich im Rahmen des beschriebenen Versuches eine Steigerung des Automationsgrades auf das Fahrerverhalten auswirkt. Bei einem Großteil der betrachteten, abhängigen Variablen



kann die Alternativhypothese angenommen werden (Tabelle 6-9). Insbesondere bezüglich des Umgangs mit der Nebenaufgabe zeigen sich deutliche Änderungen in der Interaktionsstrategie. Diese wurden in ähnlicher Form auch in den beschriebenen Untersuchungen von Carsten et al. (2012) und Merat et al. (2012) nachgewiesen.

Tabelle 6-9 Teil 1: Zusammenfassung der Hypothesenüberprüfung. Kreuz: Hypothese muss verworfen werden. Haken: Hypothese muss angenommen werden.

Hypothesen – Blickverhalten		Tacho	CID	Szenerie	
AG	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst die Frequenz, mit der Informationen aus den unterschiedlichen Areas of Interest (AOI) abgerufen werden, nicht.	✗	✗	✗
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst die Frequenz, mit der Informationen aus den AOI abgerufen werden.	✓	✓	✓
	H ₀	Die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI ändert sich mit zunehmendem Automationsgrad nicht.	✗	✗	✗
	H ₁	Mit zunehmendem Automationsgrad ändert sich die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI.	✓	✓	✓
	H ₀	Die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit ändert sich mit zunehmendem Automationsgrad nicht.		✗	
	H ₁	Mit zunehmendem Automationsgrad steigt die visuelle Aufmerksamkeit auf die Nebenaufgabe.		✓	
GW	H ₀	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Frequenz, mit der Informationen aus den unterschiedlichen Areas of Interest (AOI) abgerufen werden, nicht.	✗	✓	✗
	H ₁	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Frequenz, mit der Informationen aus den AOI abgerufen werden.	✓	✗	✓
	H ₀	Die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI ändert sich durch vorhandene Geschwindigkeitswechsel nicht.	✗	✓	✓
	H ₁	Die Dauer der Blicke auf die einzelnen AOI ändert sich durch vorhandene Geschwindigkeitswechsel.	✓	✗	✗
	H ₀	Die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit ändert sich mit vorhandenen Geschwindigkeitswechseln nicht.		✗	
	H ₁	Die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit ändert sich mit vorhandenen Geschwindigkeitswechseln.		✓	



Tabelle 6-9 Teil 2: Zusammenfassung der Hypothesenüberprüfung. Kreuz: Hypothese muss verworfen werden. Haken: Hypothese muss angenommen werden.

Hypothesen – Nebenaufgabenbearbeitung			
AG	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst die Leistung in der Nebenaufgabe nicht.	
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst die Leistung in der Nebenaufgabe.	
GW	H ₀	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Leistung in der Nebenaufgabe nicht.	
	H ₁	Vorhandene Geschwindigkeitswechsel beeinflussen die Leistung in der Nebenaufgabe.	
Hypothesen - Fahrerreaktionen			
AG	H ₀	Die Anzahl der Probanden, die bei Systemfehlern bzw. kritischen Situationen nicht oder zu spät reagieren, wird vom Automationsgrad nicht beeinflusst.	
	H ₁	Die Anzahl der Probanden, die bei Systemfehlern bzw. kritischen Situationen nicht oder zu spät reagieren, wird vom Automationsgrad beeinflusst.	
	H ₀	Die Reaktionszeit auf Systemausfälle bzw. kritische Situationen bleibt vom Automationsgrad unbeeinflusst.	
	H ₁	Die Reaktionszeit auf Systemausfälle bzw. kritische Situationen wird vom Automationsgrad beeinflusst.	
Hypothesen – Workload			
AG	H ₀	Die Bewertung der Beanspruchung ist unabhängig vom Automationsgrad.	
	H ₁	Die Bewertung der Beanspruchung ist abhängig vom Automationsgrad.	
	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst das Blinzerverhalten nicht.	
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst das Blinzerverhalten.	
	H ₀	Der Automationsgrad beeinflusst das Scanningverhalten der Probanden nicht.	
	H ₁	Der Automationsgrad beeinflusst das Scanningverhalten.	



Je mehr die Probanden durch Assistenz bzw. Automation von der Fahraufgabe entlastet werden, desto mehr Aufmerksamkeit weisen sie der Nebenaufgabe zu. Dies äußert sich insbesondere in einer steigenden mittleren Dauer der Einzelblicke auf das CID. Daraus ergibt sich in höheren Automationsgraden eine steigende Erkennungsleistung bei der Detektionsaufgabe. Die Aufmerksamkeitsverschiebung hin zur Nebenaufgabe ereignet sich auf Kosten der für die Fahraufgabe wichtigeren AOI „Tacho“ und „Szenerie“. Die Beobachtungsleistung in diesen Bereichen geht zurück, d. h. die Auffrischung von Informationen aus der Umwelt bzw. deren Abgleich mit den Fahrzeugdaten (Tacho) wird vernachlässigt. Besonders schwerwiegend ist an dieser Stelle die Abnahme der Frequenz, mit der Informationen aus der Umgebung aktualisiert werden. Entsprechend der aufgeführten Modelle der Informationsverarbeitung ist anzunehmen, dass sich dadurch die mentale Repräsentation der Umgebung und damit das Situationsbewusstsein deutlich verschlechtert. Diese Annahme wird durch das schlechtere Eingriffsverhalten der Fahrer bei den auftretenden kritischen Situationen bestätigt. Nicht nur die absolute Zahl fehlender bzw. verspäteter Reaktionen erhöht sich. Es ist auch ein deutlicher Anstieg der Reaktionszeiten festzustellen. Wie im Kapitel 3.5 aufgeführt, gibt es zwei Mechanismen, die dieser Reaktionsverschlechterung zugrunde liegen. Die zunehmende Ablenkung durch die Nebenaufgabe führt dazu, dass einige Probanden die kritische Situation nicht oder erst viel zu spät wahrnehmen, wodurch die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion verringert wird. In der Theorie des Situationsbewusstseins nach Endsley entspricht dies der ersten Ebene. Durch die Auswertung der Reaktionszeiten in den Unfallszenarien kann darüber hinaus gezeigt werden, dass die für die Informationsverarbeitung benötigte Zeit in höheren Automationsgraden ansteigt. Die Dauer von der Wahrnehmung der Situation bis zur Reaktion verlängert sich mit zunehmendem Automationsgrad, d. h. die Probanden benötigen mehr Zeit, die wahrgenommene Situation zu verstehen. Da sie durch höhere Automationsgrade in verstärktem Maße aus der Fahraufgabe herausgenommen wurden, verfügten sie über ein zunehmend defizitäres mentales Modell der Umgebung. Um dieses Modell auf den aktuellen Stand zu bringen ist entsprechend mehr Zeit notwendig. In der Theorie des Situationsbewusstseins nach Endsley ist dieser Vorgang auf der zweiten bzw. dritten Ebene anzusiedeln.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch auch die Umgebung der Versuchsdurchführung berücksichtigt werden. Es ist anzunehmen, dass sich in der Realität die Aufmerksamkeit nicht in gleichem Maße auf die Nebenaufgabe verlagert. Im vorgestellten Versuch lag bereits bei der manuellen Fahrt eine erhebliche Zuwendung zur Nebenaufgabe vor. Unter dem Einfluss realer Gefahrenquellen ist es schwer vorstellbar, dass eine ähnlich starke Abkehr von der Fahraufgabe stattfindet. Auch wenn eine hundertprozentige Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Realität daher nicht möglich ist, wird dennoch davon ausgegangen, dass auch in der



Realität eine starke Verschiebung hin zur Nebenaufgabe stattfindet, auch wenn das Grundniveau der Ablenkung wesentlich geringer ist.

Ein wichtiger Aspekt der dargestellten Ergebnisse ist, dass sich die Hands-On Bedingung bei der automatisierten Fahrt auf fast keine der abhängigen Variablen auswirkt. Die direkten Vergleiche der teilautomatisierten Fahrt mit und ohne Hände am Lenkrad weisen nur in sehr wenigen Fällen Unterschiede auf. In einem automatisierten Fahrzeug spielt es demnach unter Umständen kaum eine Rolle, ob der Fahrer motorisch eingebunden ist. Es hat den Anschein, als wären die in der Überlandfahrt aufgetretenen Lenkbewegungen zu gering, um dem Fahrer über die motorische Einbindung weitreichende Informationen über den Fahrzeugzustand zu vermitteln. Weiterhin ist vermutlich die Handhaltung der Probanden in den automatisierten Fahrten ein Grund für die ähnlichen Ergebnisse. In der Variante mit Händen am Lenkrad wurden die Probanden zwar dazu instruiert, die Hände am Lenkrad zu halten, es wurde jedoch nicht definiert, in welcher Stellung. Folglich nahmen die meisten Probanden eine Handhaltung ein, die ihnen ein möglichst bequemes Sitzen ermöglichte. Als Resultat befanden sich die Hände sehr weit unten am Lenkrad, wohingegen die Hände in der Hands-Off-Variante auf dem Schoß lagen. Hinsichtlich der Reaktionszeit beim Lenken ergeben sich dadurch ähnliche Bewegungszeiten, um die Hände in eine adäquate Fahrstellung (drei und neun Uhr) zu bringen. Nichtsdestotrotz zeichnet sich bei der Gegenüberstellung von manuellen und automatisierten Fahrten ein etwas anderes Bild. Hier gibt die Hands-On Bedingung des Öfteren den Ausschlag, ob ein Unterschied statistisch nachweisbar ist oder nicht. Auch die grafischen Darstellungen zeigen wiederholt den Trend zu einem Leistungsabfall aufgrund der motorischen Entkopplung des Fahrers von der Fahraufgabe. Die Probanden scheinen demnach durch den Hands-On-Zwang geringfügig besser in die Fahraufgabe eingebunden zu sein und über eine bessere Reaktionsfähigkeit zu verfügen, auch wenn dies im direkten Vergleich nicht nachgewiesen werden kann.

Bei Betrachtung der einzelnen Szenarien fällt generell auf, dass insbesondere im Fall des übersehenen Verkehrszeichens bei sehr vielen Probanden eine Reaktion ausbleibt, wohingegen in den Unfallsituationen in allen Automationsgraden eine überwiegende Mehrheit reagiert. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen kann es daran liegen, dass die Probanden entweder das Verkehrszeichen oder die ausbleibende Fahrzeugreaktion nicht wahrgenommen haben, ihr Situationsbewusstsein also mangelhaft war, zum anderen ist der Geschwindigkeitswechsel von 100 km/h auf 80 km/h relativ gering und ein Nichtbeachten hätte im realen Straßenverkehr nur eine Geldstrafe zur Folge (BMVBS 2012). Es liegt durchaus im Bereich des Möglichen, dass einige Probanden solche Geschwindigkeitsdifferenzen und die damit verbundenen Risiken auch im realen Leben bewusst akzeptieren, um schneller ans Ziel zu kommen. In diesem Fall kommt auch eine vorsätzliche Entscheidung für die Geschwindigkeitsübertretung als Ursache für die ausbleibende Reaktion infrage.



Die Tatsache, dass in den dringlicheren und kritischeren Szenarien „FZG“ und „WS“ deutlich mehr Probanden eingreifen, spricht für diese Erklärung. Auch der Einfluss des Faktors Geschwindigkeitswechsel ist ein Indiz für eine bewusste Entscheidung mancher Probanden nicht einzugreifen. In den Streckenabschnitten mit notwendigen Geschwindigkeitswechseln nehmen sowohl die mittlere Verweildauer als auch die Blickfrequenz auf den Tacho zu. Die Probanden sind sich also generell der Tatsache bewusst, dass sie die Fahrzeugaktionen überwachen müssen, und erhöhen daher ihre Aufmerksamkeitszuwendung zur AOI „Tacho“. Nichtsdestotrotz nimmt die Aufmerksamkeitszuwendung zum Tacho ebenso wie zur Fahrszene mit zunehmendem Automationsgrad ab. Dies kann als steigendes Automationsvertrauen und daraus resultierender Rückzug von der Fahraufgabe interpretiert werden.

Wie andere Versuche mit dem speziellen Szenario eines nicht erkannten Verkehrszeichens zeigen (Damböck 2012, Weißgerber 2012), tritt dieser Effekt wiederholt auf. Werden die relevanten Informationen (Tacho, Verkehrszeichen) nicht angeblickt, ist die Ursachenfindung relativ einfach. Was nicht gesehen wurde, kann bei der Entscheidungsfindung keine Rolle spielen. Ebenso simpel ist die Beurteilung bei einer erfolgten Reaktion, da hier der Prozess der Informationsverarbeitung offensichtlich erfolgreich durchlaufen wurde. Treten jedoch keine Reaktionen auf, obwohl die relevanten Informationen angeblickt wurden, ist es ungleich schwieriger, den Grund dafür festzulegen. Aus den Messdaten können nur die wahrgenommene Information und die daraus resultierende Reaktion bestimmt werden. Eine Aussage, ob eine ausbleibende Reaktion auf eine bewusste Entscheidung oder ein defizitäres Situationsbewusstsein zurückzuführen ist, ist hingegen nur sehr schwer möglich. Um diese Lücke zu schließen, müssen die Probanden in geeigneter Weise zu ihrem Entscheidungsprozess befragt werden. Leider existiert dazu noch keine funktionierende Methodik. Bestehende Befragungstechniken wie SAGAT oder SART sind dabei im Fahrzeugkontext nur bedingt einsetzbar (Rauch 2009, Rauch et al. 2010).

Bezüglich der Gesamtbeanspruchung der Fahrer, zusammengesetzt aus Fahr- und Nebenaufgabe, wirkt sich eine Unterstützung in der Fahraufgabe positiv aus. Das NASA-TLX-Rating sowie eine Betrachtung der Blinzelfrequenz zeigen hier signifikante Verbesserungen mit zunehmendem Automationsgrad. Neben dem eigentlichen Untersuchungsschwerpunkt, wie sich unterschiedliche Automationsgrade auf das Fahrerverhalten auswirken, konnte auch nachgewiesen werden, dass sich das Scanningverhalten in höheren Automationsgraden ändert. Möglicherweise kann diese Messgröße sowie das Blinzel- und Blickverhalten zusammen mit anderen Daten zukünftig zur Online-Beurteilung der Fahrer Verfügbarkeit genutzt werden.

Zusammenfassend führen höhere Automationsgrade also zu einer sinkenden Fahrerbeanspruchung auch in Kombination mit einer Nebenaufgabe. Ein komfortablerer Fahrer Arbeitsplatz ist die Folge. Andererseits besteht jedoch die Gefahr, dass sich



die Fahrer zu sehr von der Fahraufgabe abwenden und dadurch kritische Situationen übersehen oder sie nicht erkennen und dementsprechend nicht in der Lage sind adäquat und rechtzeitig zu reagieren. Das bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass eine zunehmende Automation zu mehr Unfällen führen muss, sondern bezieht sich auf die Wahrnehmungs- und Verhaltensleistung des Menschen in einzelnen Problemsituationen. Eventuelle Unzulänglichkeiten in diesen Einzelsituationen können durch die Automation in anderen Konstellationen, die die rein menschliche Leistungsfähigkeit überschreiten (z. B. Notbremsen Ausweichmanöver), mehr als kompensiert werden. Gasser (2012) visualisiert dieses Phänomen anhand zweier ineinander greifender Kreise (Abbildung 6-19).

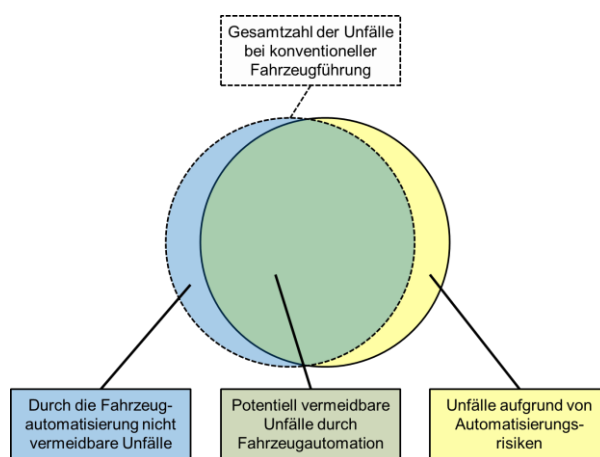


Abbildung 6-19: Wirkung der Fahrzeugautomatisierung im Hinblick auf die potenzielle Entwicklung von Unfallzahlen (Gasser 2012).

Demnach hat eine zunehmende Fahrzeugautomatisierung erhebliches Potenzial, die Unfallzahlen gegenüber der konventionellen Fahrzeugführung zu reduzieren. Gleichzeitig besteht die Gefahr vereinzelter Unfälle aufgrund von Automationseffekten. Insgesamt jedoch ist anzunehmen, dass die Anzahl vermiedener und/oder abgemilderter Unfälle die möglichen Gefahren mehr als übertreffen, da im Sinne einer Parallelschaltung der Fähigkeiten von Mensch und Automation die Gesamtleistung steigt. Nichtsdestotrotz muss man sich der Risiken zunehmender Automatisierung wie beispielsweise einer verschlechterten Reaktionsfähigkeit in kritischen Situationen bewusst sein. Zwar besteht die Möglichkeit, dass die Auftrittswahrscheinlichkeit von Systemfehlern und Systemausfällen durch Fortschritte in der Sensortechnik und eine redundante Systemgestaltung erheblich reduziert werden kann, Systemgrenzen stellen aber auch in naher bis mittelfristiger Zukunft ein Problem dar. Besonders aufgrund der Limitierungen in der Reichweite der Umfeldwahrnehmung kann es hier jederzeit zu Situationen kommen, mit denen die Automation nicht situationsgerecht reagiert. Daher ist es von großer Bedeutung, das Verhalten der Fahrer in unterschiedlichen Automationsgraden zu kennen, um das komplexe System aus Fahrer, Fahrzeug und Automation verstehen und gestalten zu können.



Ein Hauptaugenmerk sollte dabei auf dem Übernahmeverhalten an Systemgrenzen liegen. Im folgenden Kapitel wird ein Versuch vorgestellt, der sich mit dieser Thematik beschäftigt und einen Ansatz verfolgt, die notwendigen Übernahmezeiten und die Vorgehensweise der Fahrer beim Übernahmeprozess zu identifizieren.

6.2 Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Autofahren

Diese Versuchsreihe geht der Fragestellung nach, welche Übernahmezeit einem Fahrer in unterschiedlichen Situationen zur Verfügung gestellt werden muss, damit er die Fahraufgabe rechtzeitig übernehmen kann. Ziel ist es, dem Fahrer die Möglichkeit zu geben, den Übernahmeprozess nicht nur objektiv erfolgreich, sondern auch subjektiv komfortabel gestalten zu können.

Die verwendete Methodik (Kap. 6.2.1) basiert auf den in Kapitel 4.3 formulierten Fragestellungen und Annahmen. Die statistisch überprüfbaren Hypothesen (Kap. 6.2.2), die sich aus diesen Annahmen ergeben, sind aus Zwecken der Übersichtlichkeit der Ergebnisdarstellung (Kap. 6.2.3) direkt vorangestellt und damit erst im Anschluss an die Darstellung der Methodik zu finden. Abschließend werden die aufgestellten Hypothesen den empirischen Daten gegenübergestellt und die Ergebnisse diskutiert (Kap. 6.2.4).

6.2.1 Methodik

6.2.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuch wurde im statischen Fahr Simulator des LfE durchgeführt. Zusätzlich zu der in Kapitel 5 beschriebenen Messtechnik wurde eine Hands-On-Erkennung am Lenkrad des Simulatorfahrzeuges umgesetzt, um die Zeit messen zu können, die die Probanden benötigen, um nach der Übernahmeaufforderung die Hände ans Lenkrad zu nehmen. Die Hands-On-Erkennung, das für den Versuch implementierte Automationssystem, die Szenarien, in denen eine Übernahme untersucht wurde, und die verwendete Nebenaufgabe werden im Folgenden aufgeführt und beschrieben.

Hands-On Erkennung

Eine Grundlage der Studie ist, dass die Probanden im Laufe des Versuches vollständig abgelenkt sein mussten. Teil dieser vollständigen Ablenkung war unter anderem auch, dass die Probanden beide Hände vom Lenkrad nehmen sollten. Entsprechend dieser Vorgabe ist die Zeit, die die Versuchspersonen benötigen, um bei der Übernahme die Hände wieder ans Lenkrad zu nehmen, eine relevante Untersuchungsvariable. Zur Messung dieser Zeitdauer wurde das Simulatormockup speziell erweitert. Das im LfE-Simulator verwendete Fahrzeug verfügt über ein beheizbares Lenkrad. Zur Hands-On-Messung wurden die Heizwicklungen dieses Lenkrades genutzt, um über Kapazitätsänderungen festzustellen, ob die Probanden die Hände am Lenkrad



hatten oder nicht. Die Werte für Hands-On/Hands-Off wurden zusammen mit den restlichen Daten der Fahrdynamik bzw. der Simulation ausgelesen und in einem gemeinsamen Log-File hinterlegt.

Automation

Bei der Automation der Fahraufgabe wurde auf eine am LfE vorhandene Funktion zurückgegriffen. Auf Basis dieser, im Rahmen des Projektes H-Mode entwickelten, generischen Automation wurde ein hochautomatisiertes System simuliert, das die Längs- wie auch die Querverführung innerhalb des aktuellen Fahrstreifens übernahm. Die Funktionalität umfasste dabei eine Regelung der Geschwindigkeit analog eines ACC-Systems mit zusätzlicher Erkennung und Berücksichtigung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit. In Querrichtung wurde ein Spurhalteassistent simuliert, die das Fahrzeug innerhalb des eigenen Fahrstreifens hielt. Die Führung erfolgte dabei mittenzentriert mit einem Lenkmoment mit V-förmig ansteigendem Betrag, d. h. das System griff korrigierend ein, sobald eine Abweichung des Fahrzeugschwerpunktes von der Fahrstreifenmitte auftrat. Die Verfügbarkeit des Systems wurde während der Fahrt über ein Symbol im Kombi-Instrument angezeigt. Das System konnte von den Probanden über eine Taste am Blinkerhebel eingeschaltet werden.

Um die Übernahmevorgänge speziell an Systemgrenzen untersuchen zu können, wurde eine fehler- und ausfallfreie Automation simuliert. Eine Übernahme durch den Fahrer wurde demnach nur aufgrund von Systemgrenzen angefordert. Als Systemgrenzen wurden der Wegfall von Fahrstreifenmarkierungen sowie notwendige Fahrstreifenwechsel (z. B. aufgrund einer sich verengenden Fahrbahn) definiert und implementiert. Auf die konkrete Gestaltung der Systemgrenzen in den Versuchsszenarien wird im Folgenden eingegangen. Die Automation war in der Lage, diese Grenzen zu erkennen und den Fahrer über ein akustisches Signal in Form eines Warnsignals auf die Notwendigkeit einer Übernahme hinzuweisen. Auch in dieser Hinsicht arbeitete das System fehlerfrei, es wurde jede Grenze erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert. Mit Ausgabe der Übernahmeaufforderung schaltete sich das System nicht ab, sondern regelte bis zum Erreichen der Systemgrenze bzw. bis zur erfolgten Übernahme weiter. Abbildung 6-20 zeigt beispielhaft den zeitlichen Ablauf eines Übernahmevorganges.

Wie in den weiter oben beschriebenen Versuchen wurde die Verfügbarkeit der Automationsunterstützung den Probanden auch hier über die Darstellung eines grauen Symbols im Tacho angezeigt (Abbildung 6-2). Die Aktivierung erfolgte wiederum durch die Probanden selbst über die Betätigung der „Check“-Taste am Blinkerhebel. Durch ein erneutes Drücken der „Check“-Taste, eine Betätigung der Bremse oder das Überdrücken eines von der Automation aufgebrauchten maximalen Lenkmomentes konnte das System abgeschaltet werden.

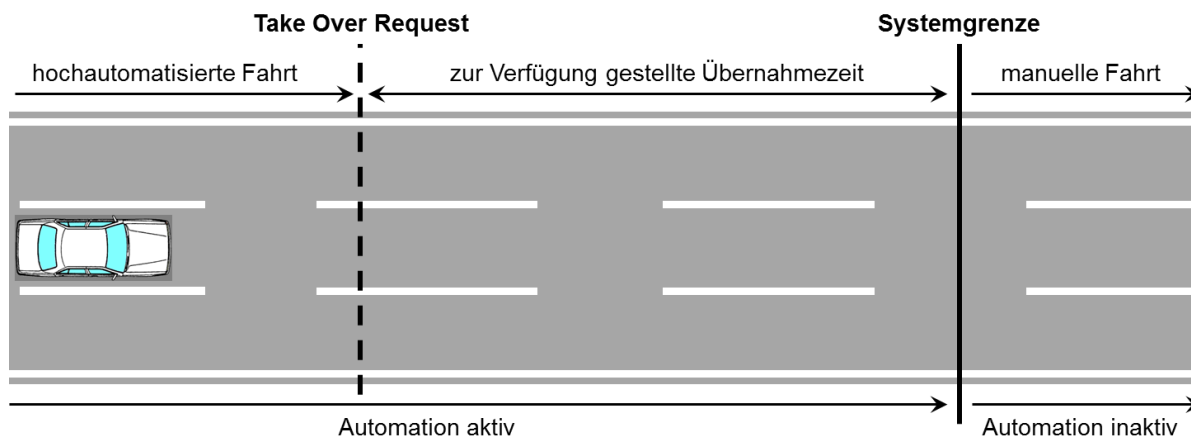


Abbildung 6-20: Schematische Darstellung des Ablaufs der Übernahme-situationen.

Nebenaufgabe

Um den Fahrer maximal aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis zu nehmen, wurde er über eine handlungsregulatorisch möglichst anspruchsvolle Trackingaufgabe abgelenkt (Abbildung 6-21). Dazu wurde ein Laptop auf Höhe des Beifahrersitzes positioniert. Die Nebenaufgabe bestand darin, eine sich bewegende Zielscheibe mit einem Fadenkreuz zu verfolgen. Die Bewegung erfolgte mit konstanter Geschwindigkeit. Bei Kollision mit dem Bildschirmrand und zu zufälligen Zeitpunkten änderte die Zielscheibe die Bewegungsrichtung, wobei auch die Stärke der Richtungsänderung nicht vorhersagbar war.

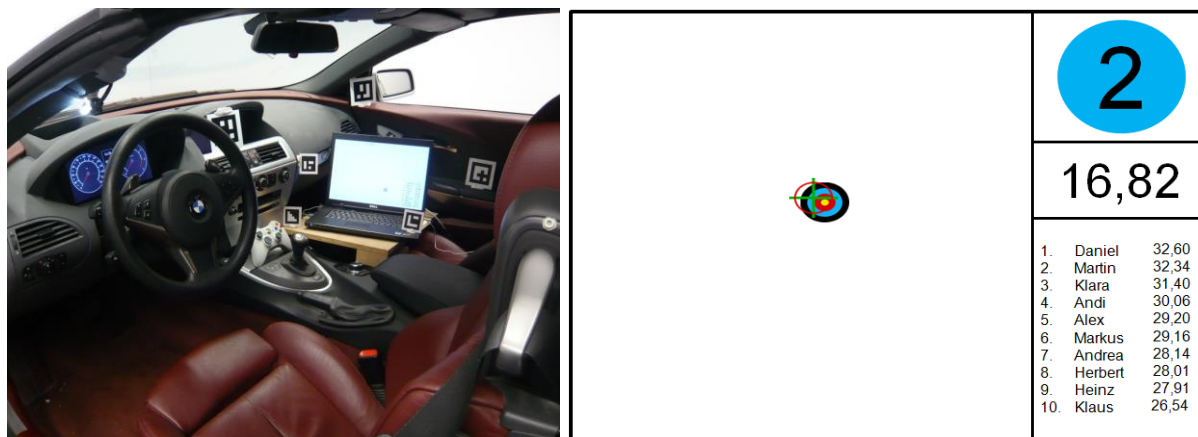


Abbildung 6-21: Darstellung der Nebenaufgabe. Links: Setup im Fahrzeug. Rechts: Zweidimensionaler Trackingtask als Nebenaufgabe.

Die Steuerung des Fadenkreuzes erfolgte über einen beidhändig zu bedienenden Spielecontroller einer Xbox-Konsole. Mit dem Daumen der rechten Hand erfolgte die Steuerung des Fadenkreuzes in vertikaler Richtung, während die horizontale Bewegung über den Daumen der linken Hand gesteuert wurde. In Übernahme-situationen musste der Controller in der Mittelkonsole vor dem Gangwahlschalter abgelegt wer-



den (siehe Positionierung in Abbildung 6-21 links). Die Nebenaufgabe wurde kontinuierlich angeboten und war nicht unterbrechbar. Die Probanden wurden instruiert, sich während der hochautomatisierten Fahrt vollständig auf die Bearbeitung der Nebenaufgabe zu konzentrieren und die Fahrzeugführung nur im Falle einer Übernahmeaufforderung zu übernehmen.

Um die Motivation für die Nebenaufgabenbearbeitung zu erhöhen, wurde die Versuchspersonenvergütung mit der Leistung in der Nebenaufgabe verknüpft sowie eine Highscoreliste angezeigt. Entsprechend der Anforderung eines vollständig abgelenkten Fahrers wurde durch die Art und Positionierung der Aufgabe sowie die beidhändige Bedienung ein Maximum an Ablenkung erzielt (visuell, mental und motorisch). Insbesondere durch die Darbietung der Nebenaufgabe auf dem Beifahrersitz konnte ein Höchstmaß an Abwendung von der Fahrszenerie erreicht werden. Dieses Vorgehen maximaler Ablenkung diente rein methodischen Zwecken. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Probanden nur die ihnen zur Verfügung gestellte Übernahmezeit zur Informationsaufnahme nutzten.

Szenarien

Alle Versuchspersonen absolvierten während des Experiments eine ca. einstündige Versuchsfahrt, wobei ihnen die Fahraufgabe in weiten Teilen der Strecke durch eine Automation abgenommen wurde und sie durch die Nebenaufgabenbearbeitung vollständig abgelenkt waren. In die Strecke eingebaut waren drei Szenarien, in denen das System an seine Grenzen geführt wurde und daher eine Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer anforderte. Diese sind in Abbildung 6-22 dargestellt.



Abbildung 6-22: Darstellung der Übernahmeszenarien. Links: Wegfall der vom System benötigten Fahrstreifenmarkierungen (FBM); Mitte: Fahrstreifenwechsel aufgrund Fahrbahnverengung (FBV); Rechts: Fahrstreifenwechsel mit zusätzlicher Orientierung hinsichtlich des Zielfahrstreifens (über Beschilderung vorgegeben, FBT).



Diese Übernahme erfolgte je nach Ausprägung des Szenarios auf unterschiedlichen Ebenen der Fahrzeugführung (Donges 1982) bzw. Ebenen des menschlichen Verhaltens (Rasmussen 1983; vgl. Tabelle 6-10).

Tabelle 6-10: Zuordnung der Versuchsszenarien zu den Ebenen der Fahrzeugführung bzw. der Verarbeitungsstufe.

	Fertigkeitsbasiert	Regelbasiert	Wissensbasiert
Navigation			Fahrbahnteilung „FBT“
Führung		Fahrbahnverengung „FBV“	
Stabilisierung	Fahrbahnmarkierungen „FBM“		

Im Szenario „Fahrbahnmarkierung“ (FBM) erfolgte eine Übernahmeaufforderung auf der jeweils niedrigsten Ebene der beiden Modelle – fertigkeitstbasiertes Verhalten bzw. Stabilisierungsebene. Ein Wegfall der Fahrbahnmarkierungen auf gesamter Breite der Fahrbahn stellte in diesem Szenario die Systemgrenze dar, die zu einer Kontrollübergabe an den Fahrer führte. Der definierte Ort der Systemgrenze lag auf dem Streckenmeter, ab dem keine Fahrstreifenmarkierungen mehr vorhanden waren. Der Streckenabschnitt mit fehlender Markierung lag dabei immer auf einer gekrümmten Fahrbahn, sodass ein Nichteingreifen des Fahrers zum Abdriften führte.

Im Szenario „Fahrbahnverengung“ (FBV) wurde die Breite der Autobahn verringert. Während der linke und der mittlere Fahrstreifen fortgesetzt wurden, verengte sich der eigene (rechte) Fahrstreifen und endete schließlich. Der notwendige Fahrstreifenwechsel wurde nicht von der Automation vollzogen, sondern musste vom Fahrer, unter Berücksichtigung der Verkehrsregeln, selbst abgesichert und durchgeführt werden. Diese Situation adressierte das regelbasierte Verhalten bzw. die Führungsebene. Die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen betrug 4 Sekunden, um ein sicheres Einscheren zu gewährleisten. Der exakte Ort der Systemgrenze wurde in diesem Szenario definiert als der Streckenmeter, ab dem das Fahrzeug nicht mehr in voller Breite in den sich verengenden Fahrstreifen passte.

Die jeweils höchste Ebene der beiden theoretischen Modelle – wissensbasiertes Verhalten bzw. die Navigationsebene – wurde durch das Szenario „Fahrbahnteilung“ (FBT) repräsentiert. Die Fahrbahn teilte sich hier in drei separate Fahrstreifen auf. Auf dem mittleren Fahrstreifen ankommend, wurden die Probanden über eine Beschilderung angewiesen, entweder dem linken oder dem rechten Fahrstreifen weiter zu folgen. Nach der Übernahmeaufforderung mussten die Probanden demnach entscheiden, in welche Richtung der Fahrstreifenwechsel zu erfolgen hatte, bevor sie das eigentliche Manöver ausführen konnten. Auch in diesem Szenario betrug die Zeitlücke zum Einscheren in den Fremdverkehr 4 Sekunden. Der Streckenmeter, ab



dem die einzelnen Fahrstreifen von durchgehenden Fahrstreifenbegrenzungen getrennt wurden, wurde als Ort der Systemgrenze definiert.

Vorwarnzeit

Um die Zeit zu bestimmen, die der Fahrer für eine Übernahme braucht, wurde in der Studie der Faktor „Vorwarnzeit“ eingeführt. Jedes der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Szenarien wurde mit drei unterschiedlichen Vorwarnzeiten für die Übernahme durchfahren.

Für die Festlegung der Ausprägung der Faktorstufen wurde eine Ablaufanalyse durchgeführt. Dazu war zunächst eine Zerlegung des Übernahmeprozesses in seine einzelnen Bestandteile bzw. Einzelhandlungen nötig. Anschließend wurden Literaturwerte herangezogen (Schmidtke 1989, Schweigert 2003), um die Dauer der Einzelhandlungen zu bestimmen und daraus Anhaltspunkte für die Dauer des gesamten Übernahmeprozesses zu generieren. Generell lässt sich der Übernahmeprozess in vier aufeinanderfolgende Handlungsschritte unterteilen:

1. Reizverarbeitung der akustischen Übernahmeaufforderung (Reaktion).
2. Informationsaufnahme aus der Umwelt und Orientierung in der Situation bzw. Entwickeln einer mentalen Repräsentation der aktuellen Situation.
3. Entscheidungsgenerierung über notwendige Handlungen auf der Navigations- und Führungsebene.
4. Motorische Umsetzung auf der Stabilisierungsebene.

Abbildung 6-23 zeigt die Ergebnisse der systemergonomischen Analyse für eine Übernahme aus völliger Ablenkung (motorisch, visuell und kognitiv) bei einem notwendigen Fahrstreifenwechsellvorgang. Die Analyse beginnt mit der Übernahmeaufforderung und endet mit dem Abschluss des Fahrstreifenwechsels. Sie ist in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Die für die motorischen Aktionen notwendigen Einzelzeiten sind dem Handbuch der Ergonomie (Schmidtke 1989) entnommen. Einzelzeiten für Blickbewegungen (Sakkaden, Fixationen) basieren auf Angaben in Schweigert (2003). Die für den Übernahmeprozess minimal benötigte Vorwarnzeit resultiert aus der Addition der jeweiligen Einzelzeiten. Aufgrund der Streuung der Literaturwerte ergab sich ein Wertebereich der Vorwarnzeit, der anhand der Minima und Maxima der Literaturwerte berechnet wurde. Für die Berechnung wurde angenommen, dass die motorischen Aktionen „Hände ans Lenkrad“ und „Fuß auf die Pedalerie“ simultan durchgeführt werden können. Es wurde demnach nur die längere der beiden Zeiten (Hände ans Lenkrad) bei der Summierung berücksichtigt.

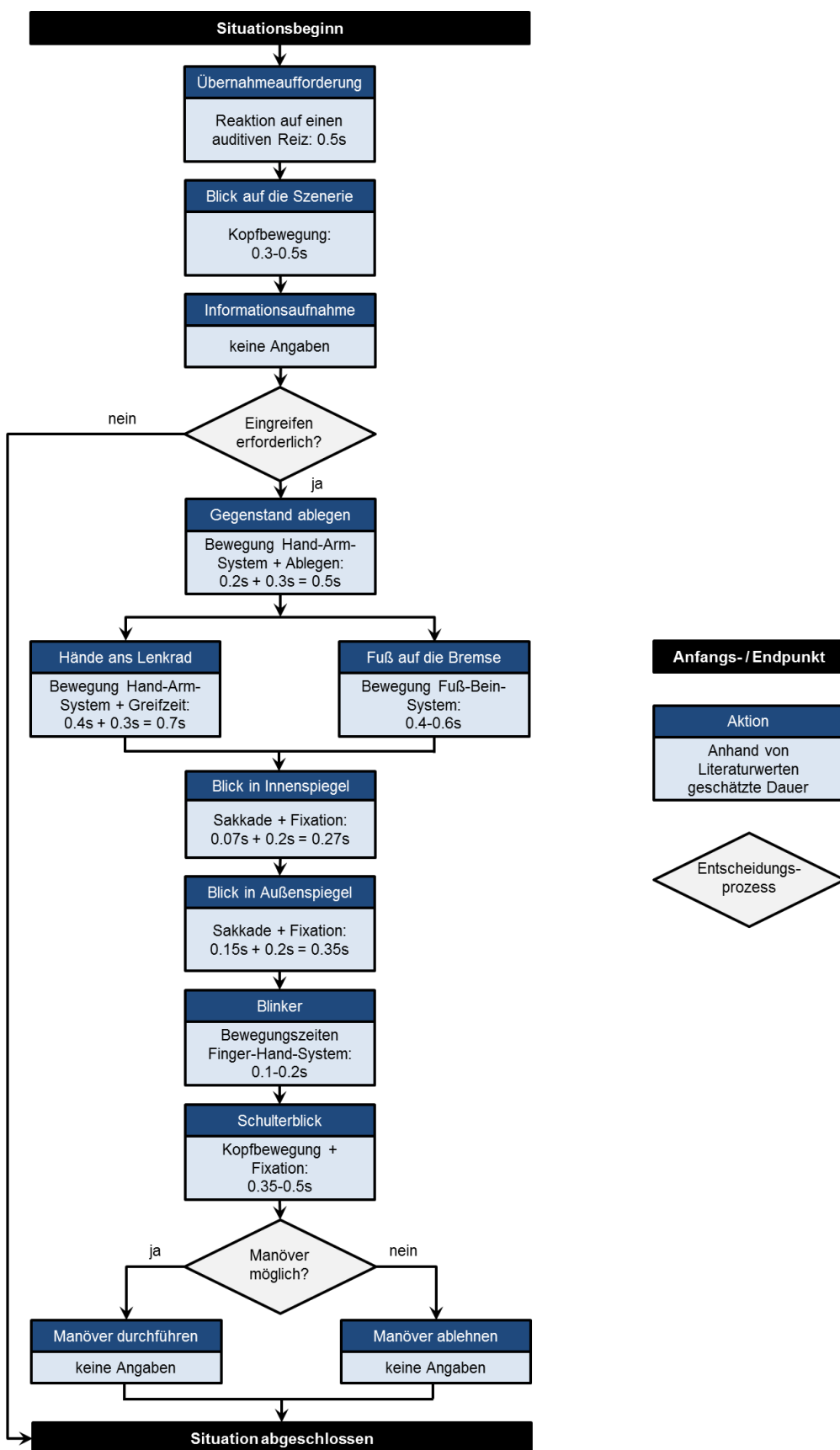


Abbildung 6-23: Ablaufanalyse des Übernahmeprozesses unter Berücksichtigung von Literaturwerten für Reizverarbeitung, motorische Umsetzung und Orientierung.



Laut der Analyse des Handlungsablaufes ergab sich für die notwendige Übernahmehauer ein Bereich von 3,07 - 3,52 Sekunden. Darin enthalten sind die motorischen Aktionen und Teile der Informationsaufnahme aus der Umwelt. Dieser Wertebereich lässt jedoch folgende Aspekte der Informationsverarbeitung und -umsetzung bei der Berechnung unberücksichtigt:

- **Informationsaufnahme**, d. h. wie lange braucht der Fahrer, um ausreichend Informationen aufzunehmen (Scanning).
- **Informationsverarbeitung**, d. h. die Dauer, die der Fahrer für die Erzeugung einer mentalen Repräsentation der Umwelt auf Basis der Informationsaufnahme benötigt.
- **Entscheidungsfindung**, d. h. die Dauer, die der Fahrer braucht, um sich auf Basis der Informationsverarbeitung für eine Handlungsalternative zu entscheiden.
- Zeit für **Fahrstreifenwechsel**, d. h. wie lange braucht der einzelne Fahrer, um ein Fahrstreifenwechselmanöver durchzuführen.

Es war daher davon auszugehen, dass der tatsächliche Übernahmepvorgang mehr Zeit in Anspruch nimmt. Aufgrund der theoretischen Berechnung wurde die unterste der drei Stufen des Faktors Vorwarnzeit mit 4 Sekunden gewählt. Um der vermutlich längeren notwendigen Übernahmepzeit Rechnung zu tragen, wurden die beiden weiteren Vorwarnzeiten auf 6 und 8 Sekunden festgelegt.

6.2.1.2 Probandenkollektiv

Es nahmen 32 Probanden im Alter von 22 bis 73 Jahren an der Simulatoruntersuchung teil. Das Durchschnittsalter der 22 Männer und 10 Frauen betrug 42,5 Jahre bei einer Standardabweichung von 15,8 Jahren (männlich: $M = 44.9$, $SD = 16.7$; weiblich: $M = 37.2$, $SD = 13.0$). Keiner der Probanden hatte zuvor an Versuchen mit hochautomatisierter Fahrzeugführung teilgenommen. Entsprechend der Altersverteilung ergab sich eine durchschnittliche Dauer des Führerscheinbesitzes von 23.8 Jahren ($SD = 14.9$ Jahre).

Das heterogene Versuchspersonenkollektiv (Abbildung 6-24) setzte sich überwiegend aus extern rekrutierten Versuchspersonen zusammen, wodurch sich die, im Vergleich zum vorangegangenen Versuch, sehr niedrige Zahl an Probanden mit Versuchserfahrung ergibt. Alle Probanden verfügten über normale bzw. durch optische Hilfsmittel korrigierte Sehschärfe und keinerlei Einschränkungen der motorischen Fähigkeiten.

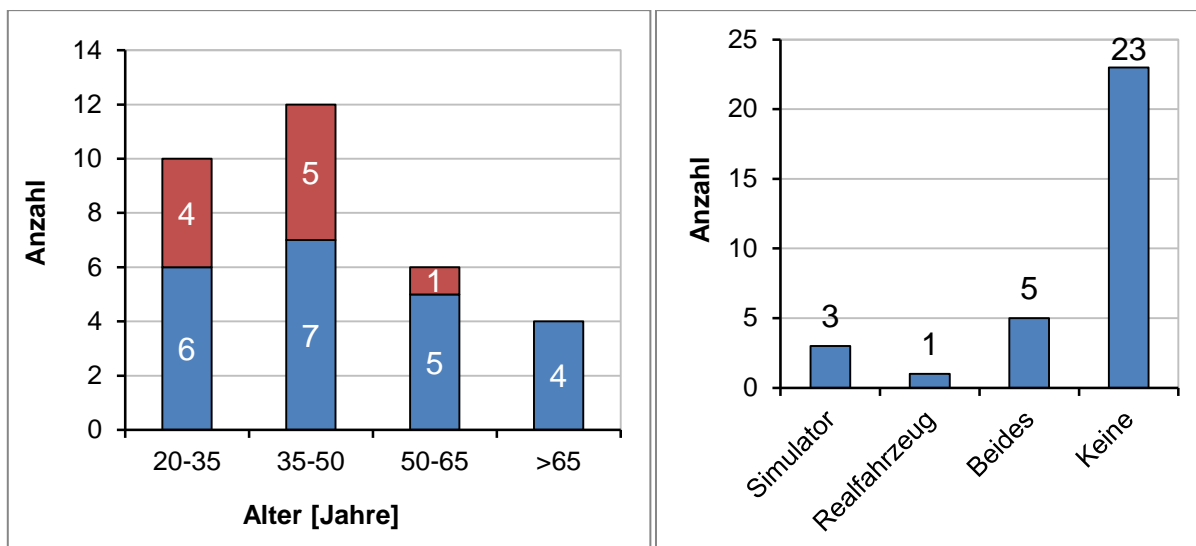


Abbildung 6-24: Altersverteilung (blau: Männer, rot: Frauen) und Versuchserfahrung des Probandenkollektivs ($N = 32$).

6.2.1.3 Versuchsablauf

Nach einführenden Informationen zum Fahrsimulator und zur Automation führen die Probanden eine zehnmündige Eingewöhnungsfahrt mit dem Ziel, erforderliche Lernprozesse möglichst vor den späteren Messfahrten abzuschließen. Um das Automationsverhalten kennenzulernen, wurde die Eingewöhnungsfahrt ohne Nebenaufgabe durchgeführt. Anhand der späteren Übernahme szenarien wurden die Probanden mit der Übernahmeaufforderung der Automation vertraut gemacht. Jedes Szenario trat dabei in der Eingewöhnungsfahrt jeweils einmal auf. Im Anschluss daran erhielten die Probanden ein ca. fünfminütiges Training bezüglich der Bedienung der Nebenaufgabe.

Der Versuch selbst teilte sich in zwei Messfahrten von jeweils ca. 30 Minuten Dauer. Vor jeder Messfahrt wurden die Probanden instruiert, der Beschilderung zu folgen und Fahrstreifenwechsel wie in der Realität abzusichern. Um die Absicherung mit Blicken auch während der Fahrt in Erinnerung zu rufen und um zu verdeutlichen, dass der Fahrstreifenwechsel bei einer Übernahmeaufforderung nicht immer automatisch eine sichere Handlungsalternative war, wurde zur Hälfte jeder Messfahrt eine Übernahmesituation integriert, in der ein Fahrstreifenwechsel zwar sinnvoll und vom Fahrer gewünscht, aufgrund eines besetzten Zielfahrstreifens aber nicht möglich war. Diese „Besetzt-Situationen“ dienen im Versuchsablauf nur der Konditionierung der Probanden auf ein notwendiges, realistisches Sicherungsverhalten und wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Abbildung 6-25 zeigt den exemplarischen Versuchsablauf für eine fiktive Versuchsperson.

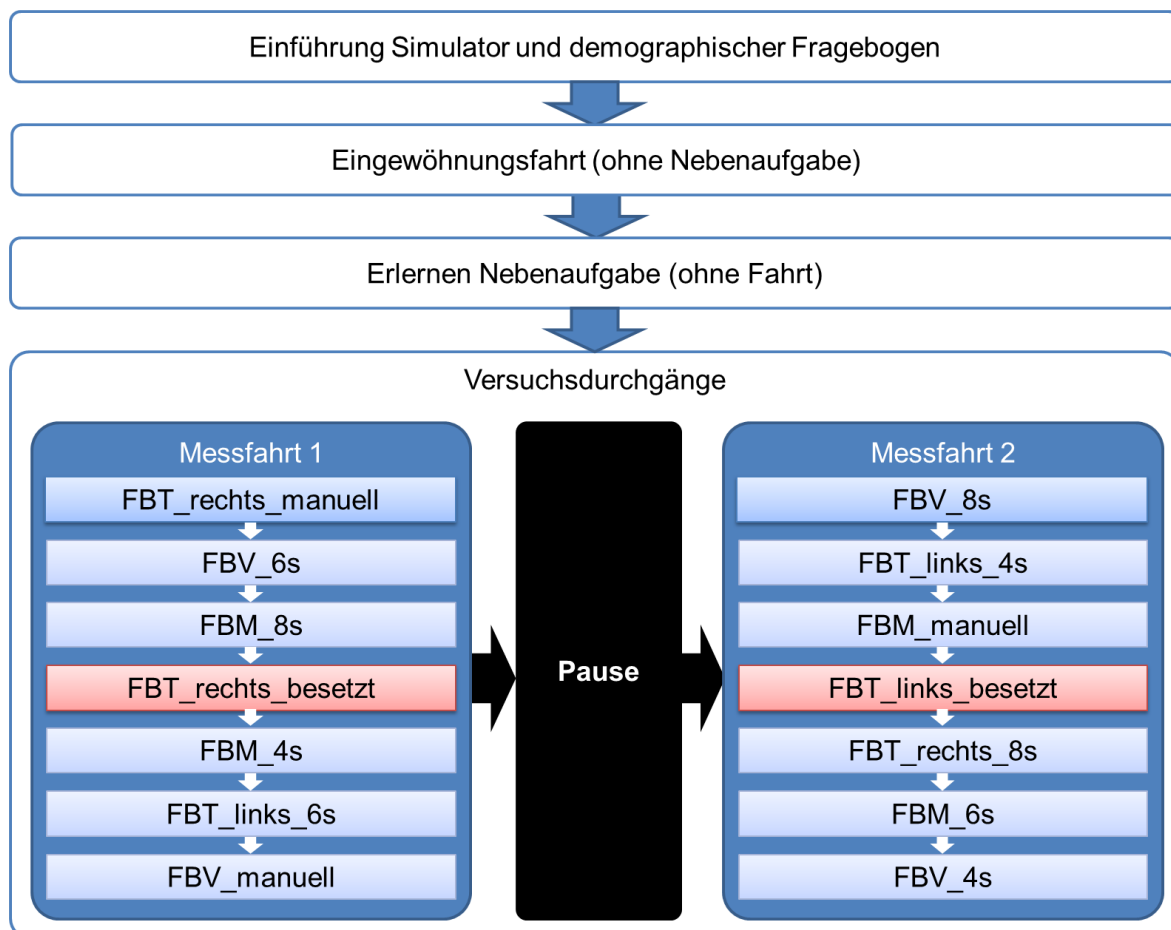


Abbildung 6-25: Schematische Darstellung eines beispielhaften Versuchsablaufes. Die Reihenfolge der Szenarien, die TOR-Zeiten sowie die Richtung der Fahrstreifenwechsel bei FBT wurden permutiert.

Während des eigentlichen Versuches durchführen die Probanden jedes der drei definierten Szenarien mit jeweils drei unterschiedlichen TOR-Zeiten (unabhängige Variable). Der Hinweis auf eine erforderliche Übernahme erfolgte über ein unspezifisches, auditives Signal (Hinweisgong) mit jeweils 4, 6 bzw. 8 Sekunden Abstand zum definierten Ort der Systemgrenze. Die Geschwindigkeit im Moment der Übernahmeaufforderung betrug in jeder Situation 100 km/h. Im Anschluss an jede Übernahme wurden die Probanden über das subjektive Komfortempfinden in der eben erlebten Situation befragt und anschließend angewiesen, die Automation wieder in Betrieb zu nehmen und sich mit der Nebenaufgabe zu beschäftigen. Um sicherzustellen, dass sich jede Situation für die Probanden korrekt darstellte, wurden sie hinsichtlich der Wahl des zu befahrenden Fahrstreifens instruiert. Der Zeitraum der automatisierten Fahrt zwischen den einzelnen Situationen betrug ca. vier Minuten, um sicherzustellen, dass sich die Probanden wieder auf die Nebenaufgabe konzentrieren konnten. Als Baseline-Messung wurde jedes der drei Szenarien zusätzlich manuell (ohne Ablenkung, ohne Assistenz) durchfahren. Die Reihenfolge der Szenarien, die TOR-Zeiten sowie die Richtung der Fahrstreifenwechsel bei FBT wurden permutiert.



6.2.1.4 Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen

Untersuchungsschwerpunkt des Versuches war der Einfluss der Vorwarnzeit auf die Übernahmequalität und das Komfortempfinden beim Übernahmeprozess. Die Betrachtung erfolgte getrennt nach Szenarien. Dem Versuch liegt demnach ein einstufiger Versuchsplan mit Messwiederholung auf dem vierstufigen Faktor „Vorwarnzeit“ zugrunde. Zusätzlich zu den drei Zeitstufen wird als vierte Stufe die Baseline-Messung berücksichtigt.

Die Bewertung der Übernahmezeiten erfolgte durch die Auswertung objektiver sowie subjektiver Daten. Der objektive Erfolg bzw. Misserfolg in den einzelnen Situationen wurde anhand der im Folgenden beschriebenen und in Tabelle 6-11 zusammengefassten Pass-/Fail-Kriterien beurteilt. Je nach Szenario konnten diese Kriterien unterschiedlich definiert sein.

Tabelle 6-11: Pass-/Fail-Kriterien der einzelnen Szenarien sowie mögliche Fehler in der Manöverausführung.

	Aufgabe	Pass-Kriterium	mögliche Fehler
FBM	Stabilisierung des Fahrzeugs entlang der Straße	<ul style="list-style-type: none"> Keine Kollisionen mit umgebendem Verkehr. 	<ul style="list-style-type: none"> Kollisionen mit umgebendem Verkehr
FBV	Fahrstreifenwechsel auf den benachbarten Fahrstreifen	<ul style="list-style-type: none"> Rechtzeitiger Beginn des Fahrstreifenwechsels 	<ul style="list-style-type: none"> Ausgelassener Fahrstreifenwechsel Verspäteter Beginn des Fahrstreifenwechsels
FBT	Fahrstreifenwechsel in eine, von einem Straßenschild vorgegebene Richtung	<ul style="list-style-type: none"> Rechtzeitiger Abschluss des Fahrstreifenwechsels 	<ul style="list-style-type: none"> Ausgelassener Fahrstreifenwechsel Verspäteter Abschluss des Fahrstreifenwechsels Fahrstreifenwechsel in die falsche Richtung

Das Szenario FBM galt bereits dann als erfolgreich abgeschlossen, wenn das Ego-Fahrzeug innerhalb des gedachten Fahrstreifens gehalten wurde und demzufolge nicht mit dem umgebenden Verkehr kollidierte.

Im Szenario FBV war der Beginn des Fahrstreifenwechsels maßgeblich für die Bewertung. Lag der Manöverbeginn vor dem Punkt, an dem das Fahrzeug nicht mehr in voller Breite in den sich verengenden Fahrstreifen passte, wurde die Situation als erfolgreich gewertet. Wurde bis zu diesem Punkt kein Fahrstreifenwechsel eingeleitet, bedeutete dies ein Überfahren der Fahrbahnbegrenzung hin zum Standstreifen und damit einen definierten Fehler. Das Manöver wurde als begonnen gewertet, sobald die Außenkante des Fahrzeugs die Leitlinie überschritten hatte.

Das Pass-Kriterium für das Szenario FBT war ein vollständig abgeschlossener Wechsel auf den vorgegebenen Zielfahrstreifen. Dazu musste sich das Ego-Fahrzeug bereits in voller Breite auf dem Zielfahrstreifen befinden, bevor die durchgezogenen Fahrstreifenbegrenzungen begannen. Bezüglich der Manöverausführung



konnten in diesem Szenario drei unterschiedliche Fehler auftreten. Neben einem verspäteten Manöverabschluss, d. h. einem Überfahren der Fahrstreifenbegrenzungen konnte der Fahrstreifenwechsel in die falsche Richtung erfolgen oder ganz ausgelassen werden. Bei Letzterem fuhren die Probanden auf dem vor der Übernahmeaufforderung aktuellen Fahrstreifen geradeaus durch die Situation.

Zusätzlich zur reinen Erfüllung der gestellten Fahraufgabe wurde in den beiden Szenarien FBV und FBT das Verhalten der Probanden bei Fahrstreifenwechsel bewertet. Dazu wurde das in Fahrschulen gelehrt Handlungsmuster, „Innenspiegelblick → Außenspiegelblick → Blinker → Schulterblick → Fahrstreifenwechsel“, als Ausgangspunkt genutzt. Es wurde überprüft, ob bei unterschiedlichen Vorwarnzeiten die einzelnen Schritte von den Probanden durchgeführt wurden, oder ob, bei sich verringernder Vorwarnzeit, einzelne Handlungsschritte ausgelassen wurden.

Das subjektive Komfortempfinden wurde über Befragungen der Testpersonen aufgenommen. Dazu wurden die Probanden im unmittelbaren Anschluss an jede Übernahmesituation per Gegensprechanlage gebeten, die soeben erlebte Übernahme auf einer siebenstufigen Skala von stressig (-3) bis komfortabel (+3) zu bewerten.

Parallel zur Bewertung der Übernahmezeiten anhand der objektiven Pass-/Fail-Kriterien und des subjektiven Komfortempfindens wurden die einzelnen sequenziellen Handlungsschritte des Übernahmeprozesses analysiert. Dazu wurde der Übernahmeprozess in kürzere Einzelabschnitte unterteilt, um den zeitlichen Ablauf der Übernahme detaillierter untersuchen und beschreiben zu können. Die Einteilung des Gesamtprozesses in Übernahmephasen erfolgte unter Berücksichtigung der Vorgehensweise bei der Handlungsanalyse und ist in Abbildung 6-26 dargestellt.

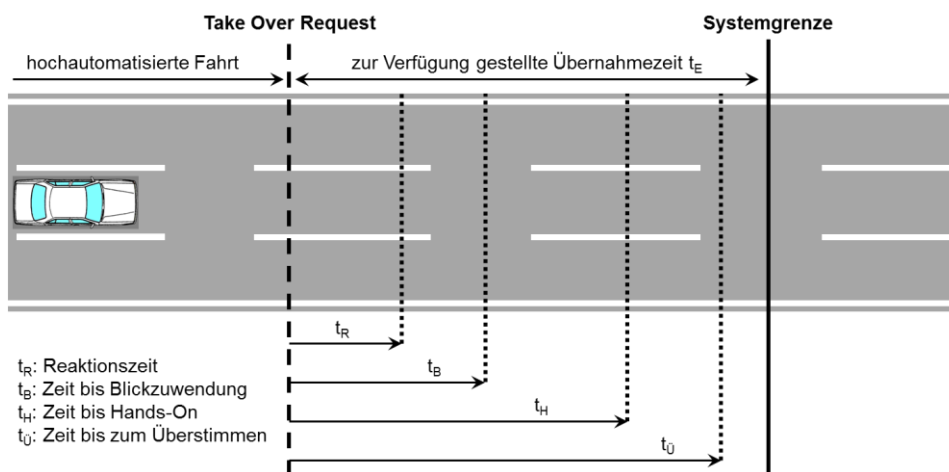


Abbildung 6-26: Einzelphasen des Übernahmeprozesses, von der Übernahmeaufforderung bis zum Überstimmen des Systems bzw. der Übernahme der Fahraufgabe.

Zum Zeitpunkt t_E vor einer Systemgrenze gab das Assistenzsystem eine Übernahmeaufforderung aus. Ausgehend von diesem Hinweis wurde untersucht, wie viel Zeit



die Probanden bis zum Abschluss der einzelnen Phasen aufwendeten. Dazu wurden folgende Einzelzeiten gemessen:

- Reaktionszeit t_R : Zeit bis der Fahrer eine erste Reaktion zeigt; gemessen anhand der ersten erkennbaren Reaktion in den Blickbewegungen (Beginn der Sakkade weg von der Nebenaufgabe).
- Zeit für Blickzuwendung t_B : Zeit bis zur ersten Blickzuwendung zur Fahrszene und damit Beginn der Orientierung in der Situation.
- Zeit bis „Hands-On“ t_H : Zeit bis der Fahrer seine Hände am Lenkrad hat und somit frühestmöglicher Zeitpunkt, an dem der Fahrer in die Fahraufgabe eingreifen kann.
- Zeit bis zum Überstimmen t_U : Zeit bis der Fahrer das System überstimmt bzw. abschaltet und damit die Fahraufgabe vollständig selbst übernommen hat.

Für die Analyse der Einzeldauern der Übernahmephasen wurde sowohl die Vorwarnzeit als auch das Szenario als Faktor miteinbezogen. Auf diese Weise sollte festgestellt werden, ob einer der beiden Faktoren Einfluss auf das Dringlichkeitsempfinden der Probanden hat und so zu einer Verkürzung einzelner Phasen führt. Dieser Aspekt des Versuches basiert demnach auf einem zweifaktoriellen Versuchsplan mit Messwiederholung auf beiden Faktoren.

6.2.2 Hypothesen

Nachfolgend sind die statistisch überprüfbaren Hypothesen des Versuchs aufgeführt. Dem Versuch lag die Annahme zugrunde, dass sich die Übernahmequalität, das Komfortempfinden und das auf den Fahrstreifenwechsel bezogene Sicherungsverhalten bei der Übernahme mit zunehmender Vorwarnzeit verbessern. Die hauptsächlich zu beantwortende Frage war indes, ab welcher Vorwarnzeit bei einem Übernahmeprovorgang ähnlich gute Leistungen erzielt werden wie bei der manuellen Fahrt durch das jeweilige Szenario. Der Einfluss des Faktors „Vorwarnzeit“ wird in Tabelle 6-12, Tabelle 6-13 und Tabelle 6-14 hinsichtlich der objektiven Zielerfüllung (Pass-/Fail-Kriterien), des Sicherungsverhaltens und des subjektiven Komfortempfindens strukturiert. Das Sicherungsverhalten setzt sich zusammen aus den Sicherungsblicken (Innenspiegel, Außenspiegel, Schulterblick) und der Information des umgebenden Verkehrs über die Fahrstreifenwechselabsicht mithilfe des Fahrtrichtungsanzeigers. Hinsichtlich des subjektiven Komfortempfindens wird zusätzlich zur Vorwarnzeit die Szenariokomplexität in Form des Faktors „Szenario“ mit in die Betrachtung aufgenommen. Auf diese Weise wird überprüft, ob die theoretischen Überlegungen zur Szenariogestaltung im Vorfeld des Versuches sich auch im subjektiven Erleben der Probanden wiederfinden. Für die Aufgabenerfüllung und das Sicherungsverhalten



wird der Faktor „Szenario“ nicht berücksichtigt. Aufgrund der stark unterschiedlichen Aufgabenstellung in den einzelnen Szenarien sind die möglichen Fehler sowie die Anforderungen an das Sicherungsverhalten nicht vergleichbar.

Tabelle 6-12: Hypothesen hinsichtlich der Zielerfüllung.

Hypothesen – Aufgabenerfüllung			Kennwerte
Vorwarnzeit	H ₀	Mit zunehmender Vorwarnzeit ändert sich die Anzahl an Probanden, die in den jeweiligen Szenarien Fehler machen, nicht.	Anzahl der Probanden mit Fehlern in der Aufgabenerfüllung.
	H ₁	Mit zunehmender Vorwarnzeit machen weniger Probanden Fehler in den jeweiligen Szenarien.	

Tabelle 6-13: Hypothesen hinsichtlich des Sicherungsverhaltens bestehend aus Sicherungsblicken (Innenspiegel, Außenspiegel, Schulterblick) und Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers.

Hypothesen – Sicherungsverhalten			Kennwerte
Vorwarnzeit	H ₀	Die Anzahl der Probanden, die nicht in den Innenspiegel / Außenspiegel / über die Schulter blicken, ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.	Anzahl der Probanden ohne Sicherungsblick: - in den Innenspiegel - in den Außenspiegel - über die Schulter
	H ₁	Die Anzahl der Probanden, die nicht in den Innenspiegel / Außenspiegel / über die Schulter blicken, ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.	
	H ₀	Die Anzahl der Probanden ohne Blinkerbetätigung ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.	Pass-/Fail-Kriterien für die Aufgabenerfüllung in den einzelnen Szenarien.
	H ₁	Die Anzahl der Probanden ohne Blinkerbetätigung ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.	

Tabelle 6-14: Hypothesen hinsichtlich des Komfortempfindens.

Hypothesen – Komfort			Kennwerte
Vorwarnzeit	H ₀	Mit zunehmender Vorwarnzeit ändert sich das Komfortempfinden der Probanden in den jeweiligen Szenarien nicht.	Subjektives Komfort-rating.
	H ₁	Mit zunehmender Vorwarnzeit wird die Übernahme in den jeweiligen Szenarien komfortabler bewertet.	
Szenario	H ₀	Mit zunehmender Szenariokomplexität ändert sich das Komfortempfinden der Probanden nicht.	
	H ₁	Mit zunehmender Szenariokomplexität wird die Übernahme in den jeweiligen Szenarien stressiger bewertet.	



Tabelle 6-15 enthält die Hypothesen für die zeitliche Analyse der einzelnen Übernahmephasen. Sowohl die Szenariokomplexität wie auch die zur Verfügung gestellten Vorwarnzeiten wurden auf einen möglichen Einfluss untersucht.

Tabelle 6-15: Hypothesen hinsichtlich der Zeiträume der einzelnen Übernahmephasen.

Hypothesen – Übernahmephasen			Kennwerte
Vorwarnzeit	H ₀	Die mittlere Dauer für die einzelnen Übernahmephasen ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.	Mittlere Dauer bis zum Abschluss der definierten Übernahmephasen.
	H ₁	Die mittlere Dauer für die einzelne Übernahmephase ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.	
Szenario	H ₀	Die mittlere Dauer für die einzelnen Übernahmephasen ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios nicht.	Mittlere Dauer bis zum Abschluss definierten Übernahmephasen.
	H ₁	Die mittlere Dauer für die einzelnen Übernahmephasen ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios.	

Die Tabellen beinhalten zudem die zur Hypothesenüberprüfung heranzuziehenden unabhängigen Variablen bzw. Kennwerte. Das Signifikanzniveau aller statistischen Testverfahren wurde für diesen Versuch auf $\alpha = .05$ festgelegt.

6.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung spiegelt die im vorangegangenen Kapitel eingeführte Gruppierung der unabhängigen Variablen in die vier Untersuchungskategorien Aufgabenbewältigung, Sicherungsverhalten, Komfortempfinden und Übernahmephasen wider. Die jeweils ermittelten Resultate sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

6.2.3.1 Objektive Bewertung – Aufgabenbewältigung

Die objektive Bewertung der Übernahme hinsichtlich scharfer Pass-/Fail-Kriterien erfolgte anhand der Häufigkeiten auftretender Fehler. Für die Auswertung der Aufgabenerfüllung wurde der Q-Test nach Cochran verwendet, wobei die einzelnen Vorwarnzeiten unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) paarweise miteinander verglichen wurden.

Im Szenario FBM zeigt sich, dass die Übernahme der Fahrzeugführung auf der Stabilisierungsebene unabhängig von der zur Verfügung stehenden Übernahmezeit sehr einfach zu erfüllen war. Alle 32 Probanden absolvierten das Szenario FBM in allen Vorwarnzeiten erfolgreich. Für die im Versuch simulierte Übernahme auf der Stabilisierungsebene und damit einer Anwendung fertigkeitstbasierten Verhaltens waren



demnach – selbst ausgehend von maximaler Ablenkung – bereits 4 Sekunden ausreichend. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf dieser Ebene der Fahrzeugführung nur geringe Anforderungen an Denken, Entscheiden und Handeln gestellt werden. Anders stellen sich die Szenarien FBV und FBT mit einer Übernahme der Fahraufgabe auf der Führungs- bzw. Navigationsebene dar. Abbildung 6-27 zeigt die aufsummierten Fehler in den beiden Szenarien in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit.

Sowohl im Szenario FBV ($Q(3) = 45.42, p < .001$) als auch im Szenario FBT ($Q(3) = 36.91, p < .001$) übt der Faktor Vorwarnzeit einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtanzahl der Fehler aus. Das besondere Augenmerk dieser Betrachtung liegt jedoch auf der weiterführenden Analyse, ab welcher Vorwarnzeit sich die Übernahmequalität nicht mehr von der manuellen Baselinefahrt unterscheidet. Die paarweisen Einzelvergleiche der Übernahmen mit der manuellen Fahrt zeigen in beiden Szenarien, dass bei 4 Sekunden (FBV: $Q(1) = 23.15, p < .001$; FBT: $Q(1) = 17.64, p < .001$) wie auch bei 6 Sekunden Vorwarnzeit (FBV: $Q(1) = 9.31, p = .014$; FBT: $Q(1) = 8.00, p = .028$) noch signifikante Unterschiede in der Situationsbewältigung bestehen. Bei diesen Zeiten werden, verglichen mit der Baselinefahrt, mehr Fehler gemacht. Erst bei einer Vorwarnzeit von 8 Sekunden ist kein signifikanter Unterschied mehr zwischen der manuellen Fahrt und der hochautomatisierten Fahrt nachzuweisen (FBV: $Q(1) = 1.29, p > .999$; FBT: $Q(1) = 3.57, p = .353$). Die Trajektorien, die von den einzelnen Probanden in den Szenarien FBV und FBT in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit gefahren wurden, sind in Anhang B.3 dargestellt.

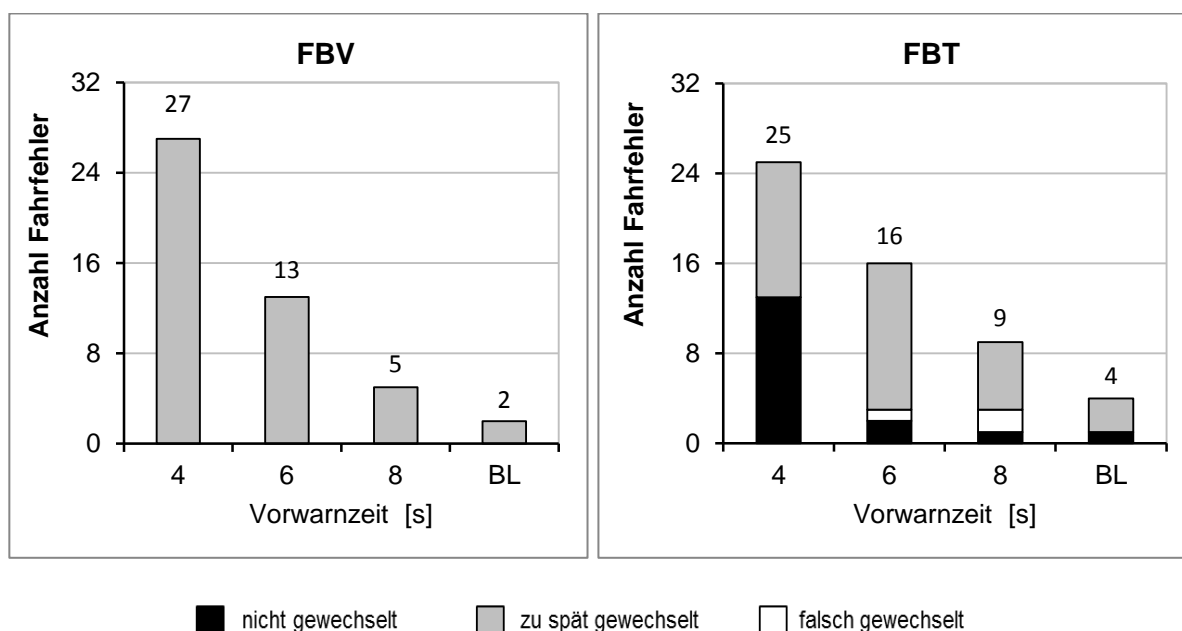


Abbildung 6-27: Anzahl der Versuchspersonen mit Fehler bei der Aufgabenerfüllung in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit bzw. bei der Baselinefahrt. Links (FBV, N = 32): zu spät eingeleiteter Fahrstreifenwechsel. Rechts (FBT, N = 32): Fahrstreifenwechsel ausgelassen, zu spät oder in die falsche Richtung.



Betrachtet man die angelegten, konservativen Fail-Kriterien, wird unter den gegebenen Versuchsbedingungen für die Übernahme der Fahraufgabe auf der Navigations-ebene, wie auch für die Übernahme auf der Führungsebene eine Zeit von 8 Sekunden benötigt, um vergleichbare Leistungen wie in der manuellen Fahrt zu erreichen. Hier zeigt sich die Wichtigkeit des gewählten Kriteriums für die Einschätzung der Ergebnisse. Bei Annahme eines liberaleren, rein kollisionsorientierten Fail-Kriteriums wie Tönert (2011) es vorschlägt, würde ein zu später Fahrstreifenwechsel als Fail-Kriterium ausscheiden, wenn dadurch keine Kollision verursacht würde. Folgt man also der Annahme, dass die Überschreitung der Fahrstreifenmarkierung kein geeignetes Fail-Kriterium darstellt, so verkürzt sich die Zeit, mit der eine sichere Übernahme noch möglich ist. Betrachtet man im Szenario FBT ausschließlich die Tatsache, ob ein Fahrstreifenwechsel in die richtige Richtung ausgeführt wurde, zeigt sich nur bei der Vorwarnzeit von 4 Sekunden ein signifikanter Unterschied ($Q(1) = 10.29$, $p = .008$) zur Baselinefahrt. Bei einer Vorwarnzeit von 6 Sekunden ($Q(1) = 1.00$, $p > .999$) bzw. 8 Sekunden ($Q(1) = 1.00$, $p > .999$) hingegen nicht mehr.

6.2.3.2 Sicherungsverhalten

Zusätzlich zur digitalen Bewertung, ob die Szenarien erfolgreich absolviert wurden oder nicht, wird im Folgenden das Sicherungsverhalten der Probanden betrachtet. Bei einem durchzuführenden Fahrstreifenwechsel ist in höchstem Maße sicherheitsrelevant, diesen über Kontrollblicke in die Spiegel bzw. über die Schulter abzusichern. Insbesondere bei einer Übernahme aus der völligen Ablenkung heraus liefern diese Blicke einen wichtigen Beitrag zur Erlangung eines ausreichenden Situationsbewusstseins bezüglich des umgebenden Verkehrs. Darüber hinaus ist es erforderlich, die weiteren Verkehrsteilnehmer mithilfe des Fahrtrichtungsanzeigers über die Fahrstreifenwechselabsicht zu informieren. Im Folgenden werden die beiden Szenarien, in denen ein Fahrstreifenwechsel durchzuführen war, (FBV, FBT) dahin gehend untersucht, ob und in welcher Weise die Probanden Informationen über den Verkehr auf dem Zielfahrstreifen einholten und die Absicht zum Fahrstreifenwechsel, durch Blinken kommunizierten. Basis der Betrachtung ist das aus der Fahrschule bekannte Idealvorgehen (siehe Kapitel 6.2.1.4).

Versuchspersonen, die sich in einem Szenario gegen einen Fahrstreifenwechsel entschieden, mussten diesen naturgemäß auch nicht absichern bzw. kommunizieren. Für die weiterführende Analyse des Sicherungsverhaltens werden sie daher nicht berücksichtigt. Es werden nur Probanden mit einbezogen, die bei jeder Vorwarnzeit sowie bei der Baselinefahrt einen Fahrstreifenwechsel durchführten. Die Messdaten der Probanden mit verspätetem Fahrstreifenwechsel wurden hingegen nicht aussortiert, da auch ein verspäteter Wechsel abgesichert werden musste. Im Szenario FBV gehen alle 32 Probanden in die Bewertung ein. Abbildung 6-28 zeigt das Blickverhalten dieser Versuchspersonen für das Szenario FBV. Es ist dargestellt, wie viele Pro-



banden die einzelnen Sicherungsblicke in den Innenspiegel, in den Außenspiegel und über die Schulter in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit durchführten.

Sowohl bei Szenario FBV wie auch bei Szenario FBT wurde der Einfluss der Vorwarnzeit für jede AOI mithilfe eines Q-Tests nach Cochran untersucht. Post-Hoc-Tests wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt.

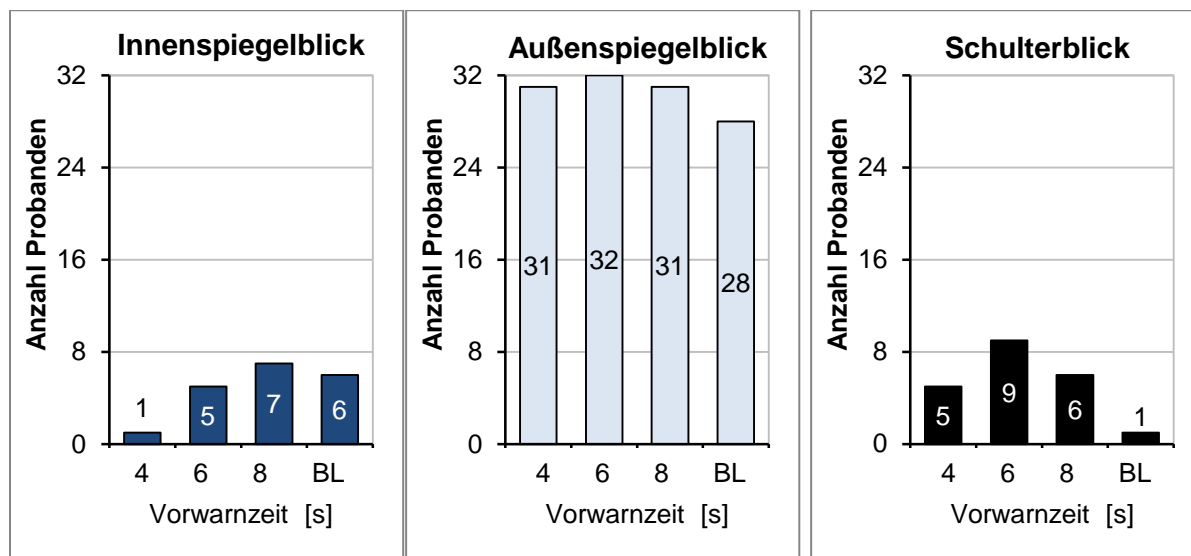


Abbildung 6-28: Szenario FBV. Anzahl der Probanden mit Blick in den Innenspiegel, Außenspiegel bzw. Schulterblick (von links nach rechts) in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit ($N = 32$).

Sehr auffällig an den dargestellten Ergebnissen ist, dass die Information über den umgebenden Verkehr hauptsächlich durch Blicke in den Außenspiegel aufgenommen wurde. Diese dienten in erster Linie der Kontrolle, ob der Zielfahstreifen frei und der Fahrstreifenwechsel somit möglich war. Nur wenige der 32 Probanden nutzten den Innenspiegel zur Informationsbeschaffung. Auch eine weiterführende Absicherung des Fahrstreifenwechsels über Schulterblicke zur Kontrolle des toten Winkels fand kaum statt. Aus dem Q-Test nach Cochran ergibt sich sowohl für den Blick in den Innenspiegel ($Q(3) = 8.59$, $p = .035$) als auch für den Schulterblick ($Q(3) = 10.62$, $p = .014$) ein Haupteffekt des Faktors Vorwarnzeit. Für den Blick in den Außenspiegel zeigt sich nur ein tendenzieller Einfluss ($Q(3) = 6.75$, $p = .080$).

Trotz der signifikanten Haupteffekte ergeben die nachgeschalteten Post-Hoc-Tests weder für die Blicke in den Innenspiegel noch für Blicke in den Außenspiegel statistisch relevante Unterschiede. Eine fundierte Aussage, inwiefern die zur Verfügung gestellte Zeit das Blickverhalten beeinflusst, ist dadurch nur schwer möglich. Bei Betrachtung der grafischen Darstellung fällt jedoch auf, dass die Nutzung des Innenspiegels bei der kürzesten Übernahmezeit von 4 Sekunden am geringsten ist. Da allgemein die Nutzung des Innenspiegels stark vernachlässigt wurde, ist davon auszugehen, dass die Probanden dieser Informationsquelle hinsichtlich der zu erfüllen-



den Aufgabe nicht die höchste Priorität zuweisen. Ein Blick in den Innenspiegel stellt demnach subjektiv eine nicht zwingend notwendige Bonusinformation dar, die bei einer sehr kurzen Übernahmezeit nicht abgerufen wird. Im Fall des Schulterblickes zeigt sich ein gegensätzliches Bild. Diese Art der Informationsbeschaffung wird in der manuellen Fahrt am wenigsten genutzt. Es ist wahrscheinlich, dass die Probanden in diesem Modus kontinuierlich Information über die Fahrzeugumgebung wahrnehmen und daher über eine Grundkenntnis hinsichtlich der Relativpositionen der sie umgebenden Fahrzeuge verfügen. Für die Durchführung des Fahrstreifenwechselmanövers wird ein Schulterblick daher nicht als zwingend notwendig erachtet. Bei der Übernahme aus der Ablenkung heraus muss dieses Umgebungswissen jedoch erst vollständig erarbeitet werden, was zu mehr Absicherungsblicken über die Schulter führt. Von großer Bedeutung für die Sicherheit des Fahrstreifenwechsels und somit für die Sicherheit des Übernahmeprozesses in diesem Szenario ist die Tatsache, dass keiner der Probanden einen Fahrstreifenwechsel komplett ohne einen Sicherungsblick auf zumindest eine der AOI durchführte.

Im Szenario FBT wurde der Fahrstreifenwechsel nur von einem Teil der Probanden durchgeführt. Daher verringert sich die Stichprobengröße in diesem Szenario auf 19 Versuchspersonen, die jedoch bei jeder zur Verfügung stehenden Vorwarnzeit wie auch in der Baselinefahrt auf den Zielfahrstreifen wechselten. Abbildung 6-29 zeigt die Anzahl der Probanden, die in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit Sicherungsblicke auf die einzelnen AOI durchführten.

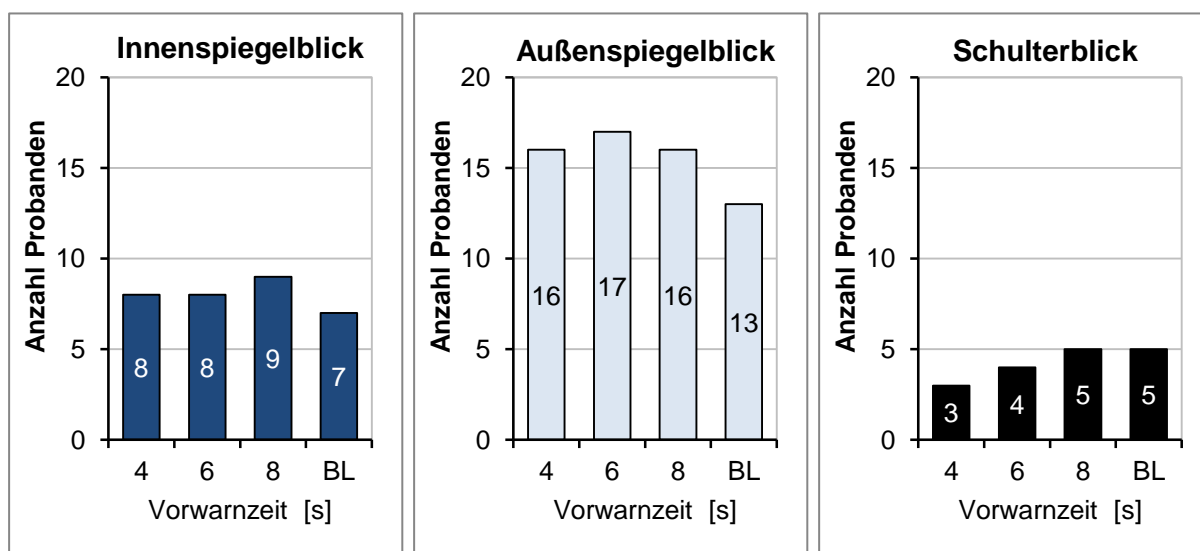


Abbildung 6-29: Szenario FBT. Anzahl der Probanden mit Blick in den Innenspiegel, Außenspiegel bzw. Schulterblick (von links nach rechts) in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit. Es wurden nur die Probanden berücksichtigt, die bei allen Vorwarnzeiten sowie bei der Baselinefahrt einen Fahrstreifenwechsel vollzogen ($N = 19$).

Die statistische Analyse zeigt weder für den Blick in den Innenspiegel ($Q(3) = .52$, $p = .914$), noch für den Blick in den Außenspiegel ($Q(3) = 4.5$, $p = .212$) oder den



Schulterblick ($Q(3) = 1.06$, $p = .786$) einen Haupteffekt des Faktors „Vorwarnzeit“. Bezogen auf die durchgeführten Sicherungsblicke in diesem Szenario hat die zur Verfügung gestellte Vorwarnzeit demnach keinen Einfluss.

Wie im Szenario FBV zeigt sich auch bei FBT, dass die Außenspiegel die Hauptinformationsquelle für die Probanden darstellen. Innenspiegel- und Schulterblicke werden hingegen von deutlich weniger Probanden durchgeführt. Bezogen auf die geringere Stichprobengröße bei FBT verglichen mit FBV finden sie jedoch in diesem Szenario etwas mehr Beachtung. Wie in Tabelle 6-16 dargestellt, führen in diesem Szenario einige Probanden einen Fahrstreifenwechsel völlig ohne Absicherung, d. h. ohne Blicke auf den nachfolgenden Verkehr, durch.

Tabelle 6-16: Anzahl der Probanden ohne jegliche Blicke zur Absicherung des Fahrstreifenwechsels im Szenario FBT (N = 19).

Vorwarnzeit	4 s	6 s	8 s	BL
Keine Absicherung	2	1	3	2

Dies führte im Rahmen des Versuches nicht zu Unfällen, da der Zielfahrstreifen unbesetzt und der Fahrstreifenwechsel somit möglich war. In der Realität ist solch ein Verhalten hingegen als äußerst problematisch zu betrachten. Durch die fehlende Absicherung können sich kritische Situationen bis hin zum Verkehrsunfall ergeben. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, ist dieses Verhalten jedoch keine Frage der Vorwarnzeit. Auch in der manuellen Bedingung zeigten zwei Probanden keinerlei Absicherungsverhalten.

Insgesamt hat es den Anschein, als wäre das Blickverhalten zur Absicherung des Fahrstreifenwechsels unabhängig von der zur Verfügung stehenden Zeit. Vielmehr spielen eingeübte und auch in der Realität angewendete Handlungsmuster eine große Rolle. Diese werden im Versuch nicht nur in der manuellen Bedingung angewendet, sondern auch auf die Fahrstreifenwechsel bei den Übernahmesituationen übertragen. Ob sich diese Handlungsmuster nach längerer Nutzung einer hochautomatisierten Fahrzeugführung ändert, kann mit diesem Versuch nicht evaluiert werden. Für eine Adaption des Verhaltens war die Versuchsdauer vermutlich nicht lange genug.

Für einen sicheren Fahrstreifenwechsel ist es nicht nur notwendig, selbst Informationen über den umgebenden Verkehr einzuholen, sondern diesen auch über die eigene Absicht zu informieren. Abbildung 6-30 zeigt die Anzahl an Probanden, die in den Szenarien FBV und FBT in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit den Schalter des Fahrtrichtungsanzeigers betätigt haben. Wie bei der Betrachtung der Absicherungsblicke werden auch hier nur diejenigen Versuchspersonen berücksichtigt, die bei allen Vorwarnzeiten Fahrstreifenwechsel durchgeführt haben.

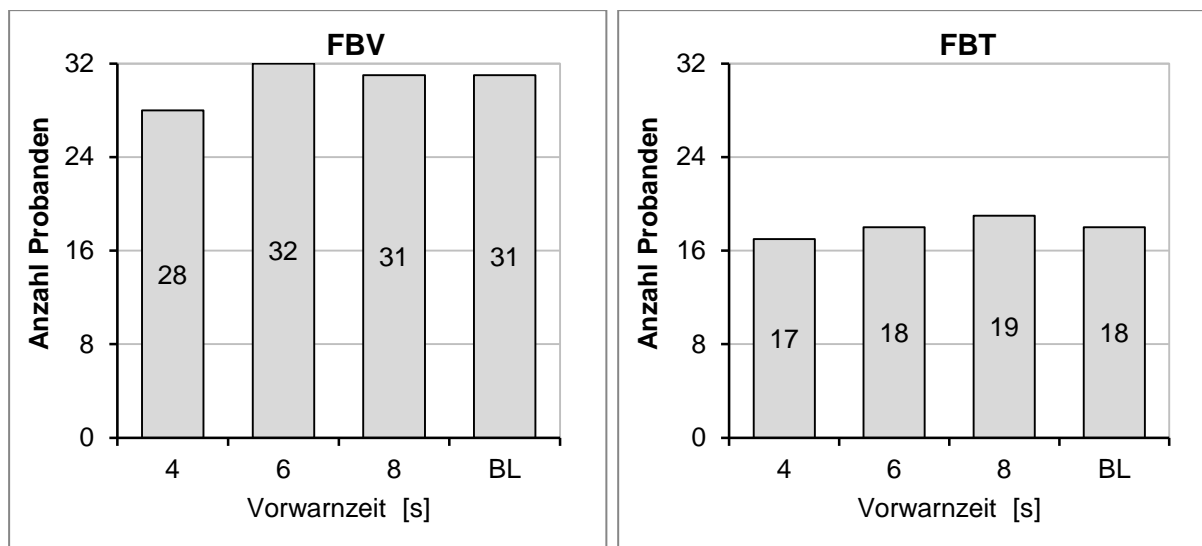


Abbildung 6-30: Anzahl der Probanden mit Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit. Für die Szenarien FBV ($N = 32$) und FBT ($N = 19$) ergeben sich unterschiedliche Stichprobengrößen.

In keinem der beiden Szenarien zeigt sich ein signifikanter Einfluss des Faktors „Vorwarnzeit“ (FBV: $Q(3) = 2.0$, $p = .572$; FBT: $Q(3) = 6.75$, $p = .080$). Im Szenario FBV blinken jedoch bei 4 Sekunden Vorwarnzeit tendenziell weniger Probanden als bei den längeren Vorwarnzeiten bzw. der Baselinefahrt. Insgesamt ist die Anzahl an blinkenden Probanden unabhängig vom Übernahmeprozess bzw. der zur Verfügung stehenden Zeit sehr hoch. Da auch in der manuellen Bedingung zum Teil nicht geblinkt wurde, sind fehlende Fahrtrichtungsanzeigen kein Ausdruck einer problematischen Übernahme.

Hinsichtlich des Vorhandenseins von Absicherungsblicken und der Nutzung des Fahrtrichtungsanzeigers ist der Übernahmeprozess unabhängig von der zur Verfügung stehenden Zeit als unkritisch anzusehen. Es ist jedoch zu beachten, dass auch bei vorhandenen Blicken nicht sichergestellt werden kann, inwiefern diese zur Erlangung eines adäquaten Verständnisses der Situation ausreichend sind.

6.2.3.3 Subjektive Bewertung – Komfortempfinden

Für die Auswertung des subjektiven Komfortempfindens wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen durchgeführt. Für Post-Hoc-Vergleiche der einzelnen Faktorstufen wurde das α -Fehlerniveau nach der Methode von Bonferroni korrigiert. Die Ergebnisse der Befragung zum subjektiven Komfortempfinden sind in Abbildung 6-31 dargestellt. Die Diagramme zeigen das mittlere Komfortempfinden der 32 Probanden in Abhängigkeit von den beiden Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“.

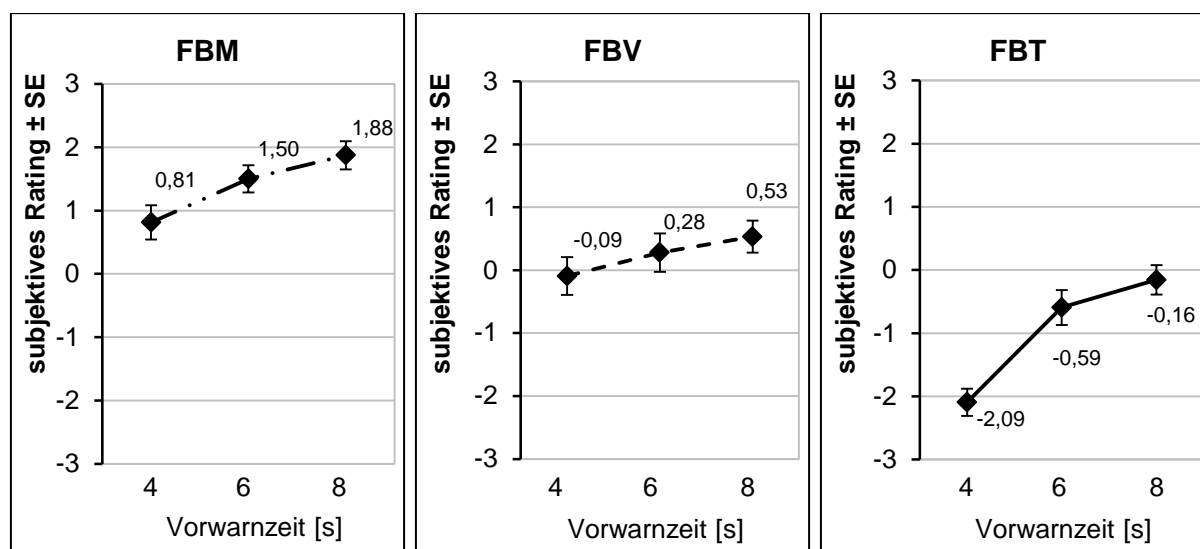


Abbildung 6-31: Subjektives Komfortempfinden von stressig (-3) bis komfortabel (+3) in den unterschiedlichen Szenarien in Abhängigkeit von den TOR-Zeiten ($N = 32$).

Der Faktor „Szenario“ hat signifikanten Einfluss auf das Komfortempfinden ($F_{sz}(2, 62) = 66.230, p < .001, \eta^2 = .68$). In den Abbildungen ist deutlich zu sehen, dass sich die grundlegenden Komfortbewertungen abhängig vom Szenario deutlich verändern. Post-Hoc-Tests bestätigen diesen Eindruck. FBM, FBV und FBT weisen bei einem paarweisen Vergleich jeweils signifikante Unterschiede auf (jeweils $p < .001$). Die Übernahme aus der automatisierten Fahrt und bei völliger Ablenkung wird demnach unkomfortabler eingeschätzt, je höher die Ebene der Fahrzeugführung ist, auf der übernommen werden muss, bzw. je komplexer das dafür notwendige Verhalten ist.

Für den Faktor „Vorwarnzeit“ ergibt sich ebenfalls ein Haupteffekt bezüglich des subjektiven Komfortempfindens ($F_{vz}(2, 62) = 27.660, p < .001, \eta^2 = .47$). Bei genauerer Betrachtung ist dieser Unterschied allerdings nur in den Szenarien FBM ($F_{vz}(2, 62) = 26.750, p < .001, \eta^2 = .46$) und FBT ($F_{vz}(2, 62) = 10.652, p < .001, \eta^2 = .26$) statistisch bedeutsam. Hier steigt die Komfortbewertung mit zunehmender Vorwarnzeit signifikant an. Verglichen mit der kürzesten Übernahmezeit von 4 Sekunden zeigen Post-Hoc-Tests in beiden Szenarien eine komfortablere Bewertung bei 6 Sekunden (FBM: $p = .019$; FBT: $p < .001$) und auch bei 8 Sekunden (FBM: $p < .001$; FBT: $p < .001$). Eine Komfortsteigerung durch Erhöhung der Übernahmezeit von 6 auf 8 Sekunden kann sowohl bei FBM ($p = .189$) als auch bei FBT ($p = .508$) nicht nachgewiesen werden. Im Szenario FBV ist ein Einfluss der Vorwarnzeit auf das Komfortempfinden nicht nachzuweisen ($F_{vz}(2, 62) = 2.038, p = .139, \eta^2 = .06$).

Zusätzlich zu den Haupteffekten weist die Interaktion „Szenario x Vorwarnzeit“ einen signifikanten Einfluss auf das Komfortempfinden auf ($F(4, 124) = 3.642, p = .008$,



$\eta^2 = .11$). Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass im Szenario FBT die TOR-Zeit von 4 Sekunden im Verhältnis zu den anderen Szenarien nochmals deutlich schlechter bewertet wird. Im Sinne des SRK-Modells und der Ebenen der Fahrzeugführung bedeutet dies, dass sich in komplexeren Situationen kürzere TOR-Zeiten mehr auf das subjektive Empfinden auswirken als in einfacheren Situationen.

6.2.3.4 Übernahmephasen

Im Folgenden werden die Dauern der definierten Übernahmephasen betrachtet. Für jede Übernahmephase sind – abhängig vom Szenario und der zur Verfügung stehenden Zeit – sowohl die mittleren Dauern wie auch die minimalen und maximalen Zeiten der 32 Probanden dargestellt. Letzteres ermöglicht einen über die gemittelten Werte hinausgehenden Eindruck über die interindividuelle Streuung der Phasendauern. Für die statistische Auswertung der beiden Einflussfaktoren wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen verwendet. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer α -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt.

Startpunkt des Übernahmeprozesses ist in jeder Bedingung die auditive Übernahmeaufforderung, die von den Probanden wahrzunehmen ist. Die in Abbildung 6-32 dargestellten Werte zeigen die mittleren Dauern von der Ausgabe der Warnung bis zur ersten messbaren Reaktion. Diese ist gekennzeichnet durch eine beginnende Sakkade weg von der Nebenaufgabe.

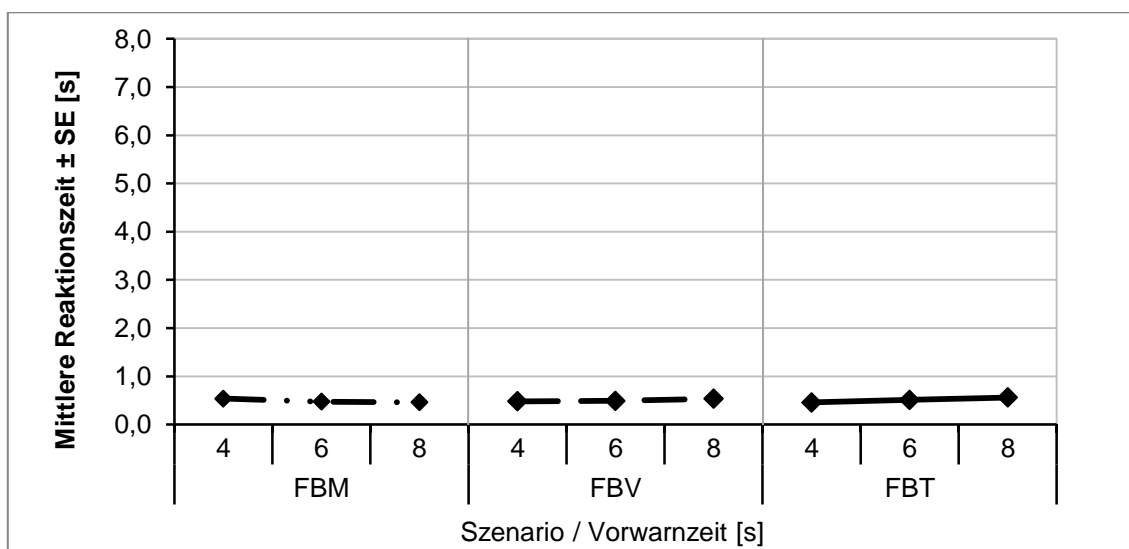


Abbildung 6-32: Mittlere Zeit bis zur ersten Reaktion (Beginn der Sakkade weg von der Nebenaufgabe). Darstellung in Abhängigkeit des gefahrenen Szenarios und der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit ($N = 32$). Mittelwerte und Standardfehler sind Tabelle 6-17 zu entnehmen.



Die Darstellung, insbesondere die Skalierung der Zeit-Achse in *Abbildung 6-32* und den folgenden Diagrammen ist bewusst gewählt, um die Konsistenz der Abbildungen für die unterschiedlichen Übernahmephasen zu erhalten und einen einfacheren Vergleich zu gewährleisten. Die genauen Daten der Mittelwerte und Standardfehler sind den jeweiligen Tabellen zu entnehmen.

Die Varianzanalyse zeigt weder für den Faktor „Szenario“ ($F_{SZ}(2, 58) = .361$, $p = .699$, $\eta^2 < .01$) noch für den Faktor „Vorwarnzeit“ ($F_{VZ}(2, 58) = 1.111$, $p = .336$, $\eta^2 = .02$) ein statistisch signifikantes Ergebnis. Auch eine Interaktion der Faktoren ist nicht nachzuweisen ($F(2.82, 81.73) = .974$, $p = .405$, $\eta^2 < .02$). Die Erklärung, warum weder das Szenario noch die Vorwarnzeit Einfluss auf die Reaktionszeiten haben, gestaltet sich sehr einfach. Zu diesem Zeitpunkt der Übernahme mussten die Probanden aus völliger Ablenkung heraus reagieren und verfügten über keinerlei Wissen über die bevorstehende Situation. Im Moment der Übernahmeaufforderung existierte demnach subjektiv kein Unterschied in der Dringlichkeit zur Reaktion. Unabhängig von den Einflussfaktoren ergibt sich daher eine erste messbare Reaktion im Mittel 0.5 Sekunden nach Ausgabe der Übernahmeaufforderung. Tabelle 6-17 zeigt zusätzlich die minimalen und maximalen Werte der Reaktionszeiten in den unterschiedlichen Bedingungen. Die kürzeste gemessene Reaktionszeit liegt demnach bei 0.08 Sekunden, während sich für die längste ermittelte Reaktionszeit ein Wert von 1.44 Sekunden ergibt.

Tabelle 6-17: Mittelwerte und Standardfehler sowie minimale und maximale Reaktionszeiten in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“.

Szenario	FBM			FBV			FBT		
	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s
Vorwarnzeit									
Mittelwert [s]	0.54	0.48	0.46	0.48	0.49	0.54	0.46	0.51	0.56
Standardfehler [s]	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.07
Min. Reaktionszeit [s]	0.16	0.12	0.16	0.20	0.08	0.20	0.20	0.12	0.16
Max. Reaktionszeit [s]	1.16	0.80	0.84	1.20	0.80	1.28	0.84	1.12	1.44

Trotz der großen Differenz zwischen minimaler und maximaler Reaktionszeit ist die Streuung der Werte in dieser Übernahmephase insgesamt als eher gering anzusehen (siehe Anhang B.2). Die gemessenen Reaktionszeiten liegen in einem Bereich, der nach Schmidtke (1993) bei einer Reaktion auf einen auditiven Reiz zu erwarten ist. Damit entsprechen sie auch der zugrunde gelegten Reaktionszeit, mit der die Berechnung der Übernahmedauer auf Basis einer Handlungsablaufanalyse durchgeführt wurde.



Das Ende der zweiten Übernahmephase war gekennzeichnet durch den Beginn der ersten Blickzuwendung auf die Szenerie. Erst mit dem Ende dieser Übernahmephase begann die Informationsaufnahme aus der Umwelt und damit der Aufbau eines Bewusstseins über die räumlichen und zeitlichen Gegebenheiten der aktuellen Situation. Abbildung 6-33 zeigt die mittleren Dauern von der Übernahmeaufforderung bis zum ersten Blick auf die Szenerie.

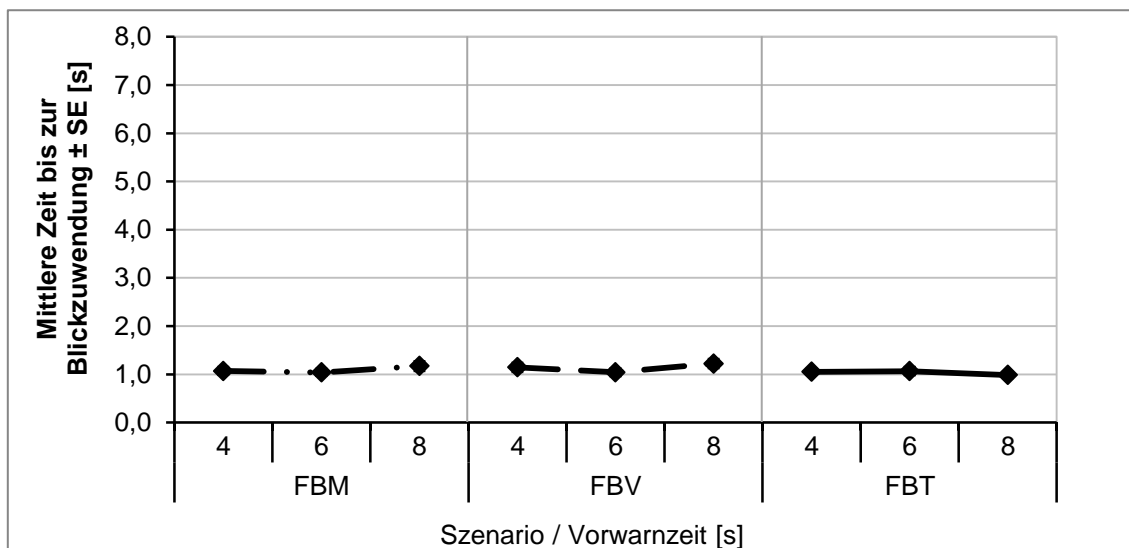


Abbildung 6-33: Mittlere Zeit bis zur ersten Blickzuwendung auf die Fahrscene (Beginn der Informationsaufnahme). Darstellung in Abhängigkeit des gefahrenen Szenarios und der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit ($N = 32$). Mittelwerte und Standardfehler sind Tabelle 6-18 zu entnehmen.

Analog zur Auswertung der Reaktionszeiten ergibt sich auch hier weder für den Faktor „Szenario“ ($F_{Sz}(2, 58) = 1.785, p = .180, \eta^2 = .02$) noch für den Faktor „Vorwarnzeit“ ($F_{Vz}(1.66, 48.06) = 2.128, p = .138, \eta^2 = .03$) ein statistisch signifikantes Ergebnis. Auch eine Interaktion der Faktoren ist nicht nachzuweisen ($F(2.17, 62.87) = .788, p = .469, \eta^2 = .02$). Da wie oben erwähnt die Informationsaufnahme erst im Anschluss an diese Phase begann, verfügten die Probanden zu diesem Zeitpunkt über kein Wissen bezüglich des Szenarios und der zur Verfügung stehenden Übernahmezeit. Bis zum Ende dieses Abschnitts des Übernahmeprozesses, stellte sich jede Übernahmeaufforderung für die Probanden gleich dar. Für die Zeit bis zum ersten Blick auf die Szenerie ergibt sich dadurch unabhängig von den Einflussfaktoren ein Durchschnittswert von 1.1 Sekunden. Wie bei der ersten Übernahmephase (Reaktion) entspricht die gemessene Dauer in etwa dem, anhand von Literaturwerten errechneten Wert von 0.8 bis 1.0 Sekunden. Bis zum Ende dieser Phase liefern die rechnerisch ermittelten Werte demnach eine gute Näherung der tatsächlich auftretenden Zeitdauern. Neben den Mittelwerten und den Standardfehlern sind die minimalen und maximalen Dauern bis zum Ende dieser Phase in Tabelle 6-18 dargestellt. Bei der schnellsten Versuchsperson fand die erste Blickzuwendung bereits 0.28 Sekunden



nach Ausgabe der Übernahmeaufforderung statt. Demgegenüber steht eine maximale Dauer von 2.92 Sekunden. Das bedeutet, dass der betreffende Proband fast 3 Sekunden verstreichen ließ, bevor er mit der Orientierung in der Umgebung begann.

Tabelle 6-18: Mittelwerte und Standardfehler sowie minimale und maximale Zeiten bis zur ersten Blickzuwendung in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“.

Szenario	FBM			FBV			FBT		
	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s
Vorwarnzeit	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s
Mittelwert [s]	1.07	1.04	1.17	1.15	1.04	1.22	1.05	1.07	0.99
Standardfehler [s]	0.09	0.08	0.11	0.10	0.08	0.10	0.07	0.09	0.07
Min. Reaktionszeit [s]	0.60	0.56	0.56	0.56	0.32	0.48	0.28	0.60	0.40
Max. Reaktionszeit [s]	2.8	2.16	2.88	2.92	1.96	2.8	2.08	2.56	1.88

Insgesamt streuen die Werte der zweiten Übernahmephase mehr als die Werte der Reaktionszeit (siehe Anhang B.2). Da es sich jedoch um einen insgesamt längeren Zeitraum handelt, war dies nicht anders zu erwarten. Die Verteilung der Reaktionszeiten (Übernahmephase I) und der Zeiten bis zur ersten Blickzuwendung (Übernahmephase II) ergibt sich nicht aus den definierten Einflussfaktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“. Den individuell unterschiedlichen Werten liegt vielmehr die grundlegende mentale und körperliche Reaktionsfähigkeit der Probanden zugrunde (Verarbeitungs- und Bewegungsgeschwindigkeit). Auch unterschiedliche Interpretationen der Versuchsinstruktionen hinsichtlich einer komfortablen Übernahme spielen hier eine Rolle. Während einige Versuchspersonen versuchten, schnellstmöglich zu reagieren, gestalteten andere den Übernahmeprozess möglichst komfortabel und ließen sich entsprechend mehr Zeit für die einzelnen Phasen.

Die dritte Phase des Übernahmeprozesses ist erstmals geprägt durch den Einfluss der Informationsaufnahme aus der Umwelt. Da die Blickzuwendung zur Szenerie schneller vonstattengeht als die Bewegung der Hände ans Lenkrad, verfügen die Probanden in dieser Phase zumindest über teilweises Wissen hinsichtlich des Szenarios und der zur Verfügung stehenden Zeit. Die mittleren Dauern von der Übernahmeaufforderung bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Probanden die Hände am Lenkrad hatten, sind in Abbildung 6-34 dargestellt. Mit dem Ende dieser Phase ist die Eingriffsbereitschaft erstmals soweit hergestellt, dass die Probanden die Fahrzeugführung beeinflussen können.

Die in dieser Phase bereits vorhandene Kenntnis über die sich darbietende Übernahmesituation spiegelt sich auch in den statistischen Auswertungen wider. Die Varianzanalyse zeigt für den Faktor „Szenario“ einen tendenziellen Einfluss ($F_{Sz}(2, 56) = 2.903, p = .063, \eta^2 = .06$). Für den Faktor „Vorwarnzeit“ kann ein signifi-



kanter Unterschied nachgewiesen werden ($F_{VZ}(2, 56) = 4.947, p = .011, \eta^2 = .09$). Der Post-Hoc-Vergleich der Übernahmen bei unterschiedlichen Vorwarnzeiten wird jedoch nur für eine Erhöhung von 4 auf 8 Sekunden signifikant ($p = .038$). Eine Verlängerung der Vorwarnzeit von 4 auf 6 Sekunden ($p = .121$) zeigt ebenso keinen Effekt wie eine Erhöhung der Vorwarnzeit von 6 auf 8 Sekunden ($p = .662$). Eine Interaktion der Faktoren existiert nicht ($F(4, 112) = 0.399, p = .809, \eta^2 = .03$).

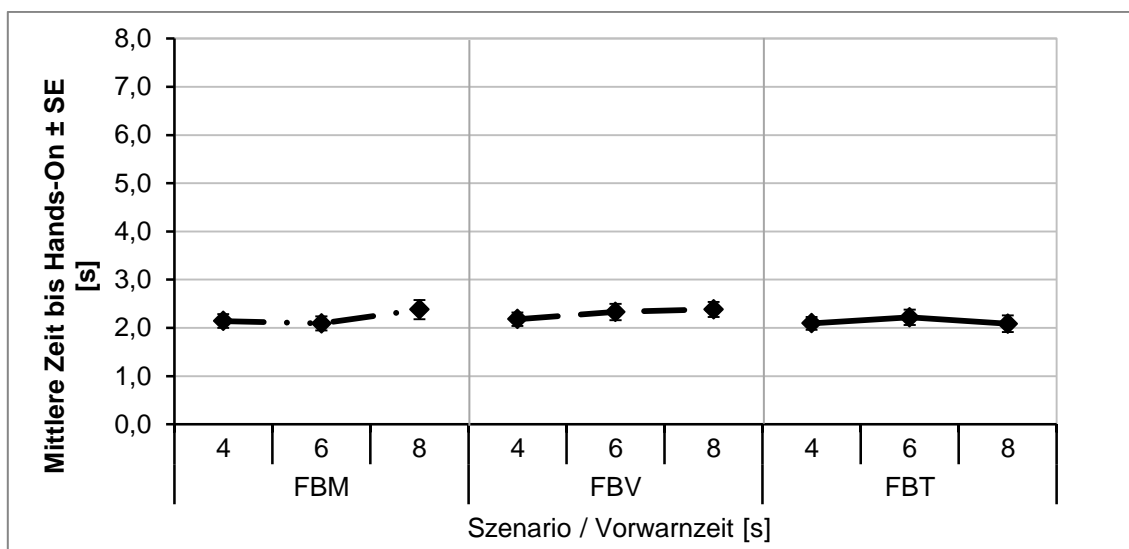


Abbildung 6-34: Mittlere Zeit von der Übernahmeaufforderung bis Hands-On (Beginn der möglichen Einflussnahme auf das Fahrzeug). Darstellung in Abhängigkeit des gefahrenen Szenarios und der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit ($N = 32$). Mittelwerte und Standardfehler sind Tabelle 6-19/Tabelle 6-18 zu entnehmen.

In dieser Übernahmephase nahmen die Versuchspersonen mit zunehmender Vorwarnzeit die Hände langsamer ans Lenkrad. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Probanden nach der Blickzuwendung zur Szenerie in der vorhergehenden Phase Informationen über die Dringlichkeit eines Eingriffs besaßen. Steht wenig Zeit zur Verfügung, ist die Dringlichkeit hoch und es muss schnell reagiert werden. Ist die Systemgrenze noch weiter entfernt, besteht mehr Spielraum für einen Eingriff und die Hände können langsamer ans Lenkrad genommen werden. Dieses Verhalten findet sich auch in einer Untersuchung von Stanczyk und Jurecki (2008) wieder. Im vorliegenden Versuch lagen bei einer Vorwarnzeit von 4 Sekunden die Hände im Mittel nach 2.4 Sekunden am Lenkrad. Diese Zeit erhöht sich bei einer Vorwarnzeit von 8 Sekunden leicht auf einen Durchschnittswert von 2.6 Sekunden. Die Handlungsablaufanalyse ergab für diese Phase eine errechnete Dauer von 2.0 bis 2.2 Sekunden. Die Differenz von ca. 0.4 Sekunden ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei der errechneten Dauer der Prozess der Informationsaufnahme sowie die Entscheidungsphase („Eingreifen erforderlich?“) aufgrund fehlender Literaturwerte nicht berücksichtigt wurden. Wie der Versuch zeigt, ist anzunehmen, dass diese kognitiven Prozessschritte Einfluss auf die Dauer der Übernahme haben.



Ergänzend zur Betrachtung der Mittelwerte zeigt Tabelle 6-19 die minimalen und maximalen Dauern bis zum Ende dieser Phase. Die schnellste Versuchsperson hatte ihre Hände bereits 0.8 Sekunden nach Ausgabe der Übernahmeaufforderung am Lenkrad. Die längste Dauer betrug 6.26 Sekunden und trat im Szenario FBM bei einer Vorwarnzeit von 8 Sekunden auf. Dieser lange Zeitraum ist nicht auf die physischen und kognitiven Fähigkeiten des Probanden zurückzuführen, sondern beruht auf der Kombination aus Szenario und Vorwarnzeit. Wegen der geringen Komplexität des Szenarios bestand kaum Handlungsbedarf für die Probanden. Da die Automation bis zur Systemgrenze weiterarbeitete, reichte es, wenn die Versuchspersonen die Hände erst dann ans Lenkrad nahmen und das Fahrzeug innerhalb des gedachten Fahrstreifens hielten. Zusammen mit der langen Vorwarnzeit von 8 Sekunden ergab sich daraus eine äußerst geringe Dringlichkeit und damit eine lange Dauer bis Hands-On.

Tabelle 6-19: Mittelwerte und Standardfehler sowie minimale und maximale Zeiten bis Hands-On in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“.

Szenario	FBM			FBV			FBT		
	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s
Vorwarnzeit	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s
Mittelwert [s]	2.14	2.09	2.38	2.18	2.33	2.39	2.09	2.22	2.09
Standardfehler [s]	0.14	0.15	0.20	0.14	0.17	0.16	0.13	0.16	0.17
Min. Reaktionszeit [s]	1.40	1.02	1.12	1.11	0.8	1.32	1.12	1.28	1.12
Max. Reaktionszeit [s]	3.71	3.72	6.26	3.78	4.9	3.89	3.23	3.75	4.89

Die individuellen Werte streuen in dieser Phase weit mehr als in den beiden vorangegangenen Phasen (siehe Anhang B.2). Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Betrachtungsdauer immer mehr Einflussfaktoren, wie z. B. Reaktionsfähigkeit, Bewegungsgeschwindigkeit, aber auch persönliche Handlungsstrategien eine immer größere Rolle spielen und die Phasendauer beeinflussen. Insbesondere die Schritte der Informationsaufnahme, das Erkennen des Szenarios und der zur Verfügung stehenden Zeit, aber auch der Entscheidungsprozess, ob und wann die Hände ans Lenkrad genommen werden müssen, wirkt sich in dieser Übernahmephase auf die Verteilung der Werte aus.

Die vierte und letzte der definierten Phasen schließt ab mit der Übernahme der eigentlichen Fahraufgabe durch den Fahrer. Durch Abschalten oder Überstimmen (Lenken / Bremsen) deaktivierten die Probanden das Automationssystem. Im Anschluss daran lag die alleinige Kontrolle über die Fahrzeugführung bei ihnen selbst. Bei der Auswertung der Daten zeigte sich, dass für diese Phase eine inferenzstatistische Analyse der Dauer von der Übernahmeaufforderung bis zur Deaktivierung des Systems nicht sinnvoll ist. Grund dafür ist die Tatsache, dass nicht alle Probanden



eine Deaktivierung des Systems vor Erreichen der Systemgrenze durchführten. Insbesondere im Szenario FBM wurde das Automationssystem von einer großen Anzahl an Probanden nicht überstimmt bzw. abgeschaltet. In diesem Szenario legte ein großer Teil der Versuchspersonen die Hände einfach nur ans Lenkrad und wartete darauf, dass sich das System beim Passieren der Systemgrenze selbst deaktivierte. Dieses Vorgehen war durchaus plausibel, da bis zur Systemgrenze objektiv kein dringender Handlungsbedarf bestand. In Tabelle 6-20 ist festgehalten, wie viele Probanden in den jeweiligen Szenarien und Vorwarnzeiten das System deaktivierten und damit aktiv die Fahraufgabe übernahmen.

Tabelle 6-20: Absolute Anzahl der Probanden, die in Abhängigkeit vom Szenario und der zur Verfügung stehenden Zeit die Fahraufgabe vor Erreichen der Systemgrenze übernahmen, indem sie das System deaktivierten (durch Überstimmen oder abschalten).

Szenario	FBM			FBV			FBT		
	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s
Vorwarnzeit	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s	4 s	6 s	8 s
Deaktivierung	4	3	6	16	28	30	20	30	30

Keiner der Probanden führte in jeder Bedingung (Vorwarnzeit x Szenario) einen Eingriff durch. Während in dem sehr einfachen Szenario FBM die geringe Anzahl der Überstimmungen auf die Einfachheit der Aufgabe zurückzuführen ist, zeigt sich bei den handlungsregulatorisch komplexeren Szenarien FBV und FBT der gegenteilige Effekt. Die Probanden mussten hier eingreifen, um das Szenario erfolgreich zu absolvieren. In manchen Fällen war die dafür zur Verfügung stehende Zeit jedoch nicht lange genug, um die Fahrzeugführung vor Erreichen der Systemgrenze zu übernehmen. Die Probanden hätten in diesen Situationen also mehr Zeit benötigt, um die Aufgabe erfolgreich zu absolvieren.

Abbildung 6-35 zeigt die Mittelwerte der Dauer von der Übernahmeaufforderung bis zur Deaktivierung des Systems. Die Werte basieren auf den in Tabelle 6-20 aufgeführten Probandenzahlen und umfassen daher sehr unterschiedliche Stichprobengrößen.

Aus bereits dargelegten Gründen wurde für diese Übernahmephase keine statistische Analyse durchgeführt. Die deskriptiven Werte lassen jedoch den Schluss zu, dass die zur Verfügung stehende Vorwarnzeit einen deutlichen Einfluss auf die Dauer der Phase hat. Bei 4 Sekunden Vorwarnzeit findet eine Deaktivierung des Systems aufgrund der erhöhten Dringlichkeit deutlich früher statt als bei einer Vorwarnzeit von 6 bzw. 8 Sekunden. Diese Beobachtung deckt sich erneut mit dem Prinzip der Risikozeit von Stanczyk und Jurecki (2008). Eine Aussage hinsichtlich des Einflusses des Szenarios ist anhand der dargestellten Mittelwerte nur schwer möglich. Tendenziell müsste dieser Einfluss jedoch auf Basis der grafischen Darstellung eher



verneint werden. Grundsätzlich ist bei der Interpretation der Mittelwerte zu beachten, dass es sich bei den jeweiligen Stichproben um die schnellsten Versuchspersonen aus der 32-köpfigen Gesamtstichprobe handelt. Die Probanden, die sich bewusst gegen ein Eingreifen entschieden und diejenigen, die zu langsam dafür waren, sind in den Stichproben nicht enthalten. Die Angabe einer mittleren Dauer dieser Übernahmephase anhand der vorliegenden Daten ist daher nicht sinnvoll.

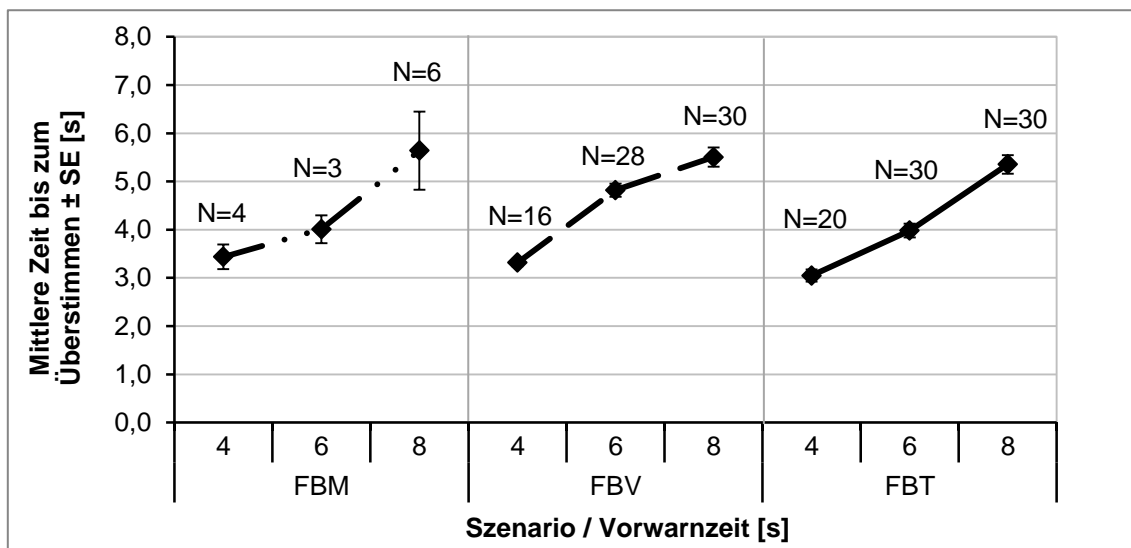


Abbildung 6-35: Mittlere Zeit von der Übernahmeaufforderung bis zur Deaktivierung des Systems (vollständige Übernahme der Fahraufgabe). Darstellung in Abhängigkeit des gefahrenen Szenarios und der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit. Mittelwerte und Standardfehler sind Tabelle 6-21/Tabelle 6-18 zu entnehmen.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der letzten Übernahmephase ist der Unterschied der Standardfehler auffällig (Tabelle 6-21). Diese sind bei Szenario FBM und hier besonders in Kombination mit der Vorwarnzeit von 8 Sekunden erkennbar größer als bei den anderen Szenarien. Diese Abweichung begründet sich hauptsächlich in der stark unterschiedlichen Stichprobengröße, die den Standardfehler beeinflusst. Eine detailliertere Darstellung der Werteverteilung bzw. der Streubreite ist Anhang B.2 zu entnehmen.

Tabelle 6-21: Mittelwerte und Standardfehler sowie minimale und maximale Zeiten bis zum Überstimmen in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“.

Szenario	FBM			FBV			FBT		
	4s	6s	8s	4s	6s	8s	4s	6s	8s
Vorwarnzeit	4s	6s	8s	4s	6s	8s	4s	6s	8s
Mittelwert [s]	3.44	4.01	5.64	3.32	4.82	5.51	3.05	3.98	5.35
Standardfehler [s]	0.25	0.29	0.81	0.08	0.14	0.20	0.13	0.14	0.19
Min. Reaktionszeit [s]	2.68	3.68	3.31	2.84	3.55	3.41	1.92	1.89	3.56
Max. Reaktionszeit [s]	3.76	4.59	7.51	3.71	5.97	7.9	3.92	5.5	7.64



Basierend auf den Ergebnissen, die in diesem Kapitel vorgestellt wurden, kann die in Abbildung 6-26 dargestellte Grafik der einzelnen Übernahmephasen um die ermittelten Mittelwerte erweitert werden (Abbildung 6-36).

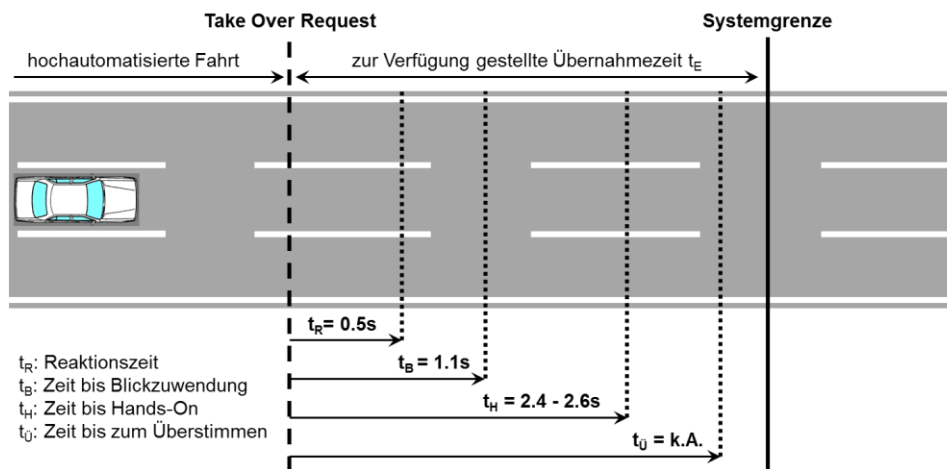


Abbildung 6-36: Einzelphasen des Übernahmeprozesses und deren Dauer, von der Übernahmearbeit bis zur Übernahme der Fahraufgabe.

Eine fundierte Angabe der Dauer der vierten Phase, d. h. der Zeit bis zum Überstimmen, ist aus den erwähnten Gründen nicht möglich.

6.2.4 Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Resultate zeigen, dass ein deutlicher Unterschied zwischen den bisher im Fahrzeugkontext gemessenen Reaktionszeiten und der Zeit, die für eine Übernahme der Fahraufgabe benötigt wird, besteht. Letztere ist aufgrund der wesentlich höheren Anforderungen in Bezug auf Informationsverarbeitung und -umsetzung deutlich länger. Der Versuch liefert erste Anhaltspunkte für den zeitlichen Rahmen einer primär komfortablen Übernahme und zeigt einen methodischen Ansatz den Übernahmeprozess zu evaluieren. Die Ergebnisse der Überprüfung der aufgestellten Hypothesen sind in Tabelle 6-22 zusammengefasst.



Tabelle 6-22 Teil 1: Zusammenfassung der Hypothesenüberprüfung. Kreuz: Hypothese muss verworfen werden. Haken: Hypothese muss angenommen werden.

Hypothesen – Zielerfüllung			FBM	FBV	FBT
Vorwarnzeit	H ₀	Mit zunehmender Vorwarnzeit ändert sich die Anzahl an Probanden, die in den jeweiligen Szenarien Fehler machen, nicht.	✓	✗	✗
	H ₁	Mit zunehmender Vorwarnzeit machen weniger Probanden Fehler in den jeweiligen Szenarien.	✗	✓	✓
Hypothesen – Sicherungsverhalten				FBV	FBT
Vorwarnzeit	H ₀	Die Anzahl der Probanden, die nicht in den Innenspiegel / Außenspiegel / über die Schulter blicken, ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.		✗	✓
	H ₁	Die Anzahl der Probanden, die nicht in den Innenspiegel / Außenspiegel / über die Schulter blicken, ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.		✓	✗
	H ₀	Die Anzahl der Probanden ohne Blinkerbetätigung ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.		✓	✓
	H ₁	Die Anzahl der Probanden ohne Blinkerbetätigung ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.		✗	✗
Hypothesen – Komfort			FBM	FBV	FBT
Vorwarnzeit	H ₀	Mit zunehmender Vorwarnzeit ändert sich das Komfortempfinden der Probanden in den jeweiligen Szenarien nicht.	✗	✓	✗
	H ₁	Mit zunehmender Vorwarnzeit wird die Übernahme in den jeweiligen Szenarien komfortabler bewertet.	✓	✗	✓
Szenario	H ₀	Mit zunehmender Szenariokomplexität ändert sich das Komfortempfinden der Probanden nicht.		✗	
	H ₁	Mit zunehmender Szenariokomplexität wird die Übernahme in den jeweiligen Szenarien stressiger bewertet.		✓	



Tabelle 6-22 Teil 2: Zusammenfassung der Hypothesenüberprüfung. Kreuz: Hypothese muss verworfen werden. Haken: Hypothese muss angenommen werden.

Hypothesen – Übernahmephasen			
Vorwarnzeit	H ₀	Die mittlere Dauer bis zur ersten Reaktion ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.	✓
	H ₁	Die mittlere Dauer bis zur ersten Reaktion ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.	✗
	H ₀	Die mittlere Dauer für die erste Blickzuwendung ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.	✓
	H ₁	Die mittlere Dauer für die erste Blickzuwendung ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.	✗
	H ₀	Die mittlere Dauer bis Hands-On ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.	✗
	H ₁	Die mittlere Dauer bis Hands-On ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.	✓
	H ₀	Die mittlere Dauer bis zur Übernahme der Fahraufgabe ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit nicht.	Aufgrund des Probandenverhaltens statistisch nicht belegbar.
	H ₁	Die mittlere Dauer bis zur Übernahme der Fahraufgabe ändert sich mit zunehmender Vorwarnzeit.	
Szenario	H ₀	Die mittlere Dauer bis zur ersten Reaktion ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios nicht.	✓
	H ₁	Die mittlere Dauer bis zur ersten Reaktion ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios.	✗
	H ₀	Die mittlere Dauer für die erste Blickzuwendung ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios nicht.	✓
	H ₁	Die mittlere Dauer für die erste Blickzuwendung ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios.	✗
	H ₀	Die mittlere Dauer bis Hands-On ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios nicht.	✗
	H ₁	Die mittlere Dauer bis Hands-On ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios.	✓
	H ₀	Die mittlere Dauer bis zur Übernahme der Fahraufgabe ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios nicht.	Aufgrund des Probandenverhaltens statistisch nicht belegbar.
	H ₁	Die mittlere Dauer bis zur Übernahme der Fahraufgabe ändert sich mit zunehmender Komplexität des Szenarios.	



Die Analyse der objektiven Daten zeigt, dass im einfachsten Szenario (FBM) – der Rücktransition der Fahrzeugkontrolle auf der Stabilisierungsebene – bereits mit einer Vorwarnzeit von 4 Sekunden eine fehlerfreie Übernahme problemlos ausgeführt wird. Dies ist in den handlungsregulatorisch anspruchsvolleren Szenarien (FBV, FBT) nicht mehr der Fall. Aufgrund der höheren Komplexität durch die notwendigen Fahrstreifenwechselmanöver treten Verhaltensfehler auf. Diese sind sowohl bei der Übernahme aus der automatisierten Fahrt wie auch bei der manuellen Fahrt zu beobachten. Die Verhaltensleistung kann dabei insbesondere anhand der zur Verfügung gestellten Zeiten für die Übernahme differenziert werden. Im Szenario FBV führt die Verengung des Fahrstreifens zu einem notwendigen Fahrstreifenwechsel unter Berücksichtigung des Fremdverkehrs. Da dieser nur in einer Richtung erfolgen kann, entspricht die hierfür benötigte Dauer einer „einfachen Übernahmezeit“ (vgl. Kapitel 3.6). Im Szenario FBT hat der Fahrer zusätzlich die Wahl zwischen drei Fahrspuren. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Alternativen muss hier von einer „Wahlübernahmezeit“ gesprochen werden. Um eine korrekte Entscheidung treffen zu können, muss der Fahrer zur möglichst vollständigen Erfassung aller relevanten Informationen aus seiner Umgebung fähig sein. Hierzu zählt neben den regelbasierten Entscheidungen auch die Orientierung auf der Navigationsebene. Auch wenn die konkrete Ausprägung des generischen Versuchsszenarios in der Realität nicht in dieser Art auftritt, sind ähnliche Entscheidungen (z. B. für einen Fahrstreifen) nötig, wie an einem Autobahnkreuz oder vor einer Straßenkreuzung. Dabei führt, verglichen mit dem manuellen Durchfahren der beiden Situationen, eine Übernahme aus der automatisierten Fahrt erst bei einer Vorwarnzeit von 8 Sekunden zu ähnlich guten Leistungen.

Von besonderer Bedeutung für die Beurteilung der Übernahmequalität ist hier das Kriterium, nach dem eine Übernahme als Erfolg bzw. Misserfolg bewertet wird. Die Anwendung eines kollisionsorientierten Kriteriums (Tönert 2011) zum Beispiel, nach dem ein Überfahren der durchgezogenen Linie unkritisch ist, führt zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen. Damit kann unter anderem auch das Verhalten der Fahrer erklärt werden, die am Autobahnkreuz die Fahrstreifenmarkierungen überfahren, den Spurwechsel aber noch durchführten, obwohl die instruierte und regelkonforme Wahl der Verbleib im eigenen Fahrstreifen gewesen wäre. Dieses Verhalten zeigten auch 3 der 32 Fahrer beim manuellen Durchfahren der Situation. Wertet man die Daten also unter der Annahme aus, dass nur ausgelassene und in die falsche Richtung ausgeführte Fahrstreifenwechsel ein Fail-Kriterium darstellen, so beherrschen die Fahrer den Wechsel auch noch mit einer Vorwarnzeit von 6 Sekunden. Erst bei einer Vorwarnzeit von 4 Sekunden häufen sich die ausgelassenen Spurwechsel signifikant. Da bei der Entwicklung von hochautomatisierten Systemen jedoch zu einem nicht unerheblichem Maß auch mit dem Komfortgewinn argumentiert wird, müssen diese so gestaltet sein, dass der Fahrer stressfrei übernehmen kann. Grundlage da-



für ist nicht nur eine Kollisionsvermeidung, sondern auch eine Vermeidung von potenziellen Ordnungswidrigkeiten oder stressbehafteten Manövern (z. B. Überfahren von durchgezogenen Leitlinien).

Hinsichtlich des Sicherungsverhaltens, also der Anwendung von Sicherungsblicken in die Spiegel bzw. über die Schulter sowie der Absicherung des Fahrstreifenwechsels durch eine Blinkerbetätigung, zeigt sich kaum ein Einfluss der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit. Es scheint hier eher individuelle Vorgehensstrategien zu geben, die von den Probanden unabhängig von der Übernahmezeit befolgt werden. Diese hoch geübten Handlungsmuster laufen fertigkeitstypisch und quasi-automatisiert ab, ohne dass sie gezielt vom Fahrer selbst gesteuert werden. Bei einer länger andauernden Nutzung automatisierter Fahrzeugführung besteht durchaus die Möglichkeit, dass sich diese Strategien ändern und eingeübte Handlungsmuster verloren gehen. Ein Nachweis dieser Annahme ist jedoch aufgrund der relativ kurzen Dauer des Versuches nicht möglich.

Hinsichtlich der subjektiven Bewertung der Szenarien wird eine steigende Komplexität der Szenarien generell zunehmend als unkomfortabler empfunden. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn z. B. im Szenario FBT eine Fülle von Informationen auf wissensbasierter Ebene zu berücksichtigen sind. Insbesondere unter diesen Umständen führt eine Reduzierung der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit zu einer starken Verschlechterung des Komfortempfindens. Als besonders schwerwiegend zeigt sich hier die Verkürzung der Vorwarnzeit von 6 auf 4 Sekunden. Diese führt zu deutlich schlechteren Bewertungen durch die Probanden. Gleichzeitig kann durch eine Verlängerung der Vorwarnzeit von 6 auf 8 Sekunden das Komfortempfinden nicht nachweisbar gesteigert werden. Eine Übernahmezeit von 6 Sekunden wird also nicht bedeutend weniger komfortabel empfunden, als dies bei 8 Sekunden Übernahmezeit der Fall ist. Allerdings hängt diese Wertung davon ab, wie sich das jeweilige Szenario bei der Übernahme darstellt. Dies könnte auch die Bewertung für das Szenario FBV erklären, in dem sich der vermutete Zeit-Effekt nicht nachweisen lässt. Obwohl die objektiven Daten in diesem Szenario zeigen, dass bei einer Vorwarnzeit von 4 Sekunden 27 der 32 Fahrer nicht rechtzeitig mit dem Fahrstreifenwechsel begannen, sinkt die Komfortbewertung nicht nachweisbar ab. Es hat den Anschein als würden die Probanden den verspäteten Fahrstreifenwechsel akzeptieren. Dies ist darauf zurück zu führen, dass mit dem Pannestreifen eine „Auslaufzone“ zur Verfügung stand und Kollisionen mit der Leitplanke oder anderen Hindernissen in diesem Szenario kaum möglich waren. Demzufolge wurde auch bei einem zu spät eingeleiteten Fahrstreifenwechselmanöver die Situation nie kritisch genug, um sich deutlicher auf das Komfortempfinden auszuwirken. Es bleibt jedoch zu diskutieren, inwiefern ein absoluter Grenzwert zu finden ist, mit dem beurteilt werden kann, ob sich eine Übernahme für den Fahrer akzeptabel darstellt oder nicht. Unter Berücksichtigung von Szenarien wie dem der Fahrbahnteilung führt ein Entscheidungsprozess mit vie-



len Freiheitsgraden jedoch generell zu einer durchweg eher als stressig abgegebenen Wertung. Es ist anzunehmen, dass hochkomplexe Szenarien, wie sie in der Realität z. B. an Autobahnkreuzen vorkommen können, bereits bei rein manueller Fahrt einen hohen Stressfaktor haben. Ein absoluter Grenzwert für die subjektive Komfortbeurteilung hat daher keine Aussagekraft bezüglich der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit. Weitaus wichtiger ist demgegenüber die in dieser Arbeit vorgenommene Relativbewertung. Diese erlaubt die Ableitung eines Grenzwertes für die Übernahmezeit unter spezieller Berücksichtigung des empfundenen Komforts. Dementsprechend sollte die zur Verfügung gestellte Zeit unter Voraussetzung der Worst-Case-Betrachtung mindestens 6 Sekunden betragen. Inwiefern eine Übernahme bei einer Vorwarnzeit von 6 Sekunden ähnlich komfortabel empfunden wird, wie die rein manuelle Bewältigung eines Szenarios, müssen weitere Untersuchungen zeigen, die das Ziel verfolgen, Aussagen zum Komfortgewinn während hochautomatisierter Fahrt zu erhalten.

Ein sehr vielversprechendes Ergebnis hinsichtlich der Entwicklung zukunftsfähiger Übergabe-/Übernahme-Konzepte zeigt die Betrachtung der einzelnen Übernahmephasen und deren Dauern. So liefert der Versuch wertvolle Informationen, mit welchem Zeitbedarf und welcher interindividuellen Streuung bei den einzelnen Aspekten des Übernahmeprozesses zu rechnen ist. Da dieser jedoch eine starke Abhängigkeit von verschiedensten Faktoren wie z. B. der Nebentätigkeit besitzt, wiegt eine weitere Erkenntnis des Versuches viel schwerer. Wie in Tabelle 6-23 dargestellt ist, zeigt eine Gegenüberstellung der errechneten Zeiträume und der tatsächlich gemessenen Werte überraschend gute Übereinstimmungen. Für die Berechnung der einzelnen Phasen kann die in Abbildung 6-23 dargestellte, ursprünglich für die Berechnung des gesamten Übernahmeprozesses gedachte, Handlungsablaufanalyse herangezogen werden

Tabelle 6-23: Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen Zeitdauern für die einzelnen Übernahmephasen. Die Berechnung basiert auf der Handlungsablaufanalyse des Übernahmeprozesses.

Phase	Berechnung	Messung
Reaktion	0.5 s	0.5 s
Blickzuwendung	0.8 -1.0 s	1.1 s
Hands-On	2.0 – 2.2 s	2.4 – 2.6 s
Übernahme	3.1 – 3.5 s	3 – 6 s

Die gemessenen Werte sind zwar generell etwas länger als deren errechnete Pendanten, die Abweichungen erweisen sich allerdings als äußerst gering. Für die Auslegung eines Warn- bzw. Transitionskonzeptes bedeutet dies, dass die notwendige Rückkehrzeit des Fahrers unter Umständen berechnet oder zumindest abgeschätzt



werden kann, wenn der Fahrerzustand (z. B. Art der Nebentätigkeit, Blickrichtung) und die Fahrerleistungsfähigkeit (z. B. Alter, Müdigkeit) bekannt sind. Im Versuch wurde der Fahrerzustand über die Anweisung zur Nebenaufgabenbearbeitung künstlich konstant gehalten. Im Realfahrzeug müsste diese Information über Innenraumsensorik zur Fahrerbeobachtung akquiriert werden. Wie die theoretische Berechnung der Phasenzeiten zeigt, sind nicht immer alle Einzelschritte des Handlungsablaufes bekannt. Insbesondere der Zeitbedarf für die Informationsaufnahme und –verarbeitung muss in solchen Übernahmesituationen durch weitere systematische Untersuchungen näher bestimmt werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass das Verständnis für die Situation und die notwendigen Handlungen aufgrund der Out-of-the-Loop-Problematik unter Umständen völlig neu aufgebaut werden müssen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine Verallgemeinerung der identifizierten Übernahmezeiten aufgrund methodischer Einschränkungen nicht ohne Validierung in Realfahrten möglich ist. Der Versuch wurde in einem statischen Fahrsimulator unter Einsatz künstlicher „worst-case“ Bedingungen durchgeführt, in denen sich der Fahrer völlig aus der Fahraufgabe zurückzieht. Es ist fraglich, inwiefern dies im realen Verkehr – selbst beim hochautomatisierten Fahren – mit realem Gefährdungspotenzial tatsächlich der Fall wäre. Zudem wurden die Probanden zu Beginn des Versuches angewiesen, die Übernahme für sich möglichst komfortabel zu gestalten und Notfallmanöver zu vermeiden. Da der gesamte Versuch darauf ausgelegt war, die für eine komfortable Übernahme notwendigen Zeiten zu messen, ist damit zu rechnen, dass der Mensch potenziell in der Lage wäre, den Übernahmevorgang schneller durchzuführen. Es gilt also zu berücksichtigen, dass die in diesem Versuch gemessenen Zeiten nicht notwendigerweise den Zeitraum widerspiegeln, den der Fahrer für die Übernahme tatsächlich benötigt. Aufgrund des Versuchsdesigns und der Instruktionen an die Probanden handelt es sich vielmehr um die Zeit, die sich ein Fahrer für die Übernahme nehmen möchte. Somit liefert der Versuch erste Anhaltspunkte für den zeitlichen Rahmen eines komfortablen Übernahme-Prozesses unter Berücksichtigung von Controllability-Aspekten.



7 Zusammenfassung und Diskussion

7.1 Ausgangssituation

Wie eingangs erwähnt, nehmen Anzahl und Funktionsumfang von Fahrerassistenzsystemen immer weiter zu, mit dem Fernziel autonom fahrender Fahrzeuge (vgl. Berger & Rumpe 2008). Die mit dieser Entwicklung verbundene Entlastung des Fahrers von der Fahraufgabe bietet eine Reihe unbestreitbarer Vorteile. Neben steigendem Fahrkomfort sind auch Verbesserungen, wie die Aufrechterhaltung der individuellen Mobilität im hohen Alter, nicht von der Hand zu weisen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit die Verkehrssicherheit zu verbessern, indem die Auftrittswahrscheinlichkeit menschlicher Fehler als Unfallursache reduziert wird (Hoeger et al. 2009). Allein die Tatsache, dass menschliches Versagen mit einem Anteil von 90 % derzeit die mit Abstand häufigste Unfallursache ist (Schlag 2004), zeigt das grundsätzliche Potenzial, das sich durch eine Automatisierung der Fahraufgabe bietet. Demgegenüber muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass sich der Mensch aufgrund seiner Flexibilität und Anpassungsfähigkeit hervorragend als Problemlöser eignet und kritische Situationen unter Umständen besser lösen kann als eine Automation.

Wie in anderen Domänen, in denen das Mensch-Maschine-System automatisiert wurde (z. B. Produktion und Luftfahrt), stehen den positiven Auswirkungen auch im bodengebundenen Verkehr negative Nebeneffekte gegenüber (Endsley & Kiris 1995, Bainbridge 1983). Das Problem besteht darin, dass sich mit steigenden Automationsgraden die Aufgabe des Fahrers wandelt. Die aktive Interaktion mit dem Fahrzeug wird ersetzt durch eine Überwachung des Systems mit gelegentlichen Eingriffen zur Änderung von Sollvorgaben für die Automation oder zur Parametrierung der Systemfunktionen. Im Zuge dieser Entwicklung besteht zunehmend die Gefahr, dass der Fahrer seine Aufmerksamkeit und Aktivierung reduziert (vgl. Buld et al. 2002). Dadurch kann unter Umständen die Aufrechterhaltung einer adäquaten mentalen Repräsentation der Situation beeinträchtigt werden, der Fahrer ist sich seiner Situation also nicht mehr vollständig bewusst (vgl. Endsley 1995a). Solange der Automat fehler- und ausfallfrei funktioniert sowie innerhalb seiner Systemgrenzen arbeitet, stellt dies kein Problem dar und es stehen die genannten Vorteile der Automationsunterstützung im Vordergrund. Realistischerweise muss aber in mittel- bis langfristiger Zukunft damit gerechnet werden, dass es Situationen geben kann, in denen das System Fehler macht, einzelne Systemkomponenten ausfallen oder Szenarien vorkommen, die im Funktionsumfang des Systems nicht enthalten sind. Berücksichtigt man daher die realistische Annahme, dass der Fahrer auch in Zukunft zumindest teilweise als Rückfallebene zur Verfügung stehen muss, ergeben sich durch seine Herausnahme aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis einige Probleme. Im Interesse der Verbreitung von Automationssystemen und der Verbesserung der Verkehrssi-



cherheit gilt es daher sicherzustellen, dass die Anzahl der mit Hilfe von Automationsystemen verhinderten Unfälle die Anzahl der potenziell durch Automationseffekte neu erzeugten Unfälle übertrifft (vgl. Gasser 2012).

Problemstellung „Automationseffekte“

Anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen der Informationsverarbeitung (Endsley & Kiris 1995) ist ersichtlich, dass eine Reduktion der Aufmerksamkeit bzw. Aktivierung des Fahrers kurzfristig betrachtet zu einem verminderten Situationsbewusstsein („Loss of Situation Awareness“) und damit zu einer verschlechterten Reaktionsfähigkeit im Falle eines notwendigen Eingriffs führen kann. Bei längerfristiger Anwendung automatisierter Fahrfunktionen besteht darüber hinaus die Gefahr, hoch geübte Handlungsmuster, die die Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug auf der Stabilisierungsebene kennzeichnen, zu verlernen („Loss of Skills“). Auch dies kann zu einer Verlängerung von Reaktionszeiten führen, da der Handlungsablauf von der fertigkeitbasierten auf eine höhere Ebene (regelbasiert, wissensbasiert) verlagert und dementsprechend bewusster ausgeführt wird (vgl. Rasmussen 1983, Schiff 1983, Wiener & Curry 1980).

Zusätzliche Problemstellung „Nebenaufgaben“

Ein weiterer Aspekt, der die Fahrerverfügbarkeit negativ beeinflussen kann, ist die Ablenkung durch Nebenaufgaben. Bereits bei der konventionellen, manuellen Fahrt weist eine Reihe von Untersuchungen eine deutlich verschlechterte Reaktionsfähigkeit nach, wenn die Fahrer durch Nebentätigkeiten abgelenkt sind (Young et al. 2003). Zunehmende Bedeutung erhält dieses Problem durch die steigende Anzahl mobiler Endgeräte. Insbesondere bei jungen Fahrern ist eine wachsende Bereitschaft zur Beschäftigung mit nicht fahrrelevanten Informationsmedien festzustellen (Kubitzki 2011). Zusammen mit steigender Automatisierung und der damit verbundenen Entlastung von der Primäraufgabe ist davon auszugehen, dass sich die Nebenaufgabenbearbeitung weiter intensiviert.

Fragestellung

Wie in Kapitel 4.1 dargestellt, sind die Auswirkungen von Automation und Nebenaufgabenbearbeitung auf die Fahrerverfügbarkeit bzw. Fahrerreaktionsfähigkeit unabhängig voneinander bereits mehrfach untersucht worden. Eine ganzheitliche Betrachtung der Kombination beider Einflussgrößen, d. h. des Zusammenspiels aus Automation und Nebenaufgabenbearbeitung, wurde bisher nur ansatzweise durchgeführt. An diesem Punkt setzt die erste in dieser Arbeit vorgestellte Studie an. Sie geht der Frage nach, wie sich, abhängig vom Umfang der Assistenz bzw. Automation, die Intensität einer Nebenaufgabenbearbeitung ändert. Die Auswirkung der auftretenden Aufmerksamkeitsverschiebung – hin zur Nebenaufgabe – auf die Reaktionsfähigkeit des Fahrers wird betrachtet.



Werden die der ersten Untersuchung zugrunde liegenden Überlegungen weitergeführt, ergibt sich eine anschließende Fragestellung: welche Zeit muss dem Fahrer eines hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugs bei maximaler Ablenkung zur Verfügung gestellt werden, um das Fahrzeug z.B. an Systemgrenzen sicher und komfortabel übernehmen zu können? An dieser Stelle steht nicht mehr die eigentliche Reaktionsfähigkeit des Fahrers im Fokus. Es werden komplexe Übernahmeprozesse betrachtet, bei denen die Erlangung eines ausreichenden Situationsbewusstseins und die Herstellung der Reaktionsbereitschaft der eigentlichen Reaktion vorangestellt sind. Die zweite in dieser Arbeit dokumentierte Studie nimmt sich dieser Thematik an, beschreibt eine Methodik zur Untersuchung solcher Übernahmezeiten und liefert erste Hinweise auf den Ablauf und den Zeitbedarf des Übernahmevorgangs.

7.2 Erkenntnisgewinn

Studie 1 - Nebenaufgabenbearbeitung in Abhängigkeit vom Automationsgrad

Wie in der ersten Versuchsreihe gezeigt wurde, steigt die Aufmerksamkeitszuwendung zu einer Nebenaufgabe an, je stärker der Fahrer von der Fahraufgabe entlastet wird. Die durch die Automatisierung der Primäraufgabe „Fahrzeugführung“ frei gemachten Ressourcen werden, zumindest zum Teil, reinvestiert, um die Leistung in der Nebenaufgabe zu steigern. Dadurch wird einerseits die Leistung in der Nebenaufgabe gesteigert, andererseits besteht die Gefahr, die Eingriffsfähigkeit des Fahrers zu verringern, da die Ablenkungswirkung durch die Nebenaufgabe mit höheren Automationsstufen gesteigert wird. Als Beleg dafür können die in höheren Automationsstufen steigenden Reaktionszeiten sowie die wachsende Anzahl der erzeugten kritischen Situationen dienen.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf die Realität ist anzumerken, dass die Absolutwerte dieser Untersuchung vermutlich nicht ohne Weiteres übertragen werden können. Die Probanden sind sich der Tatsache bewusst, dass sie in der virtuellen Umgebung des Fahrsimulators keinen tatsächlichen Gefahren ausgesetzt sind. Diese fehlende Gefährdung schlägt sich in einer sehr intensiven Beschäftigung mit der Nebenaufgabe nieder, die in der Realität vermutlich nicht in demselben Maß auftreten würde. Nichtsdestotrotz zeichnen die ermittelten Ergebnisse ein eindeutiges Bild, das, wenn nicht quantitativ, so doch zumindest qualitativ Rückschlüsse auf das reale Fahrerverhalten erlaubt. Hinzu kommt, dass verglichen mit der monotonen Nebenaufgabe der Studie in der Realität unter Umständen die Ablenkungswirkung durch anspruchreichere Nebenaufgaben (Filme, Spiele, E-Mail) höher ist. Je nach individuellem Automationsvertrauen und persönlicher Risikoeinschätzung kann dies zu einer vergleichsweise stärkeren oder schwächeren Ablenkung beitragen. Grundsätzlich ist aber bei hohen Automationsgraden auch im Realverkehr damit zu rechnen,



dass sich der Fahrer von der Fahraufgabe zurückzieht und sich der Bearbeitung einer Nebenaufgabe zuwendet.

Schlussfolgerung Studie 1

Aus den Ergebnissen der ersten Studie leiten sich hohe Anforderungen an die Funktionalität und Robustheit des Automationssystems bzw. an die zugelassenen Nebentätigkeiten des Fahrers ab. Im Interesse der Verkehrssicherheit kann dem Fahrer nur dann erlaubt werden, sich aus der Fahraufgabe zurückzuziehen und mit Nebenaufgaben zu beschäftigen, wenn sichergestellt werden kann, dass keine unvorhersehbaren Fehler oder Systemausfälle auftreten, die von ihm nicht mehr beherrscht werden können. Weiterhin muss dem Fahrer an vorhersehbaren Systemgrenzen eine ausreichende Zeitreserve zur Verfügung gestellt werden, um das Fahrzeug sicher von der Automation zu übernehmen. Hierbei ist zu beachten, dass der Zugewinn an Komfort einer der Hauptvorteile dieser Systeme und damit auch ein Verkaufsargument ist. Daher sollte die zur Verfügung gestellte Zeitreserve nicht nur für objektiv erfolgreiche Manöver ausgelegt sein, sondern auch eine vom Fahrer zeitlich als angenehm empfundene Rücktransition gewährleisten. Diese Erkenntnis bildet die Grundlage für die zweite Studie.

Studie 2 - Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Autofahren

Die zweite Versuchsreihe liefert Anhaltspunkte, wie lange der erforderliche Zeitraum für eine Rücktransition aus der hochautomatisierten Fahrt bei einem vollständig abgelenkten Fahrer sein muss. Wie die Studie zeigt, ist je nach Komplexität des Szenarios, das vom Fahrer aufgelöst werden muss, eine Zeit von bis zu acht Sekunden nötig. Zwar werden auch bei diesen Vorwarnzeiten die Szenarien noch nicht von allen Probanden erfolgreich aufgelöst, jedoch zeigt sich kein Unterschied mehr im Vergleich zur manuellen Fahrt. Auch bei Letzterer agieren nicht alle Probanden fehlerlos. Eine bessere Leistung ist daher auch mit längeren Vorwarnzeiten kaum zu erzielen. Doch nicht nur der Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Übernahmedauer spielt bei dieser Versuchsreihe eine große Rolle. Besonders die detailliertere Betrachtung der einzelnen Übernahmephasen und deren Dauern liefern vielversprechende Ergebnisse. Von besonderem Interesse sind hier die jeweiligen Zeiträume bis zur ersten Reaktion ($t_R = 0.5$ s), bis zur ersten Blickzuwendung ($t_B = 1.1$ s) sowie die Zeit die der Fahrer benötigt, um die Hände ans Lenkrad zu nehmen ($t_H = 2.4 - 2.6$ s). Frühestens nach Abschluss dieser drei Phasen hat der Fahrer die Möglichkeit, Informationen aus der Umgebung wahrzunehmen und darauf aufbauend in die Fahraufgabe einzugreifen. Eine Gegenüberstellung der, auf Basis einer Handlungsablaufanalyse, theoretisch errechneten Zeiten mit den gemessenen Mittelwerten zeigt gute Übereinstimmungen.



Schlussfolgerung Studie 2

Die im Versuch ermittelten acht Sekunden Vorwarnzeit entsprächen z.B. bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h einer notwendigen Vorausschau der Sensorik von 222 Metern. Dies ist mit derzeit verfügbarer Seriensensorik nicht bzw. nur unter optimalen Bedingungen zu erreichen (ACC ca. 200 m). Die Zeit, die ein Fahrer braucht, um die Fahrzeugführung zu übernehmen, kann demnach bei dem heutigen Stand der Technik nur bei geringeren Geschwindigkeiten gewährleistet werden.

Einschränkend ist anzumerken, dass es für die Anforderungen des Versuches methodisch notwendig war, das Fahrzeug nach der Übernahmeaufforderung mit konstanter Geschwindigkeit weiter fahren zu lassen. Im realen Anwendungsfall kann das Zeitbudget für die Übernahme durch von der Automation initiierte Bremsmanöver erhöht werden und damit der Warnzeitpunkt räumlich näher an die Warngrenze heranrücken. Unter Zuhilfenahme solcher Bremsmanöver besteht unter Umständen die Möglichkeit, dem Fahrer trotz der Reichweitenbegrenzung der Sensorik ausreichend Zeit für die Übernahme zur Verfügung zu stellen.

Aus der Analyse der Übernahmephasen und dem Vergleich mit den theoretisch ermittelten Werten wird deutlich, dass es bei bekanntem Ausgangszustand des Fahrers möglich ist, rechnerisch abzuschätzen, wie lange der Fahrer wahrscheinlich brauchen wird, um Handlungsbereitschaft herzustellen. Auch hier gelten wieder Einschränkungen der Versuchsdurchführung. Während die Studie unter konstanten Bedingungen (hochautomatisierte Fahrt, vollständige Ablenkung) durchgeführt wurde und eine Berechnung daher relativ einfach war, ist davon auszugehen, dass es in der Realfahrt eine ganze Reihe von Faktoren gibt, die Einfluss auf die Übernahmezeit des Fahrers haben können. So ist anzunehmen, dass sich unter anderem der Grad der Ablenkung, die Körperhaltung des Fahrers, die zu erfüllende Fahraufgabe oder die Situationskomplexität auf den Ablauf der Übernahme auswirken können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass es sich beim Vergleich der errechneten und der gemessenen Werte in beiden Fällen um Mittelwerte von Stichproben mit eingeschränkter Größe handelt. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Dauern der einzelnen Phasen interindividuell streuen. Für eine Abschätzung der Übernahmezeit muss deshalb die individuelle Leistungsfähigkeit des einzelnen Fahrers, z. B. basierend auf Alter und körperlicher Leistungsfähigkeit, berücksichtigt werden. Wie die Studie zeigt, kann die Fahrer Verfügbarkeit abgeschätzt werden, wenn diese Informationen bekannt sind.

7.3 Integration in ein Konzept zum Transitionsmanagement

Diese Arbeit liefert einen Beleg, dass die Fahrer Verfügbarkeit, insbesondere in Kombination mit der Bearbeitung von Nebenaufgaben, mit zunehmendem Automationsgrad sinkt. Abhängig von der Entbindung des Fahrers von der Fahraufgabe und der



Intensität der Nebenaufgabenbeschäftigung ergeben sich verlängerte Reaktions- bzw. Übernahmezeiten. Im Sinne einer effektiven und effizienten Realisierung automatisierter Fahrzeuge muss sichergestellt werden, dass sich diese Rückkehrzeiten nicht auf die Verkehrssicherheit auswirken. Es darf dem Fahrer nur erlaubt werden, sich in einem Maß aus der Fahraufgabe zurückzuziehen, das einen rechtzeitigen Eingriff möglich macht. Hinsichtlich dieser Forderung zeigt die vorliegende Arbeit, dass die Fahrerverfügbarkeit und damit die notwendige Rückkehrzeit rechnerisch ermittelt werden kann. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, die Startzeitpunkte notwendiger Übergabe-Übernahme-Prozesse zu identifizieren.

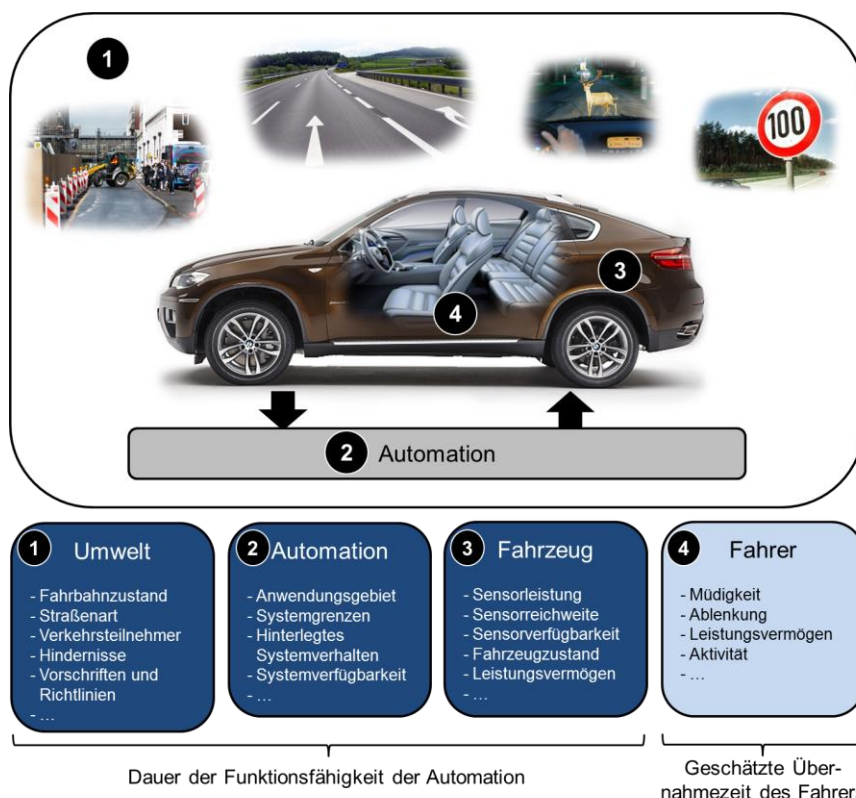


Abbildung 7-1: Ausgewählte Komponenten des Fahrer-Automation-Fahrzeug-Systems die für eine rechtzeitige Rücktransition der Fahraufgabe an den Fahrer berücksichtigt werden müssen.

Durch eine Einschätzung des Fahrerzustandes kombiniert mit Informationen bezüglich der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs und der Automation sowie einem Wissen über die Verkehrssituation sind die Grundlagen vorhanden, um den Entwurf eines Transitionsmanagements zu erarbeiten. Abbildung 7-1 zeigt die notwendigen Komponenten des Fahrer-Automation-Fahrzeug-Systems, über die Informationen vorliegen müssen, um ein System zur Koordination von Rücktransitionen realisieren zu können.

- **Information über die Umwelt:** Ähnlich wie der Mensch als Fahrer die Umwelt wahrnehmen muss, muss auch die Automation in der Lage sein über die Um-



feldsensorik die Umgebung zu erfassen und ein virtuelles Abbild der Verkehrssituation zu erzeugen.

- **Selbstbewusstsein der Automation:** Geht man davon aus, dass nicht alle möglichen Situationen von der Automation gelöst werden können, ist zu prüfen, ob die im Systemverhalten hinterlegten Handlungsmuster ausreichen, um das bestehende Szenario zu bewältigen. Die Automation muss daher ein Bewusstsein über ihre eigenen Fähigkeiten besitzen.
- **Information über das Fahrzeug/Sensorik:** Die Automation muss Kenntnis darüber haben, mit welcher Vorausschauzeit und welcher Sicherheit Szenarien und deren Entwicklung prädiziert werden können.
- **Information über den Fahrer:** Gleicht man diese Informationen mit der Bestimmung der Fahrer Verfügbarkeit ab, kann abgeschätzt werden, ob und zu welchem Zeitpunkt der Fahrer in den Regelkreis zurückgeholt werden muss. Dazu müssen Informationen über die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des Fahrers und seine aktuelle Verfügbarkeit vorhanden sein.

Mithilfe der beschriebenen Informationsquellen müssen drei übergeordnete Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welche Vorausschauzeit ist durch die Automation gewährleistet?
2. Kann die Automation alle in dieser Vorausschauzeit liegenden Szenarien selbstständig bewältigen? Wenn nein, wie lange wird die Automation voraussichtlich noch in der Lage sein, die Fahraufgabe auszuführen?
3. Wie lange wird der Fahrer voraussichtlich brauchen, um in die Fahraufgabe zurückzukehren?

Solange sowohl die unter Punkt 1 wie auch die unter Punkt 2 beschriebenen Zeiträume länger sind, als die notwendige Rückkehrzeit des Fahrers, kann problemlos automatisiert gefahren werden. Nähert sich jedoch eine der ersten beiden Zeiten der notwendigen Rückkehrzeit an, ist der Fahrer in die Fahraufgabe zurückzuholen. Eine Annäherung der Zeiten kann auf zwei Arten geschehen. Vonseiten des Fahrers kann sie dadurch ausgelöst werden, dass er sich weiter aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis herausnimmt und dadurch seine Rückkehrzeit verlängert wird. Seitens des Fahrzeuges können Grenzen in der Umfelderkennung, Änderungen der Umgebungsbedingungen oder das Erreichen von Systemlimits zu einer Verkürzung der von der Automation garantierten Funktionszeit führen.

Wird der Fahrer wieder in die Fahraufgabe zurückgeholt, muss nicht unbedingt eine vollständige Rücktransition durchgeführt werden. Unter Umständen kann die Anforderung einer Überwachungstätigkeit bereits ausreichen. Es ist allerdings sicherzustellen, dass der Fahrer ausreichend in die Fahraufgabe eingebunden ist und über



angemessenes Situationsbewusstsein verfügt, um innerhalb des Zeitraums, in dem die Automation selbstständig arbeitet, übernehmen zu können. Wird durch die Umgebungssensorik eine sehr geringe Umgebungskomplexität identifiziert, für die eine geringere Übernahmezeit erforderlich ist, kann dieser Zeitraum entsprechend angepasst werden. Ebenso verhält es sich mit der Involvierung des Fahrers in die Fahraufgabe. Stellt das System eine starke Einbindung bzw. Beobachtungsleistung des Fahrers fest, kann der Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung näher an den Ort der Systemgrenze gelegt und die Übernahmezeit demnach verkürzt werden.

7.4 Weiterer Forschungsbedarf

Auf dem Weg zu einem derartigen System ist jedoch noch einiges an Forschungsaufwand zu betreiben. Im Folgenden wird beschrieben, welche Hauptaspekte bei weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden müssen.

Innenraumüberwachung als Voraussetzung automatisierten Fahrens

Die Identifizierung der notwendigen Übernahmezeit des Fahrers kann wie in dieser Arbeit vorgestellt abgeschätzt werden, wenn der Fahrerzustand bekannt ist. Dazu muss die primär nach außen gerichtete Sensorik des Fahrzeugs jedoch um eine nach innen orientierte, den Fahrer beobachtende, Komponente erweitert werden. Während die technikgetriebene Entwicklung der Umfeldsensorik zur Bestimmung der Verkehrssituation bereits relativ weit fortgeschritten ist, besteht seitens der Fahrereinschätzung noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, auch wenn einzelne Ansätze und Vorgehensweisen bereits existieren (vgl. Schömig et al. 2011).

So kommen z. B. Fahrerbeobachtungskameras zur Einschätzung der Aufmerksamkeit bzw. Ablenkung des Fahrers (Trefflich 2010) zum Einsatz. Laut Rauch et al. (2010) eignen sich solche Kameras ebenso zur Beurteilung der Müdigkeit. Auch im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass Blickkennwerte, wie z. B. die Blinzelfrequenz oder das Scanningverhalten, Aufschluss darüber geben können, wie sehr der Fahrer in die Fahraufgabe eingebunden ist.

Darüber hinaus eignet sich auch die Analyse von Bedieneingaben am Fahrzeug oder bei einer Nebenaufgabe als Kennwert zur Bestimmung des Fahrerzustandes. Von Damböck et al. (2010b) konnte z. B. gezeigt werden, dass die Griffkraft am Bedienelement sowohl durch die Involvierung in die Fahraufgabe wie auch durch die Bearbeitung von Nebenaufgaben beeinflusst werden kann. Bereits serienmäßig existieren Systeme, die die Fahrermüdigkeit über Lenkwinkelveränderungen präzisieren und den Fahrer im Notfall zu einer Pause auffordern (z.B. Attention Assist von Daimler).

Diese Beispiele zeigen, dass mithilfe vereinzelter Systeme bereits die Möglichkeit besteht, Aussagen über Müdigkeit, Ablenkung und Aktivierung zu treffen. Diese sind jedoch vorwiegend qualitativer Natur. Hinsichtlich der Beurteilung des Fahrerzustan-



des und der Abschätzung der notwendigen Rückkehrzeit sollten zukünftige Forschungsbestrebungen vor allem darauf abzielen, die den Fahrerzustand beschreibenden Werte zu quantifizieren. Da insbesondere die Reaktions- und Übernahmezeiten für das Transitionsmanagement von Interesse sind, bieten sich diese als Beurteilungsgröße an. Eine sinnvolle Ergänzung der vorliegenden Arbeit wäre demnach eine Studie, bei der Müdigkeit, Ablenkung bzw. Aktivierung mit den vorgestellten Methoden gemessen und in Bezug zu den resultierenden Zeiträumen der Übernahmephasen gesetzt werden. Zu untersuchen ist, ob bereits einzelne Messmethoden verlässliche Hinweise auf den Fahrerzustand und damit die Rückkehrzeit geben, oder ob erst eine Kombination mehrerer oder aller Instrumente der Fahrerbeobachtung eine Einschätzung der Rückkehrzeiten ermöglicht.

In der weiteren Entwicklung ist ein System anzustreben, das diese Informationen verwaltet und zusätzliche Informationen wie z. B. die Sitzhaltung des Fahrers (zur Berechnung von Bewegungszeiten) integriert, kontextabhängig interpretiert und daraus einen Zeitwert für die Übernahme aus menschlicher Sicht ableitet.

Bestimmung genauerer Werte für die Zeitabschätzung

Diese Arbeit zeigt die Möglichkeit der rechnerischen Abschätzung bestimmter Phasen des Übernahmeprozesses. Die zugrunde liegenden Bewegungs- und Blickzeiten sind jedoch allgemeinen Literaturquellen entnommen (Schmidtke 1989, Schweigert 2003), die nicht auf die speziellen Anforderungen der Übernahmethematik angepasst sind. Um eine fundierte Grundlage zur genaueren Abschätzung der Übernahmezeiten zu schaffen, ist es empfehlenswert, die speziell im Fahrzeugkontext auftretenden Einzelzeiten für Bewegungs- und Blickvorgänge systematisch zu untersuchen und festzuhalten. Ausgangspunkt dieser Untersuchung können Bedienhandlungen an serienmäßig verbauten Infotainmentsystemen sein. Für diese Tätigkeiten ist es möglich, die notwendigen Bewegungsräume (z. B. Bewegung der Hand vom zentralen Bedienelement zum Lenkrad) oder Blicksprünge (z. B. Dauer der Sakkade vom zentralen Informationsdisplay auf die Fahrszene) zu definieren und den entsprechenden Zeitbedarf zu ermitteln.

Da zukünftig die Nutzung mobiler Endgeräte auch im Fahrzeug eine immer größere Rolle spielen kann, muss im weiteren Verlauf das zukünftige Ausmaß der Aufgabebearbeitung auf Fremdgeräten abgeschätzt und die möglichen resultierenden Bewegungsräume und Blicksprünge identifiziert werden. Basierend auf dem dadurch geschaffenen Katalog relevanter Nebentätigkeiten können die Bewegungs- und Blickzeiten experimentell ermittelt und in Look-Up-Tables hinterlegt werden. Da davon auszugehen ist, dass die individuellen Eigenschaften des Menschen starken Einfluss auf Reaktions- und Bewegungszeiten haben, ist bei der Erstellung der Referenzwerte auf eine Einteilung nach Leistungsfähigkeit (z. B. Alter, Bewegungseinschränkungen) zu achten. Das Vorgehen stellt keine hohen Ansprüche an vorhandene Technik (Si-



mulation, Automation), da es sich nur um die Ermittlung von Bewegungs- und Blickzeiten handelt. Um eine solide Datenbasis zu schaffen, muss jedoch auf eine ausreichende Versuchspersonenanzahl geachtet werden. Ob dieser Ansatz sinnvolle Ergebnisse liefert, ist eine Forschungsfrage, die es in Zukunft zu klären gilt.

Identifikation des Zeitbedarfs bis zum Eingriff und für Manöver

Die vorliegende Arbeit beleuchtet detailliert die Dauer der drei Phasen des Übernahmeprozesses bis zur Herstellung der Eingriffsbereitschaft (Reaktion, Blickzuwendung, Hands-On). Darüber hinaus wird auch die Phasendauer bis zur vollzogenen Übernahme der Fahraufgabe (4. Phase) gemessen. Es ist festzustellen, dass die Zeit, die der Fahrer sich nimmt bis er aktiv in die Fahraufgabe eingreift, stark von den äußeren Umständen abhängt. Die Szenariokomplexität und insbesondere die empfundene Dringlichkeit haben Auswirkung darauf, ob der Fahrer die Fahraufgabe früher oder später übernimmt.

Rechnerisch abgeschätzt werden kann also in erster Linie der Zeitpunkt, ab dem der Fahrer die Eingriffsbereitschaft hergestellt hat. Wie viel Zeit er sich anschließend lässt, um tatsächlich einzugreifen, und welche Dauer das Manöver selbst in Anspruch nimmt, ist stark vom Kontext und den individuellen Fahrfertigkeiten abhängig. Bisher existieren keine Daten zur Abschätzung dieser Zeit. Um den Übernahmeprozess strukturieren und gestalten zu können, ergibt sich die Notwendigkeit einer systematischen Betrachtung dieses Zeitraums von der Eingriffsbereitschaft bis zum ersten aktiven Eingriff. Dabei gilt es, die beiden oben angeführten Faktoren Szenariokomplexität und Risikozeit zu berücksichtigen. Die vorliegende Arbeit liefert erste Erkenntnisse dazu. Weiterführende Untersuchungen sind jedoch notwendig.

Zusätzlich zur Betrachtung des ersten aktiven Eingriffs empfiehlt sich eine Untersuchung des Zeitbedarfs unterschiedlicher Fahrmanöver im Anschluss an die Übernahme. Neben den vier Phasen bis zum ersten aktiven Eingriff ist das zu absolvierende Manöver mitbestimmende Komponente des Übernahmeprozesses und hat Einfluss auf die zur Verfügung zu stellende Zeit. Durch die Kombination der vier Übernahmephasen und dem Wissen über das notwendige Fahrmanöver kann der Übernahmezeitpunkt festgelegt werden. Falls das vom Fahrer auszuführende Manöver von der Automation nicht eindeutig bestimmt werden kann, muss eine ausreichende Sicherheitsreserve berücksichtigt werden. Hier könnte z. B. die gefundene Übernahmezeit von acht Sekunden als Mindestzeit für den kompletten Übernahmeprozess angesetzt werden.

7.5 Von ADAS zur Kooperation

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden sowohl die Vor- wie auch die Nachteile der Entwicklung hin zu mehr Automation im Fahrzeug dargelegt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei der Auslegung automatisierter Fahrzeuge eine Reihe



von Aspekten zu berücksichtigen ist. Aufgrund der enormen technischen Anforderungen an eine vollständig autonome Fahrzeugführung kann die Evolution auf diesem Weg nur schrittweise erfolgen.

Den ersten Schritt stellen konventionelle Fahrerassistenzsysteme dar. Diese zeichnen sich durch eine Unterstützung des Fahrers aus, ohne dabei auf eine Umgebungserfassung zurückgreifen zu müssen. Die Wahrnehmung der Sensorik beschränkt sich auf Daten, die am Fahrzeug selbst gemessen werden können (z. B. Raddrehzahl). ADAS hingegen nehmen zusätzlich die Umgebung wahr und können diese im Rahmen ihrer Funktionalität interpretieren. Diese zweite Stufe repräsentiert den aktuellen Stand der Technik, der weiterhin geprägt ist durch eine bleibende Einbindung des Fahrers in die Fahraufgabe.

Oberstes Ziel einer weiterführenden Fahrzeugautomation muss es sein, die Vorteile zu nutzen, ohne die Nachteile zum Tragen kommen zu lassen. Der durch Automation potenziell erreichbare Sicherheitsgewinn darf nicht durch „Automationsunfälle“ ad absurdum geführt werden. Abhilfe kann hier ein kooperatives Zusammenwirken von Automation und Fahrer schaffen (vgl. Bengler & Flemisch 2011, Flemisch et al. 2013). Im Sinne einer Parallelschaltung können sich die Stärken von Fahrer und Automation ergänzen, wodurch die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems steigt. Ein weiterer Aspekt der kooperativen Fahrzeugführung ist dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrer, je nach Zustand und Fähigkeiten seiner selbst bzw. der Automation, mehr oder weniger in die Fahraufgabe einbezogen werden kann (vgl. Flemisch 2008b). Basierend auf der Erkenntnis dieser Arbeit, dass die Fahrer Verfügbarkeit rechnerisch abgeschätzt werden kann, wurde ein Konzept zur Koordinierung der Fahrer involvierung entwickelt und vorgestellt. Die dafür notwendige Innenraum-sensorik zur Fahrerzustandseinschätzung wird als Voraussetzung für eine kooperative Zusammenarbeit zwischen Mensch und Automation angesehen.

Der Abgleich der Fahrer Verfügbarkeit mit der Vorausschauzeit der Automation führt dazu, dass der Fahrer zu jedem Zeitpunkt in der Lage ist, die Fahrzeugführung zu übernehmen, da ihm zu keinem Zeitpunkt erlaubt wird, sich zu weit aus der Fahraufgabe zurückzuziehen. Gleichzeitig wird er, wenn möglich, entlastet und kann die Fahraufgabe guten Gewissens an die Automation abgeben, da er bei Bedarf rechtzeitig zur Übernahme aufgefordert wird. Auf dem Weg zur vollständig autonomen Fahrzeugführung stellt demnach der Zwischenschritt der kooperativen Fahrzeugführung inklusive eines geeigneten Transitionsmanagements eine praktikable Lösung dar, um den in dieser Arbeit dargestellten Reaktionszeitverlängerungen bzw. Übernahmeproblematiken entgegenzuwirken und sie zu entschärfen.



8 Literaturverzeichnis

- Adams, M. J., Tenney, Y. J., Pew, R.W. (1995). *Situation Awareness and the Cognitive Management of Complex Systems*. Human Factors, 37, 85-104.
- AKTIV (2010). *Aktiv Ergebnisbericht*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie & Bundesministerium für Bildung und Forschung. <http://www.aktiv-online.org>
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica* Vol. 19, No. 6, pp. 775-779. Great Britain.
- Baumann, M., Petzoldt, T. & Krems, J.F. (2006). *Situation Awareness beim Autofahren als Verstehensprozess*. MMI-Interaktiv, 11, 43-57.
- Behr (2005). *Physio-Control® schafft gutes Klima in der neuen Mercedes-Benz-S-Klasse*. [Online] 14. September 2005. [Zitat vom 10. Juni 2008.] <http://www.behr.de>
- Bengler, K. & Flemisch, F. (2011). *Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung – grundlegende ergonomische Fragestellungen*. In: Tagungsband 5. Darmstädter Kolloquium: Zukunft der Fahrzeugführung - kooperativ oder autonom?
- Bengler, K., Zimmermann, M., Bortot, D., Kienle, M., Damböck, D. (2012). *Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems*. *it - Information Technology*, 54(4), 157–164.
- Benz, S. (2004). *Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil*. Universität Karlsruhe (TH).
- Berger, C. & Rumpe B. (2008). *Autonomes Fahren – Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge*. *it – Information Technology* 01/2008
- Bergmeier, U. (2009). *Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem – Entwicklung und experimentelle Absicherung*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- Bernotat, R. (1970). *Operation Function in Vehicle Control, Anthropotechnik in der Fahrzeugführung*. *Ergonomics*. 1970, Vol. 13.
- Bibliographisches Institut GmbH (Herausgeber). Duden (2012). *Stichwort: Automation*. <http://www.duden.de/node/756648/revisions/1016364/view>.
- Billings, C.E. (1996). *Human-Centered Aviation Automation: Principles and Guidelines*. NASA Technical Memorandum 110381. National Aeronautics and Space Administration.
- Billings, C.E. (1997). *Aviation Automation*. Mahwah, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.



- Broadbent, D. (1958). *Perception and Communications*. Permagon Press, New York.
- Bubb, H. (1975). *Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- Bubb, H. & Assmann E. (1988). *Head up Display im Kraftfahrzeug – Abschlussbericht*; München, Ingenieurbüro für Ergonomie.
- Bubb, H. (1992). *Menschliche Zuverlässigkeit. Definitionen Zusammenhänge Bewertung*. 1. Auflage. Landsberg: ecomed-Fachverlag.
- Bubb, H. (1993). *Reliability of the driver. A method of driver modelling for evaluation of driver failure*. Kuratorium für Verkehrssicherheit. Salzburg: Safety evaluation of traffic conflicts and other measures; S. 165-178.
- Bubb, H. (2002). *Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 48. s.l.: S. 8-15.
- Bubb, H. (2003). *Fahrerassistenz- primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?* Düsseldorf: VDI-Bericht Nr. 1768: Der Fahrer im 21. Jahrhundert.
- Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., Kaussner, A., Tietze, H., Totzke, I. (2002). *Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit*. Veröffentlichter Abschlussbericht Projekt EMPHASIS: Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen. Würzburg: Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW).
- BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2012). *Verordnung über die Erteilung einer Verwarnung, Regelsätze für Geldbußen und die Anordnung eines Fahrverbots wegen Ordnungswidrigkeiten im Straßenverkehr. Bußgeldkatalog-Verordnung – BkatV*. www.bmvbs.de
- Cain, B. A. (2007). *Review of the Mental Workload Literature*. Toronto, Canada: Defence Research and Development Canada Toronto Human System Integration Section. Report No. : RTO-TRHFM-121-Part-II.
- California Path Project (1997). *Annual Report 1997*. Richmond USA.
- Carsten, O., Lai, F. C. H., Barnard, Y., Jamson A. H., Merat, N. (2012). *Control Task Substitution in Semiautomated Driving: Does It Matter What Aspects Are Automated?* Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 2012 54: 747 originally published online 17 September 2012.



- Castor, M.C. (2003). *Handbook of mental workload measurement*. GARTEUR, Group for Aeronautical Research and Technology in Europe, Flight Mechanics Action Group FM AG13: 164.
- Cody, D. & Gordon, T. (2007). *TRB Workshop on Driver Models: A Step Towards a Comprehensive Model of Driving*. In C. Cacciabue (Ed.) *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments* (pp. 26-42). Springer-Verlag London Limited.
- Daimler System- Attention Assist. <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1144094-49-1151409-1-0-0-0-0-0-14972-7165-0-0-0-0-0-0.html>
- Damböck, D., Flemisch, F., Kienle, M., Kelsch, J., Heesen, M., Schieben, A., Bengler, K. (2009). *Vom assistierten zum hochautomatisierten Fahren - Zwischenbericht aus den Projekten H-Mode und EU-HAVEit*. In: Tagungsband VDI Fahrer im 21. Jahrhundert. Braunschweig.
- Damböck, D., Kienle, M., Bengler, K. (2010a). *Bedienelemente hochautomatisierter Fahrzeuge – Studie zum haptischen Kanal als Kommunikationsmedium*. GfA Frühjahrskonferenz 2010, Darmstadt.
- Damböck, D., Kienle, M., Bengler, K. (2010b). *Die Zügel fest in der Hand halten – Automationsgradumschaltung durch Griffkraftmessung*. In: Tagungsband Useware 2010. Baden-Baden.
- Damböck, D.; Weißgerber, T.; Kienle, M.; Bengler, K. (2012). *Evaluation of a Contact Analog Head-Up Display for Highly Automated Driving*. 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. San Francisco. USA.
- Damos, D.L., John, R.S., Lyall, E.A. (1999). Changes in pilot activities with increasing automation. In R.S. Jensen, B. Cox, J.D. Callister, & R. Lavis (Eds.), *Proceedings of the 10th International Symposium on Aviation Psychology*, 810-815. Columbus, OH: The Ohio State University.
- DoT - Department of Transportation (2011). *Assembly Bill No. 511*.
- Deutsch, J. A. & Deutsch D. (1963). *Attention: Some theoretical considerations*. *Psychological Review*, 70:80-90.
- Deutsches Institut für Normung e. V.. *DIN V 19233: Leittechnik - Prozessautomatisierung - Automatisierung mit Prozessrechnersystemen*. Begriffe
- Donges, E. (1978). *Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*. 1978, 24, S. 98-112.
- Donges, E. (1982). *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. *Automobil-Industrie*, 27:183-190.



- Donges, E. (2009). *Fahrerverhaltensmodelle*. In H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, editors, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 15-23. Vieweg+Teubner.
- Donner, E., Winkle, T., Walz, R., Schwarz, J. (2007). *RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen*. VDA. Technischer Kongress. Sindelfingen 2007.
- Dornhöfer, S. & Pannasch, S. (2000). *Risky Business: Der Gefahr ins Auge geblickt! Ein Beitrag zum Thema Risiko*. Dresden. Online verfügbar unter <http://tu-dresden.de>
- Dorsch, F. (1970). *Psychologisches Wörterbuch*. Gemeinschaftsverlag Felix Meiner Hamburg, Hans Huber Bern.
- Drummond, A. E. (1989). *An overview of novice driver performance issues. A literature review*. Report No. 9. Victoria: Monash University Accident Research Centre
- Eichinger, A. (2011). *Bewertung von Benutzerschnittstellen für Cockpits hochagiler Flugzeuge*. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften.
- Eigel, T., Giebel, T. & Schnieder, E. (2009). *AKTIV IQF: Integrierte Längs- und Querführung durch strukturvariable Regelung*. In: GZVB e. V., Hrsg.: AAET 2009 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig.
- Endsley, M.R. (1988). *Design and evaluation for situation awareness enhancement*. In: *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting (Vol. 1)*, 97-101. Santa Monica: Human Factors Society.
- Endsley, M. R. (1995a). *Toward a theory of situation awareness*. *Human Factors*, 37, 32-64.
- Endsley, M. R. (1995b). *Measurement of situation awareness in dynamic systems*. *Human Factors*, 37, 65-84.
- Endsley, M.R., & Kiris, E.O. (1995). *The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation*. *Human Factors*, 37, 381-394.
- Endsley, M.R., Bolté, B., Jones, D. G. (2003). *Designing for Situation Awareness – An approach to User-Centered Design*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Endsley, M. R., & Kaber, D.B. (1999). *Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task*. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.
- EN ISO 15007-1. *Messung des Blickverhaltens von Fahrern bei Fahrzeugen mit Fahrerinformations- und -assistenzsystemen. Teil 1 Begriffe und Parameter*. Nor-



- menausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Flemisch, F. O., Kelsch, J., Schieben, A., Schindler, J., Löper, C., Schomerus, J. (2007). *Prospective engineering of vehicle automation with design metaphors: Intermediate report from the H-Mode projects*. 7. Berliner Werkstatt für Mensch- Maschine-Systeme. Berlin.
- Flemisch, F. O., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A., Schindler, J. Heesen, M. (2008a). *Cooperative control and active interfaces for vehicle assistance and automation*. FISITA 2008. München.
- Flemisch, F., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A., Schindler, J. (2008b). *Automation spectrum, inner / outer compatibility and other useful human factors concepts for assistance and automation*. In: Human Factors for assistance and automation. Shaker Publishing. Braunschweig.
- Flemisch, F. O., Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T., Schutte, P. C. (2009). *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction* (No. NASA/TM-2003-212672). Hampton: NASA. Langley Research Center.
- Flemisch, F., Bengler, K., Bubb, Heiner, Winner, H., Bruder, R. (2013): *Towards a Cooperative Guidance and Control of Highly Automated Vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire*. Ergonomics, 2013 (accepted).
- Fogarty, C. & Stern, J. A. (1989). *Eye movements and blinks: Their relationship to higher cognitive processes*. International Journal of Psychophysiology, 8, 35-42.
- Fuller, R. (2005). *Towards a general theory of driver behaviour*. Accident Analysis and Prevention 37. p461 - 472
- Gabler Verlag (Herausgeber). Gabler Wirtschaftslexikon (2012). *Stichwort: Automatisierung*.
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/72569/automatisierung-v6.html>
- Gasser, T. M. (2012). *Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*. In: Tagungsband der 5. Tagung Fahrerassistenz, 15./16. Mai, München.
- Geiser, G. (1985). *Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug*. ATZ. 1985, 87: S.74-77.
- Gengenbach, R. (1997). *Fahrerverhalten im Pkw mit Head-Up-Display – Gewöhnung und visuelle Aufmerksamkeit*. Dissertation an der Technischen Universität München.



- Gerrig, R. J., Zimbardo, P. G. (2008). *Psychologie*. 18. Aktualisierte Auflage. Pearson Studium.
- Goldhammer, F. & Moosbrugger, H. (2005). *Aufmerksamkeit*. In S. Schweizer (Hrsg.), *Leistung und Leistungsdiagnostik*. Heidelberg: Springer.
- Gradenegger, B., Rauch, N., Krueger, H.P., Bengler, K. (2010). *Situation awareness in driving with in-vehicle information systems*. In: *Performance Metrics for Assessing Driver Distraction: The Quest for Improved Road Safety*. Editor: Rupp GL. SAE International. Warrendale, Pennsylvania. 217-231.
- Gstalter, H., Fastenmeier, W. (1998). *Ablenkungskritische Situationen. Theoretische Konzepte und praktische Hinweise*. Institut für Angewandte Psychologie. München (Motiv-MMI-AP5-Bericht, Teilprojekt Diagnose & Transfer).
- Hakuli, S. et al. (2009). *Kooperative Automation*. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Hale, A. R., Stoop, J. & Hommels, J. (1990). Human error models as predictor of accident scenarios for designer in road transport systems. *Ergonomics*, 33, 1377 – 1387.
- Hancock, P.A., Simmons, L., Hashemi, L., Howarth, H., Ranney, T. (1999). *The Effects of In-Vehicle Distraction on Driver Response during a Crucial Driving Maneuver*. *Transportation Human Factors*, 4:295-309.
- Hart, S., & Staveland, L. (1988). *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research*. In: P. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 139-183). Amsterdam. North Holland.
- Heißing, B. (2006). *Grundlagen des Kraftfahrzeugbaus*. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik TU München, Umdruck zur Vorlesung.
- Hesse, T., Fricke, N., Flemisch, F., Engström, F., Johansson, E., Varalda, G., Brockmann, M., Rambaldini, A., Kanstrup, L. (2011). *Towards user-centered development of integrated information, warning, and intervention strategies for multiple ADAS in the EU project interactive*. 14th HCI International 2011 Orlando, Conference proceedings.
- Hibberd, D. L., Jamson, S. L., Casten, O. M. J. (2010). *Managing in-vehicle distractions - evidence from the Psychological Refractory Period paradigm*. *Automotive User Interface*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Hoeger, R., Amditis A., Kunert M., Hoess, A., Flemisch, F., Krueger, H.-P., Bartels, A., Beutner, A. (2008). *Highly Automated Vehicles for intelligent Transport: HAVEit Approach*. ITS World Congress, NY, USA, 2008.



- Hoeger R., Amditis A., Zeng H., Hoess A., Flemish F., Bartels A., Jakobsson E. (2009). *Selective automated driving as a pivotal element to solve safety and environmental issues in personal mobility*. Conference Proceedings of the 16th World Congress on IST.
- International Harmonized Research Activities (IHRA) Working Group on ITS (2010). *Design Principles for Advanced Driver Assistance Systems: Keeping Drivers In-the-Loop* (Informal document No. ITS-19-07).
- INVENT (2007). *INVENT Intelligent Traffic and userfriendly technology*. Bundesministerium für Bildung und Forschung. <http://www.invent-online.de>
- Jones, D. G. & Endsley, M. R. (2000). *Overcoming representational errors in complex environments*. Human Factors, 42(3), 367-378.
- Kahnemann, D. (1973). *Attention and Effort*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Kienle, M., Damböck, D., Bubb, H., Bengler, K. (2012). *The Ergonomic Value of a Bidirectional Haptic Interface when Driving a Cooperative Vehicle*. Journal: Cognition Technology & Work (2012).
- KOM - Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2001). *Weissbuch – Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellung für die Zukunft*. Brüssel.
- Kraiss, K.-F. (1994). *99% Langeweile und 1% panische Angst“ – über die Schwierigkeiten beim Umgang mit hochautomatisierten Systemen*. In M. Kerner (Ed.), Technik und Angst. Zur Zukunft der industriellen Zivilisation. Aachen: Verlag der Augustinus Bhg.
- Kraiss, K-F. (1998). *Benutzergerechte Automatisierung – Grundlagen und Realisierungskonzepte*. In: at – Automatisierungstechnik. Band 46. München.
- Krüger, H.-P., Rauch, N., Schoch, S. (2007). *Ermittlung von Fahreraufmerksamkeit aus Fahrverhalten*.
- Kubitzki, Jörg (2011). *Ablenkung im Straßenverkehr – Die unterschätzte Gefahr*. Studie im Auftrag der Allianz Deutschland GmbH.
- Lansdown, T.C., Brook-Carter, N., Kersloot, T. (2004). *Distraction from multiple invehicle secondary tasks: vehicle performance and mental workload implications*. Ergonomics, 41(1):91-104.
- Lange, C. (2008). *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- Lange C., Bubb H., Tönnis M., Klinker G. (2008a). *Sicherheitspotential und Verbrauchsreduzierung durch ein intelligent geregeltes aktives Gaspedal*. In: Ta-



- gungsband der 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 7./8. April, Garching.
- Lange C., Bubb H. de Molina K. (2008b). *Verbrauchsreduktion und Verbesserung der aktiven Sicherheit durch ein aktives Gaspedal*. In: Tagungsband zum 4. TecDay, Aschaffenburg.
- Lee, J.D., & See, K.A. (2004). *Trust in automation: designing for appropriate reliance*. Human Factors, 46, 50-80.
- Lindberg, T. (2011). *Entwicklung einer ABK-Metapher für gruppierte Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation. TU Berlin.
- Luczak, H. (1975). *Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen*. Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 10, Nr. 2, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Manzey, D (1998). *Psychophysiologie mentaler Beanspruchung*. In: Rösler F. (Hrsg) Ergebnisse und Anwendungen der Psychophysiologie. Hogrefe, Göttingen, S. 799-864.
- Marshall, S. P. (2007). *Measures of Attention and Cognitive Effort in Tactical Decision Making*. In C. Malcom, J. M. Noyes & Y. Masakowski (Eds.), Decision Making in Complex Environments (pp. 321-332). Ashgate Publishing.
- Maurer, M. (2009). *Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen*. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Mayhew, D. R. & Simpson, H. M. (1996). *Effectiveness and role of driver education and training in a graduated licensing system*.
<http://www.drivers.com/article/305/> am 15.03.2004
- McClelland, J.L. (1979). *On the Time Relations of Relations of Mental Processes: An Examination of Systems of Processes in Cascade*. Psychological Review, Vol. 86, 4, pp. 287-330.
- Mehler, B., Reimer, B. & Coughlin, J.F. (2012). *Sensitivity of Physiological Measures for Detecting Systematic Variations in Cognitive Demand from a Working Memory Task: An On-road Study Across Three Age Groups*. Human Factors, 54(3), pp. 396-412.
- Merat, N., Jamson, A. H. (2009). *How do drivers behave in a highly automated car?* PROCEEDINGS of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Big Sky. Montana. USA.



- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., Carsten, O. (2012). *Highly Automated Driving, Secondary Task Performance and Driver State*. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 2012 54: 762 originally published online 5 April 2012.
- Metz, B., Schömig, N., Krüger, H.-P. & Bengler, K. (2010). *Situation awareness in driving with in-vehicle information systems*. In G. L. Rupp (Hrsg.), Performance Metrics for Assessing Driver Distraction: The Quest for Improved Road Safety. Chapter 12. Warrendale, Pennsylvania: SAE International.
- Michon, J. A. (1985). *A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do?* [Bucherf.] L. Evans und R.C. Schwing. Human behavior and traffic safety. New York: Plenum Press.
- Moray, N. (1967). *Where is attention limited? A survey and a model*. Acta Psychologica, 27, 84–92.
- Moray, N. (1986). *Monitoring behavior and supervisory control*. In K. Boff, L. Kaufman & J. Thomas (Hrsg.), Handbook of Perception and Human Performance, Vol. II: Cognitive Processes and Performance (S. 40/1–40/51). New York: Wiley.
- Müller, H. J. & Krummenacher, J. (2002). *Aufmerksamkeit*. Kapitel 1c. In: J. Müseler und W. Prinz (Hg.): Allgemeine Psychologie. München: Spektrum Akademischer Verlag, S. 119–177.
- Mumaw, R.J., Sarter, N.B., Wickens, C.D. (2001). *Analysis of Pilots' Monitoring and Performance on an Automated Flight Deck*. Presented at the 11th International Symposium on Aviation Psychology. The Ohio State University; Columbus.
- Naab, K., Reichart, G. (1995). *Driver Assistance Systems for Lateral and Longitudinal Vehicle Guidance-Heading Control and Active Cruise Support*. JSAE Review, Volume 16, Number 2.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology*. San Francisco: Freeman.
- Niederée, U. & Vollrath, M. (2009). *Fahrerassistenzsysteme der Zukunft - Führt der Mensch noch mit?* VDI-Berichte Nr. 2085, VDI Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig.
- Norman, D. A., & Bobrow. D. (1975). *On data-limited and resource-limited processing*. Journal of Cognitive Psychology, 7:44-60.
- Otte, D. (2000). *Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen*. BASt-Bericht F 3. Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH.



- Parasuraman, R. (2000). *Designing automation for human use: Empirical studies and quantitative models*. Ergonomics, 43(7), 931-951.
- Penka, A. (2001). *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*. Dissertation. Technische Universität München.
- Peterman, I. & Kiss, M. (2010). Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition, ATZ April 2010, S. 90-94.
- Petermann, I. & Schlag, B. (2010). Auswirkungen der Synthese von Assistenz und Automation auf das Fahrer-Fahrzeug-System. In: Proceedings of the AAET 2010. Braunschweig. Germany.
- PREVENT (2007). European Commission Information Society and Media.
- Pribram K. H. & McGuinness D. (1975). *Arousal, Activation and Effort in the Control of Attention*. Psychological Review 82: 116-149.
- Rasmussen, J. (1983). *Skills, rules and knowledge; signals, signs and symbols and other distractions in human performance models*. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1983, Bde. Vd. SMC – 13, S. 157-266.
- Rauch, N., Gradenegger B., Krüger, H.-P. (2009). *Darf ich oder darf ich nicht? Situationsbewusstsein im Umgang mit Nebenaufgaben während der Fahrt*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaften, 01/2009, 3-15.
- Rauch, N. (2009). *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext*. Dissertation, Bayerische Julius-Maximilians-Universität, Würzburg.
- Rauch, N., Kausner, A., Krueger, H.-P., Boverie, S., Flemisch, F.O. (2010). *Measures and Countermeasures for impaired driver's state within highly automated driving*. Transport Research Arena Europe 2010. Brüssel.
- Rauch, S., Aeberhard, M., Ardelt, M., Kämpchen, N. (2012). *Autonomes Fahren auf der Autobahn – eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme*. 5. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München.
- Reason, J. (1970). *Skilled Performance*. In D.Wright & A. Taylor (Hrsg.), *Introducing psychology: an experimental approach*. Harmondsworth: Penguin Books.
- Recarte, M. A., Perez, E., Conchillo, A., Nunes, L. M. (2008). *Mental workload and visual impairment: Differences between pupil, blink, and subjective rating*. Spanish Journal of Psychology, 11, 374-385.
- Reichart, G. & Haller, R. (1995). *Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr*. In: Autofahrer und Verkehrssituation, Hrsg. Fastenmeier, W., Verlag TÜV Rheinland, Köln.



- Reimer, B. & Mehler, B. (2011). *The Impact of Cognitive Workload on Physiological Arousal in Young Adult Drivers: A Field Study and Simulation Validation*. *Ergonomics*, 54(10), pp. 932-942.
- Rockwell, T.H. (1971). *Eye movement analysis of visual information acquisition in driving: an overview*. Paper presented at the North Carolina State University, Raleigh.
- Rouse, W.B. & Morris, N. M. (1985). *On looking into the black box: Prospects and limits in the search for mental models* (DTIC #AD-A159080). Atlanta GA: Center for Man-Machine Systems Research, Georgia Institute of Technology.
- Ruchatz, T., Bartels, A., Brosig, S., Effertz, J. (2011). *Die Zukunft der Fahrerassistenz*. In Tagungsband: 5. Darmstädter Kolloquium: Zukunft der Fahrzeugführung – kooperativ oder autonom? Darmstadt.
- Salvucci, D.D. & Macuga, K. L. (2002). *Predicting the effects of cellular-phone dialing on driving performance*. *Cognitive Systems Research*, 3:95-102.
- Sanders, A. F. (1983). *Towards a Modell of Stress and Human Performance*. *Acta Psychologica* 53:61-97.
- Sarter, N. B. & Woods, D. D. (1991). *Situation Awareness: A critical but ill-defined phenomenon*. *International Journal of Aviation Psychology*, 1, 45-57.
- Sarter, N. B. & Woods, D. D. (1995). *How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control*. *Human Factors*, 37, 5-19.
- Saust, F., Wille, J. M., Lichte, B., Maurer, M. (2011). *Autonomous vehicle guidance on Braunschweig's inner ring road within the Stadtpilot project*. In: IEEE - Intelligent Vehicles Symposium 2011, 169 -174.
- Schaller, T., Schielen, J. & Gradenegger, B. (2008). *Stauassistentz - Unterstützung des Fahrers in der Quer- und Längsführung: Systementwicklung und Kundenakzeptanz*. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching bei München.
- Schieben, A., Damböck, D., Kelsch, J., Rausch, H., Flemisch, F.O. (2008). *Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation*. In: Tagungsband „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz“. München.
- Schieben, A. & Flemisch, F. O. (2008). *Who is in control? Exploration of transitions of control between driver and an eLane vehicle automation*. In Tagungsband VDI/VW Tagung Fahrer im 21. Jahrhundert, Wolfsburg.
- Schlag, B. (2004). *Verkehrspsychologie*. Lengerich: Pabst Science.



- Schlick, C., Bruder, R., Luczak, H. (2010). *Arbeitswissenschaft*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 3. Auflage.
- Schmidtke, H., Bubb, H. (1973). *Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept*. In: H. Schmidtke (Hg.): *Ergonomie I. Grundlagen menschlicher Arbeit und Leistung*. München: Hanser-Verlag, S. 116–120.
- Schmidtke, H. (1993). *Der Leistungsbegriff in der Ergonomie*. Ergonomie. Passau: Carl Hanser Verlag München Wien; ISBN 3-446-16440-5.
- Schömig, N., Kaussner, A., Totzke, I. (2011). *Das Out-of-the-Loop Problem beim hochautomatisierten Fahren – Lösungsansätze im EU-Projekt HAVEit*. Forum Fahrerassistenzsysteme. Aschaffenburg.
- Schwalm, M. (2009). *Pupillometrie als Methode zur Erfassung mentaler Beanspruchungen im automotiven Kontext*. Dissertation an der Universität Saarbrücken.
- Schweigert, M. (2003). *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- Sheridan, T.B. (1992). *Telerobotics, Automation and human Supervisory Control*. The MIT Press: Cambridge.
- Shiff, B. (1983). *An experimental study of the human-computer interface in process control*. Unpublished thesis, University of Toronto, Department of Industrial Engineering, Canada.
- Smith, K., Hancock, P.A. (1995). *Situation awareness is adaptive, externally directed consciousness*. *Human Factors*, 37, 137-148.
- Spieß, W. (2011). *Assessment and Support of Error Recognition in Automated Driving*. Dissertation an der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Spring, P. A. (2011). *Levels of Train Automation: Classification and Determining their Impact on Driver Mental Workload and Vigilance Task Performance*. PhD Thesis- The University of New South Wales. Australia.
- Stanczyk, T. L., Jurecki, R. (2008). *Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen - neue Fahrbahn- und Fahrsimulatorversuche*. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 2008, Volume 46, Vieweg Verlag.
- Statistisches Bundesamt (2010). *Verkehrsunfälle – Unfallanalyse im Straßenverkehr 2009*. Wiesbaden.
- Stern, J. A., Boyer, D., Schroeder, D. (1994). *Blink rate: A possible measure of fatigue*. *Human Factors*, 36, 285-297.
- Stolzmann, W., Sokoll, A., Proettel, A. (2010). *Reaktionszeitdifferenzen bei aufmerksamen und abgelenkten Fahrern*. In: Tagungsband „Aktive Sicherheit“, München.



- Taylor, R. (1990). *Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew system design*. In *Situational Awareness in Aerospace Operations (AGARD-CP-478)* (S. 3/1-3/17). Neuilly Sur Seine, France: NATOAGARD.
- Teichner, W.H. & Krebs, M.J. (1974). *Laws of visual choice reaction time*. *Psychological Review*, 81, 75-98.
- Theeuwes, J. (2001). *The effects of road design on driving*. In P.-E. Barjonet (Ed.) *Traffic Psychology Today* (pp. 241-263). Kluwer, Boston, MA.
- Thrun, S. (2010). *What we are driving at*. Google Official Blog. <http://googleblog.blogspot.de/2010/10/what-were-driving-at.html>
- Toffetti, A., Wilschut, E., Martens, M., Schieben, A., Rambaldini, A., Merat, N., Flemisch, F. O. (2009). *CityMobil: Human factors issues regarding highly-automated vehicles on an eLane*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- Tönert, L., Farid, M., Bengler, K., Schneller, R (2011). *Wahrnehmungs- und Verhaltensleistung des Fahrers bei einem Fahrzeug-Abdrift mit teil-automatisierter Querführung in unterschiedlich kritischen Fahrsituationen*. *VDI Fahrer im 21. Jahrhundert*, Braunschweig.
- Tomaske, W. & Fortmüller, T. (2001). *Der Einfluss von Wahrnehmungsschwellen auf die Auslegung von Bewegungssystemen in der Fahrsimulation*. [Buchverf.] K.P. Gärtner und M. Grant. *Human Factors bei der Entwicklung von Fahrzeugen*. Anhang 1 zum DGLR-Bericht 2001-06.
- Trefflich, B. (2010). *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation an der Technischen Universität Ilmenau.
- Treisman, A. (1964). *Selective attention in man*. *British Medical Bulletin*, 20:12-16.
- Trouvain, B. & Schlick, C. M. (2006). *Binaural Auditory Information Fusion for Effective Supervisory Control of Mobile Multirobot Systems*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Heidelberg, S. 19-24.
- Trouvain, B. & Schlick, C. M. (2007). *A Comparative Study of Multimodal Displays for Multirobot Supervisory Control*. In Harris D. (Hrsg.) *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Springer, Berlin, S. 184-193.
- Waard, D. de (1996). *The Measurement of Drivers' Mental Workload*. Alphen a/d Rijn: Drukkerij Haasbeek. Online verfügbar unter <http://home.zonnet.nl/>.



- Weißgerber, T.; Damböck, D.; Kienle, M.; Bengler K. (2012). *Erprobung einer kontaktanalogen Anzeige für Fahrerassistenzsysteme beim hochautomatisierten Fahren*. In: Tagungsband „5. Tagung Fahrerassistenz“. München. Germany
- Wickens, C. (1980). *The structure of attentional resources*. In R. Nickerson (Hrsg.), (S. 57–68). Hillsdale: Erlbaum.
- Wickens, C. (1984). *Processing resources in attention*. In R. Parasuraman & D. Davies (Hrsg.), *Varieties of Attention* (S. 63–101). New York: Academic Press.
- Wickens, C. D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance*. 2. Aufl. Herper Collins, New York.
- Wickens, C. D (2008). *Situation Awareness: Review of Mica Endsley's 1995 Articles on Situation Awareness Theory and Measurement*. Human Factors - Golden Anniversary Special Issue.
- Wickens, C. D. & Liu, Y. (1988). *Codes and modalities in multiple resources: a success and a qualification*. Human Factors, 30(5):599-616.
- Wickens, C.D., Hollands, J. G. (1999). *Engineering Psychology and Human Performance*. 3. Aufl. Prentice Hall.
- Wickens, C. & McCarley, J. (2008). *Applied Attention Theory*. Boca Raton: CRC Press.
- Wiener, E. (1989). *Human Factors of Advanced Technology (Glass Cockpit.) Transport Air-craft (NASA-CR-177528)*. Moffet Field, CA: NASA Ames Research Center.
- Wiener, E. L. & Curry, R. E. (1980). *Flight deck automation: Promises and problems*. Ergonomics, 23, 995-1011.
- Wilde, G. J. S. (1982). *The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health*. In: Risk Analysis, Bd. 2, S. 209.
- Wilson, G.C., et. al. (2004). *Operator functional state assessment*. Paris, FR, North Atlantic Treaty Organisation (NATO), Research and Technology Organisation (RTO) BP 25, F-92201, Neuilly-sur-Seine Cedex, France: 220.
- Winner, H. & Hakuli, S. (2006). *Conduct-by-Wire – Following a New Paradigm for Driving into the Future*. Proceedings of FISITA World Automotive Congress.
- Winner, H., Hakuli, S., Bruder, R., Konigorski, U., Schiele, B. (2006). *Conduct-by-Wire – ein neues Paradigma für die Weiterentwicklung der Fahrerassistenz*. 4. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Löwenstein, 2006.
- Winner, H., S. Hakuli, et al. (2006). *Conduct-by-Wire – Ein neues Paradigma für die Weiterentwicklung der Fahrerassistenz*. Workshop Fahrerassistenzsysteme 2006. Löwenstein.



- Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) (2009). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner.
- Winner, H., Heuss, O. (2005): *X-by-Wire Betätigungselemente – Überblick und Ausblick*, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug. Darmstadt. ISBN 3-935089-83-X.
- World Health Organisation WHO (2011). *Decade of Action 2011-2020*. <http://www.who.int/roadsafety/en/>
- Young, K., Regan, M., Hammer, M. (2003). *Driver Distraction: a review of the literature*. Technical report, Monash University Accident Research Centre. Report No. 206.
- Zielinski, O., Hengstermann T. (2006). *Roboter und Automatisierungstechnik*. Vorlesungsfolien der Hochschule Bremerhaven. Wintersemester 2006/2007.



Anhang A

A.1 Instruktionen Studie 1

Allgemein

Herzlich willkommen am Lehrstuhl für Ergonomie!

Vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben an unserem Versuch teilzunehmen. Der Versuch wird hier in unserem Fahrsimulator stattfinden und ca. eineinhalb Stunden dauern. Wir werden zunächst mit einer Eingewöhnungsfahrt von ca. 30 Minuten starten. Dabei wollen wir Ihnen den Simulator und die Versuchsbedingungen vorstellen. Anschließend werden wir die Versuchsfahrt von ca. 60 Minuten Dauer durchführen. Wie genau das Ganze funktioniert, möchten wir Ihnen aber direkt im Fahrzeug erklären. Bevor Sie einsteigen möchte ich Sie jedoch noch bitten Ihr Handy auszuschalten, falls Sie eines dabei haben. Ansonsten könnte evtl. unsere empfindliche Messtechnik gestört werden. Außerdem bitte noch nicht losfahren, ich würde Ihnen gerne noch die Bedienung des Fahrzeuges erklären.

Wir möchten Ihnen heute unterschiedliche Assistenzsysteme vorstellen und ihre Meinung zu diesen Systemen wissen. Dazu werden wir Ihnen zunächst die unterschiedlichen Systeme in einer Eingewöhnungsfahrt vorstellen.

Im Hinblick auf den späteren Versuch achten Sie bitte darauf sich allgemein an die Straßenverkehrsordnung zu halten. Grundsätzlich gilt während des gesamten Versuches ein Überholverbot unabhängig von der Beschilderung, bleiben Sie also bitte hinter den vorausfahrenden Fahrzeugen. Sie fahren bei schönem trockenem Wetter, d. h. Geschwindigkeitsbegrenzungen bei Nässe dürfen Sie während des Versuches und der Eingewöhnungsfahrt ignorieren. Fahren Sie bitte nicht zu schnell. Fahren Sie bitte aber auch nicht zu langsam. Halten Sie sich also so weit wie möglich bitte immer an die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit, außer natürlich der Verkehr oder der Straßenverlauf lässt es nicht zu. Geschwindigkeitsbegrenzungen beginnen grundsätzlich beim Schild, d. h. bitte versuchen Sie auch hier schon eine entsprechende vorgeschriebene Geschwindigkeit zu fahren.

Im späteren Versuch werden wir Sie bitten, während des Fahrens eine kleine Nebenaufgabe zu bearbeiten. Dazu werden wir Ihnen im CID (Monitor in der Mitte) in regelmäßigen Abständen Zahlen zwischen 1 und 3 einblenden. Immer wenn Sie eine 2 im Display sehen, sagen Sie bitte laut „ja“. Die Zahlen wechseln sich dabei alle halbe Sekunde ab. Dass die Nebenaufgabe verfügbar ist, wird Ihnen durch einen dreifachen Piepton ähnlich eines Formel-1-Starts angezeigt. Nach dem ersten Piepton haben sie 3 Sekunden Zeit bis die Aufgabe beginnt. Die Aufgabe wird immer für 30 Sekunden aktiv sein. Ihre Aufgabe dabei ist es, so viele 2er wie möglich laut mit „ja“ zu bestätigen, ohne jedoch die Hauptaufgabe, nämlich sicheres und vorschrifts-



mäßiges Fahren, zu vernachlässigen. Die sichere Fahrzeugführung hat dabei oberste Priorität. Im Zweifel konzentrieren Sie sich also lieber auf das Fahren.

Eingewöhnungsfahrten

Manuelle Eingewöhnungsfahrt

Wir möchten Sie bitten in den folgenden ca. 10 Minuten manuell, also wie gewohnt zu fahren.

Am Ende der nächsten 10 Minuten Eingewöhnungsfahrt werden wir Ihnen beispielhaft zwei Nebenaufgaben einspielen, damit Sie sehen, wie es später im Versuch ablaufen wird. Versuchen Sie dabei ruhig schon jetzt so viele 2er wie möglich zu identifizieren, wie bereits erwähnt, allerdings ohne die Hauptaufgabe, nämlich sicheres und vorschriftsmäßiges Fahren, zu vernachlässigen.

Assistierte Eingewöhnungsfahrt

Wie bereits erwähnt wollen wir Ihnen ein Assistenzsystem vorstellen. Auch dazu haben wir wieder einen ca. 10-minütigen Kurs zur Eingewöhnung für Sie vorbereitet. Ich werde nun diesen Kurs laden, bitte bleiben Sie sitzen und fahren Sie noch nicht gleich los.

Der Unterschied zur manuellen Fahrt ist, dass Ihnen das Fahrzeug jetzt beim Autofahren etwas unter die Arme greifen möchte. Wenn Sie jetzt dann gleich losfahren werden Sie nach ca. 800 m ein kleines graues Symbol im Tacho sehen. Dieses Symbol zeigt an, dass das Assistenzsystem verfügbar ist. Bitte schalten Sie sobald verfügbar das System über den Check-Knopf am Blinkerhebel an. Wenn das System arbeitet, wird das graue Symbol farbig.

Das System wird Sie sowohl bei der Geschwindigkeitshaltung, wie auch beim Lenken unterstützen. Wenn sie zu weit nach links oder zu weit nach rechts fahren wird das System mit einer spürbaren Kraft am Lenkrad eingreifen und Sie wieder in Richtung Spurmitte drücken. Auch am Gaspedal werden Sie einen Druckpunkt, also eine Kraft spüren, die Ihnen anzeigt, welche Gaspedalstellung erforderlich ist, um sich an die Geschwindigkeitsbegrenzungen zu halten. Auch wenn Sie zu nah auf ein vorausfahrendes Fahrzeug auffahren, wird das Gaspedal spürbar eingreifen. Sie können das Fahrzeug jedoch sowohl beim Lenken wie auch beim Gasgeben/Bremsen jederzeit überstimmen.

Wenn Sie auf die Bremse treten oder beim Lenken die Kraft des Systems überstimmen, wird sich das System abschalten. Sollten Sie das System aus Versehen abschalten oder weil Sie aus irgendeinem Grund der Meinung sind eingreifen zu müssen, schalten Sie es bitte bei nächster Gelegenheit wieder an. Sie können in den nächsten 10 Minuten gerne nach Herzenslust ausprobieren, was das System macht. Natürlich bitte nur innerhalb der Straßenverkehrsordnung.



Wenn das System funktioniert, wird Ihnen ca. 150 m vor Geschwindigkeitsbegrenzungen das Gaspedal ruckartig entgegenkommen. Wenn Sie sich weiter an die Vorgabe des aktiven Gaspedals halten, werden Sie mit der vorgeschriebenen Geschwindigkeit in die Geschwindigkeitsbegrenzung fahren.

Auch in diesem Durchgang werden wir Ihnen zum Ende hin beispielhaft zwei Nebenaufgaben einspielen, damit Sie sehen, wie es später im Versuch ablaufen wird. Versuchen Sie auch diesmal so viele 2er wie möglich zu identifizieren, ohne die Hauptaufgabe, nämlich sicheres und vorschriftsmäßiges Fahren, zu vernachlässigen.

Autonome Eingewöhnungsfahrt (ohne/mit Händen am Lenkrad)

Im nächsten Schritt wollen wir Ihnen ein Automationssystem vorstellen. Auch dazu haben wir wieder einen ca. 10-minütigen Kurs zur Eingewöhnung für Sie vorbereitet. Ich werde nun diesen Kurs laden, bitte bleiben Sie auch jetzt wieder sitzen und fahren Sie noch nicht gleich los.

Sie werden denselben Eingewöhnungskurs nun nochmals fahren. Diesmal wird Ihnen das Fahrzeug das Autofahren fast vollständig abnehmen. Sie selbst müssen nun nur noch überwachen ob das Fahrzeug alles richtig macht. Bitte behalten Sie dazu während des gesamten Durchgangs die Hände am Lenkrad / nehmen Sie die Hände dazu vom Lenkrad.

Nach ca. 800 m wird über ein graues Symbol im Tacho angezeigt, dass das System verfügbar ist. Bitte schalten Sie sobald verfügbar das System über den Check-Knopf am Blinkerhebel an. Wenn das System arbeitet, wird das graue Symbol farbig. Das System wird Ihnen sowohl das Gasgeben und Bremsen wie auch das Lenken weitgehend abnehmen. Sobald Sie das System anschalten kann das Auto selbstständig Gas geben, bremsen und lenken. Es erkennt Geschwindigkeitsschilder und fährt bei freier Fahrbahn die erlaubte Höchstgeschwindigkeit. Ca. 100m vor Geschwindigkeitsbegrenzungen wird das Fahrzeug selbstständig verzögern und mit einer entsprechend angepassten Geschwindigkeit in die Geschwindigkeitsbegrenzung fahren. Wenn das System richtig funktioniert, müssen Sie nicht auf die Bremse steigen. Das System erkennt auch Fahrzeuge und wenn ein Auto vor Ihnen langsamer fährt als die erlaubte Geschwindigkeit wird Ihr Fahrzeug sich der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Autos anpassen und dazu falls nötig bremsen oder Gas geben. Das Assistenzsystem kann wie gesagt außerdem das Lenken übernehmen. D. h. Ihr Auto hält selbstständig die Spur und fährt Kurven. Wenn Sie dabei die Hände am Lenkrad haben, spüren Sie eine Kraft, die das Lenkrad bewegt. Sie können das Fahrzeug jedoch sowohl beim Lenken wie auch beim Gasgeben/Bremsen jederzeit überstimmen. Wenn Sie auf die Bremse treten oder beim Lenken die Kraft des Systems überstimmen, wird sich das System abschalten. Sollten Sie das System aus Versehen abschalten oder weil Sie aus irgendeinem Grund der Meinung sind eingreifen zu müssen, schalten Sie es bitte bei nächster Gelegenheit wieder an.



Sie können in den nächsten 10 Minuten gerne nach Herzenslust ausprobieren, was das System macht. Natürlich bitte nur innerhalb der Straßenverkehrsordnung. Auch in diesem Durchgang werden wir Ihnen zum Ende hin beispielhaft zwei Nebenaufgaben einspielen, damit Sie sehen, wie es später im Versuch ablaufen wird. Versuchen Sie auch diesmal so viele 2er wie möglich laut zu bestätigen, ohne die Hauptaufgabe nämlich sicheres und vorschriftsmäßiges Fahren zu vernachlässigen.

Messfahrten (manuell/assistiert/hochautomatisiert)

Jetzt da Sie schon etwas vertraut sind mit dem Fahrzeug und unserer Simulatorumgebung, werden wir als nächstes den Versuch durchführen. Nach der Versuchsfahrt werden wir die Simulation kurz unterbrechen werden, damit Sie die Möglichkeit haben die Fahrt zu bewerten. Der folgenden Abschnitt dauert ca. 15 Minuten. Sie fahren während des gesamten Versuches bei schönem trockenem Wetter und dürfen Geschwindigkeitsbegrenzungen bei Nässe ignorieren. Der einzige Unterschied zur Eingewöhnungsphase besteht darin, dass Sie während der Versuchsfahrt viel mehr Nebenaufgabenangebote bekommen werden. Sie werden alle 30 Sekunden für ungefähr 30 Sekunden eine Nebenaufgabe bearbeiten können. D.h. 30 Sekunden Fahrt, 30 Sekunden Nebenaufgabe usw..... Ihre Aufgabe während des gesamten Versuches ist es, wie in der Eingewöhnungsfahrt möglichst viele Zweien im Display laut mit „ja“ zu bestätigen, ohne jedoch die Hauptaufgabe nämlich sicheres und vorschriftsmäßiges, Fahren zu vernachlässigen.

Damit für Sie die Versuchsfahrt nicht allzu langweilig wird, haben wir einen kleinen Wettbewerb eingeführt. Während der Fahrt werden Sie Punkte machen aber auch verlieren können. Wer am Ende die meisten Punkte hat, erhält zusätzlich zur Probandenvergütung noch einmal 50 Euro. Die Punkte verteilen sich wie folgt:

- +3 Punkt pro richtigem Ja
- 3 Punkte für ein falsches Ja
- 0 Punkte für eine übersehene 2
- 10 Punkte für zu langsames oder zu schnelles Fahren (+/- 10 km/h der erlaubten Geschwindigkeit) Dies gilt natürlich nicht wenn Sie aufgrund von Verkehr oder Straßenverlauf (z. B. Kreuzungen) langsamer fahren müssen.
- 30 Punkte für ein Abkommen vom Fahrstreifen, d. h. wenn Sie mit Teilen des Fahrzeugs in die Gegenspur oder auf die Wiese fahren
- 75 Punkte für Kollisionen oder Unfälle

Wir wollen über diese Bewertung keine Rückschlüsse auf Ihr Können ziehen. Die Punktevergabe ist rein dazu gedacht, den Versuch für Sie etwas interessanter zu gestalten. Uns interessiert in erster Linie ihre Bewertung der Systeme. Wir werden jetzt dann sofort mit der Versuchsfahrt beginnen. Da wir die Nutzung des Systems



untersuchen wollen, würden wir Sie bitten diese Brille aufzusetzen. Mit dieser Brille können wir feststellen, wo sie während der Fahrt hinschauen. Aber keine Angst. Sie können während des Versuches überhaupt nichts falsch machen. Wir wollen nur das System untersuchen, nicht Ihre persönliche Leistung. Ich werde jetzt nach hinten gehen um die Brille auf Sie anzupassen. Ich werde mich zu diesem Zweck mit Ihnen gleich über eine Gegensprechanlage unterhalten. Bitte fahren Sie nach dem Start der Simulation nicht sofort los, sondern erst wenn ich Ihnen mein O.K. gebe.



A.2 NASA-TLX

Wie haben Sie das **Fahren** erlebt? Wie hoch war dabei die Beanspruchung in den einzelnen Dimensionen? Markieren Sie dazu auf den folgenden Skalen, in welchem Maße Sie sich in den sechs genannten Dimensionen beansprucht oder gefordert gesehen haben. **Bitte bewerten Sie dabei die Gesamtaufgabe, also das Autofahren, zusammen mit der Nebenaufgabenbearbeitung.**

1. Mentale (geistige) Beanspruchung
In welchem Maße stellte die Fahrt eine geistige Anforderung dar (denken, entscheiden, erinnern, beobachten, suchen)?
2. Physische (körperliche) Beanspruchung
Wie sehr waren Sie während der Fahrt körperlich beansprucht (drücken, ziehen, bewegen, etc.)?
3. Anstrengung
Wie sehr mussten Sie sich bei der Fahrt insgesamt anstrengen (geistig und körperlich)?
4. Emotionale Empfindung
Wie unsicher, entmutigt und gestresst fühlten sie sich während der Fahrt?
5. Zeitdruck:
Wie sehr haben Sie sich durch die Fahraufgabe unter Zeitdruck gefühlt? War das Arbeitstempo eher langsam und gemächlich oder schnell und hektisch?
6. Aufgabenerfüllung:
Wie erfolgreich konnten Sie die Fahraufgabe erfüllen? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrem Ergebnis?



Anhang B

B.1 Instruktionen Studie 2

Allgemein

Herzlich willkommen am Lehrstuhl für Ergonomie!

Vielen Dank dass Sie sich bereit erklärt haben an unserem Versuch teilzunehmen. Der Versuch wird hier in unserem Fahrsimulator stattfinden und zwischen einer und eineinhalb Stunden dauern. Wir werden zunächst mit einer kleinen Eingewöhnungsfahrt starten, um Ihnen den Simulator und die Versuchsbedingungen vorzustellen. Anschließend werden wir zwei Versuchsfahrten mit jeweils ca. 30 Minuten Dauer durchführen. Wir wollen dabei ein von uns entwickeltes Assistenzsystem testen. Wie genau das Ganze funktioniert, möchten wir Ihnen aber direkt im Fahrzeug erklären.

Bevor Sie einsteigen möchte ich Sie jedoch noch bitten Ihr Handy auszuschalten, falls Sie eines dabei haben. Ansonsten könnte evtl. unsere empfindliche Meßtechnik gestört werden.

Funktion des Assistenzsystems und Aktivierung

Wir haben für den Versuch in unserem Fahrsimulator ein Fahrerassistenzsystem eingebaut, das das Auto innerhalb gewisser Grenzen selbstständig fahren kann. Was das System kann und wo seine Grenzen liegen, werden wir Ihnen jetzt im Verlauf der Einführung genauer erklären.

Sobald Sie das System anschalten, kann das Auto selbstständig Gas geben, bremsen und lenken. Dabei fährt es bei freier Fahrbahn die hier erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Auf der gesamten Versuchsstrecke gilt diese Geschwindigkeit als Geschwindigkeitsbegrenzung, auch wenn Sie selber fahren. Wenn ein Auto vor Ihnen langsamer fährt als die 100 km/h, wird Ihr Fahrzeug sich der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Autos anpassen und dazu falls nötig bremsen oder Gas geben. Das Assistenzsystem kann wie gesagt außerdem das Lenken übernehmen, d. h. Ihr Auto kann selbstständig die Spur halten und Kurven fahren. Wenn Sie dabei die Hände am Lenkrad haben, spüren Sie eine Kraft die das Lenkrad bewegt.

D. h. noch einmal zusammengefasst, dass das Assistenzsystem, nachdem Sie es eingeschaltet haben, das Fahrzeug selbstständig innerhalb des Fahrstreifens fahren kann und Sie somit die Kontrolle über das Fahrzeug völlig an das Assistenzsystem abgeben können. Alles Weitere möchte ich Ihnen gerne im Fahrzeug und während einer kurzen Eingewöhnungsfahrt erklären.

Während der Eingewöhnungsfahrt und später während der Versuchsfahrt werden Sie die Möglichkeit haben, das Assistenzsystem einzuschalten. Dazu werden Sie im Tacho eine Anzeige sehen. Wenn das System verfügbar ist, also angeschaltet werden



kann, wird im Tacho ein graues Symbol erscheinen. Über einen Druck auf die Checktaste am Blinkerhebel wird das System aktiviert. Ausschalten können Sie das System auf drei Arten:

- wieder über die Checktaste,
- über ein Treten auf die Bremse,
- durch ein Überdrücken der Kraft, die am Lenkrad anliegt und Sie in der Spur halten möchte.

Wie genau das System arbeitet und wie die Bedienung funktioniert, möchten wir Ihnen nun während einer kurzen Eingewöhnungsfahrt zeigen. Wichtig für Sie ist noch einmal:

- Das Assistenzsystem kann das Fahrzeug selbständig fahren.
- Es besitzt jedoch, wie bereits erwähnt, Grenzen, die es nicht mehr beherrschen kann. In komplexeren Situationen, in denen z. B. ein Spurwechsel nötig ist, benötigt das System Ihre Hilfe. Ebenso benötigt das System eindeutig erkennbare Fahrbahnmarkierungen, um das Fahrzeug in der Spur zu halten. Das System erkennt solche Grenzen und wird Sie über einen Warnton in Form eines Gongs darauf aufmerksam machen, dass Sie wieder selber weiterfahren müssen.

Das System bleibt auch nach dem Warnton so lange es kann aktiv und fährt das Fahrzeug weiter. Es schaltet sich erst ab, wenn es entweder nicht mehr weiter kann oder Sie das System von sich aus abschalten. Während der gesamten Versuchsfahrt wird das System keine Fehler machen, d. h. es wird nicht ausfallen und es wird auch keine fehlerhaften Handlungen absolvieren. Es wird Sie außerdem auch vor jeder Systemgrenze warnen. Sie müssen das Fahrzeug also nur nach Aufforderung durch den Warngong übernehmen.

Fahraufgabe

Bevor Sie losfahren noch eine kurze Erklärung was Ihre Aufgabe nun während der Eingewöhnungsfahrt und später während der Versuchsfahrt ist. Sie fahren bitte vom Anfang der Strecke bis zum Ziel. Wo es nötig ist, ist das Ziel ausgeschildert. Bitte folgen Sie der Beschilderung falls dies möglich ist. Oberste Priorität hat dabei aber wie im realen Verkehr auch, dass sie Zusammenstöße mit anderen Fahrzeugen, Personen oder Gegenständen sowie gefährliche Manöver vermeiden. Sollten Sie der Beschilderung aus welchen Gründen auch immer einmal nicht folgen können, entscheiden Sie sich bitte für den sicheren Weg. Der Versuch kann trotzdem fortgeführt werden. Halten Sie sich während der Fahrt bitte an die allgemein gültigen Verkehrsregeln und achten Sie bitte auch darauf, dass bei einem Spurwechsel Fahrzeuge von hinten kommen können. Achten Sie bitte jetzt in der Eingewöhnungsfahrt und später



während der Versuchsfahrt auf unsere Ansagen. Wir werden Ihnen immer sagen auf welcher Spur Sie fahren sollen. Sollte Ihnen während des Fahrens schlecht werden oder Sie irgendwelche anderen Beschwerden haben, sagen Sie uns bitte Bescheid, wir können den Versuch jederzeit kurz unterbrechen.

Nebenaufgabe

Sie haben auch sicherlich bereits bemerkt, dass wir neben Ihnen auf dem Beifahrersitz ein kleines Spiel aufgebaut haben. Mit diesem Spiel können Sie während des Versuches Geld verdienen. Dazu müssen Sie die bunte Zielscheibe mit dem Fadenkreuz verfolgen. Das Fadenkreuz bedienen Sie mit den beiden Minijoysticks des Gamepads. Mit dem rechten Stick verschieben Sie das Kreuz in horizontaler Richtung, mit dem linken Stick verschieben Sie das Kreuz vertikal. Es wird jede Sekunde geprüft wie nah Sie an der Mitte der Zielscheibe sind und Sie erhalten dadurch Geld. Je besser Sie sich in der Mitte halten, umso mehr Geld können Sie verdienen. Gelb: 5 Cent/s, Rot: 3 Cent/s, Blau 2 Cent/s, Schwarz 1 Cent/s.

Bitte bedienen Sie das Gamepad immer mit beiden Händen. Außerdem möchten wir Sie bitten, sich während der Versuchsfahrt bei angeschaltetem Assistenzsystem völlig auf die Nebenaufgabe zu konzentrieren und so viel Geld wie möglich zu verdienen. Das Geld, das Sie hier erspielen, wird Ihnen später ausgezahlt. Sie können sich, wie bereits mehrfach erwähnt, auf das System verlassen. Ihr Eingreifen ist erst nach einem Warnton notwendig. Wenn Sie die Nebenaufgabe unterbrechen müssen, legen Sie bitte den Controller in der Mittelkonsole ab (Kuhle bei der Handbremse).

Wenn sie eingreifen, gilt, wie bereits mehrfach erwähnt: Ihre Aufgabe ist es in Richtung Ziel zu fahren, dabei jedoch keine anderen Verkehrsteilnehmer oder sich selbst zu gefährden, und sich an die allgemeingültigen Verkehrsregeln zu halten.

Messfahrt

Auch in der Versuchsfahrt ist Ihre Aufgabe in Richtung Ziel zu fahren und dabei Zusammenstöße mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Gegenständen zu vermeiden. Wo es nötig ist, ist das Ziel ausgeschildert. Bitte folgen Sie der Beschilderung falls dies möglich ist. Oberste Priorität hat dabei nach wie vor, dass Sie Zusammenstöße mit anderen Fahrzeugen, Personen oder Gegenständen sowie gefährliche Manöver vermeiden. Sollten Sie der Beschilderung aus welchen Gründen auch immer einmal nicht folgen können, entscheiden Sie sich bitte für einen sicheren Weg. Der Versuch kann trotzdem fortgeführt werden.

Wir werden Ihnen während des Versuches immer wieder einmal sagen, auf welcher Spur Sie bitte weiterfahren und ob Sie das Assistenzsystem anschalten oder selber fahren sollen. Wichtig für Sie ist, dass wir mit diesem Versuch nicht Ihre Leistung und Ihr Verhalten als Fahrer messen wollen. Wir wollen mit diesem Versuch das von uns entwickelte Assistenzsystem testen. Sie können nun losfahren.



B.2 Boxplots der Zeiten in den Übernahmephasen

Boxplots für die Zeiten der Versuchspersonen in den jeweiligen Übernahmephasen bei Studie 2: „Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren“.

Phase 1: Reaktion

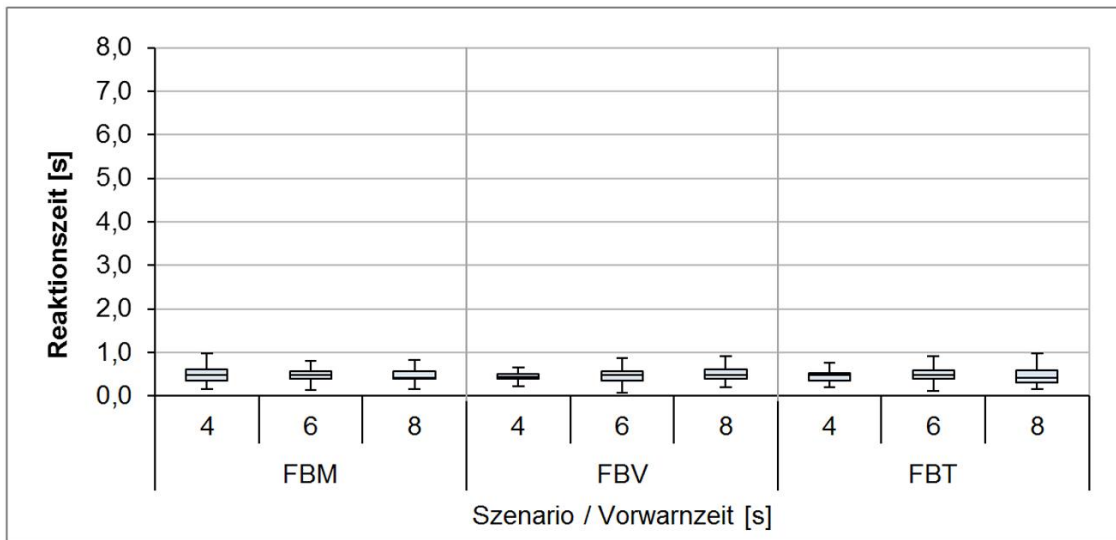


Abbildung B-1: Boxplots für die Reaktionszeiten der Probanden in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“ (N = 32).

Phase 2: Blickzuwendung

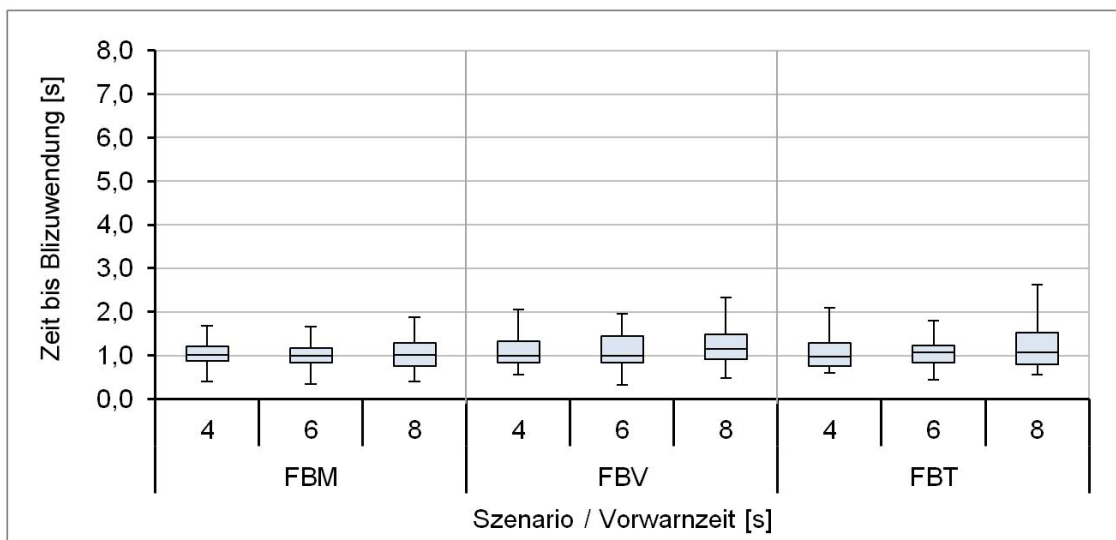


Abbildung B-2: Boxplots für die Zeit bis zur ersten Blickzuwendung in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“ (N = 32).



Phase 3: Hands-On

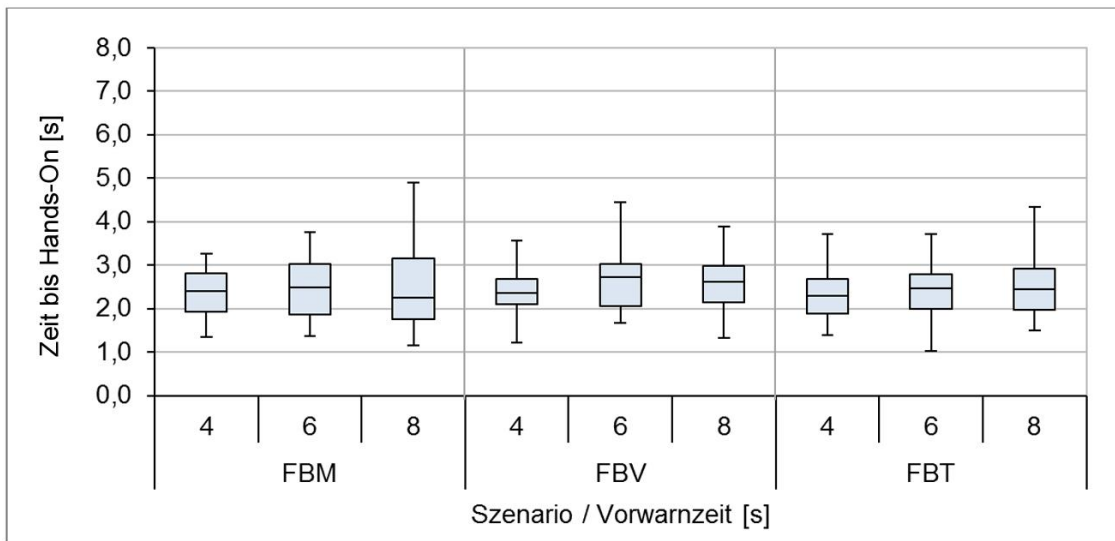


Abbildung B-3: Boxplots für die Zeit bis Hands-On in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“ (N = 32).

Phase 4: Hands-On

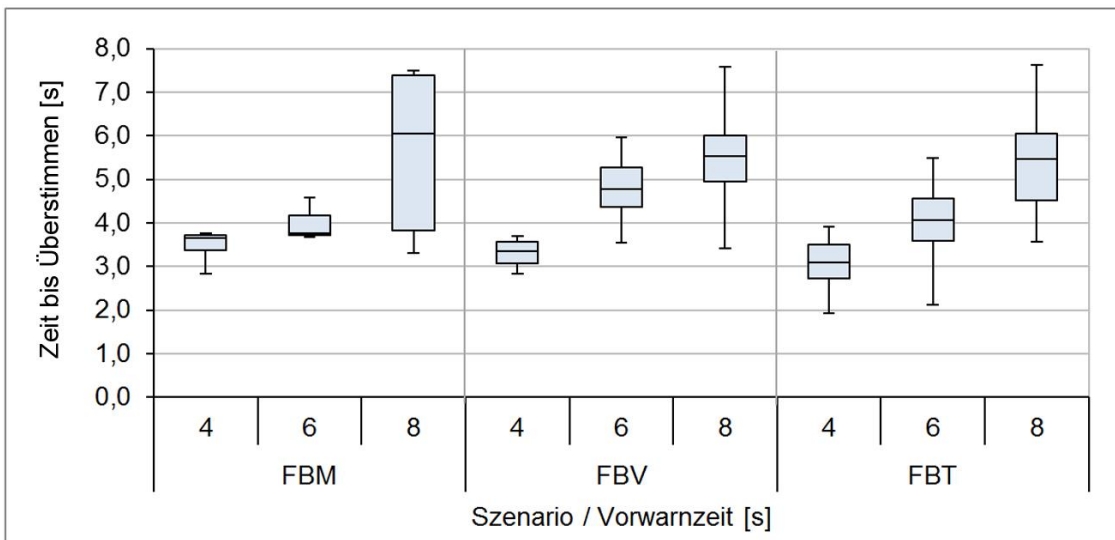


Abbildung B-4: Boxplots für die Zeit bis zur Deaktivierung des Systems in Abhängigkeit von den Faktoren „Szenario“ und „Vorwarnzeit“ (N = 32). Die Stichprobengrößen unterscheiden sich. Sie sind Tabelle 6-20 zu entnehmen.



B.3 Trajektorien

In den Übernahme-situationen gefahrene Trajektorien in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit

FBV

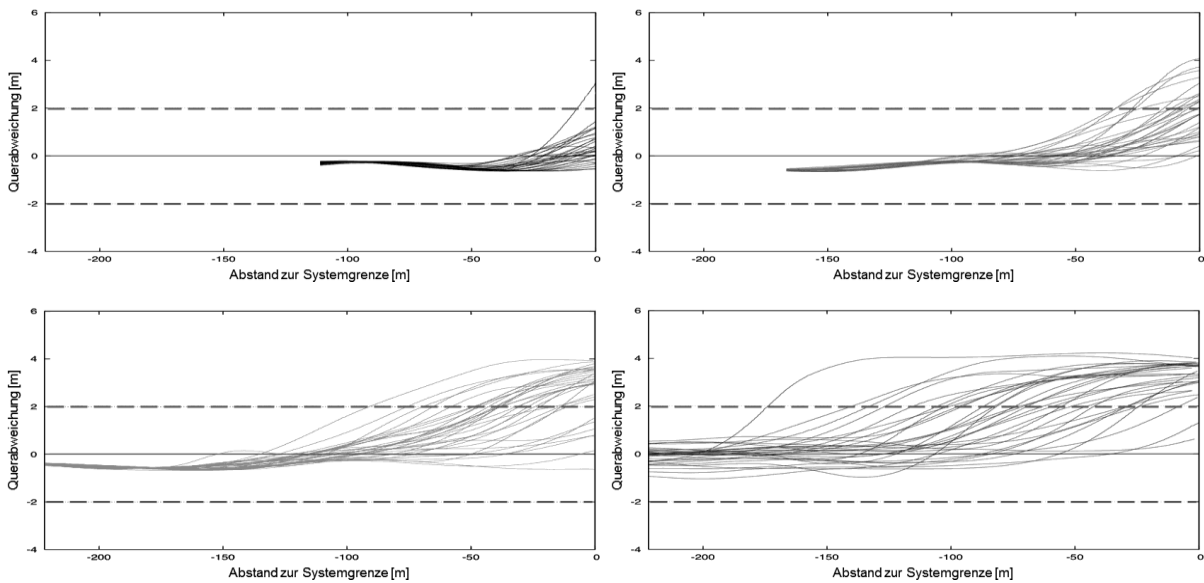


Abbildung B-5: Von der Übernahmeaufforderung bis zur Systemgrenze gefahrene Trajektorie der einzelnen Probanden bei FBV ($N = 32$). Von links oben nach rechts unten: Vorwarnzeiten 4, 6, 8 Sekunden und die Baselinefahrt.

FBT

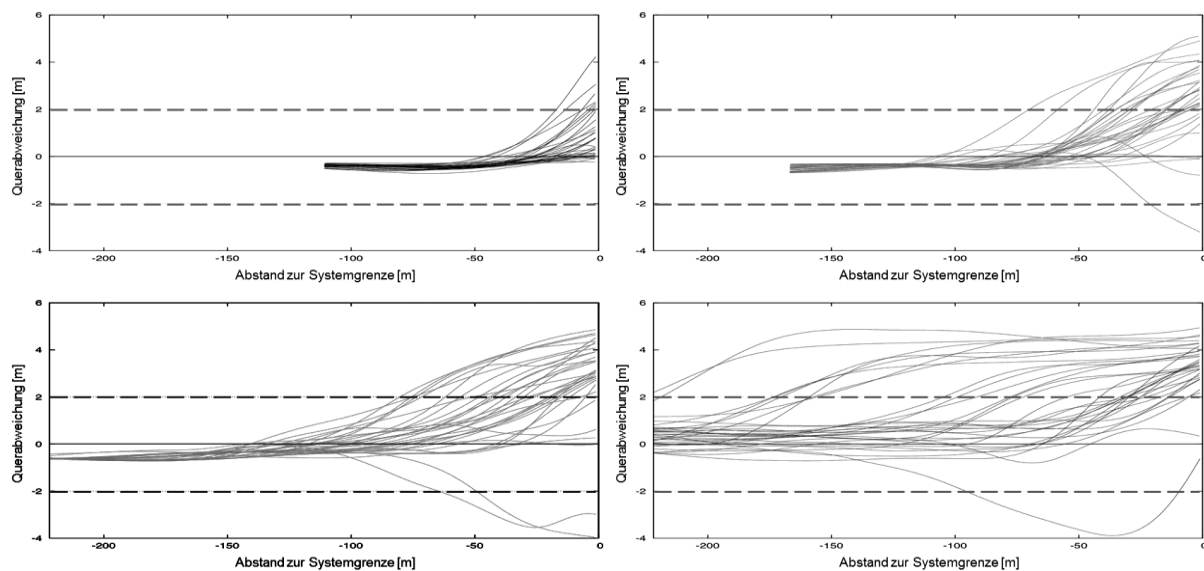


Abbildung B-6: Von der Übernahmeaufforderung bis zur Systemgrenze gefahrene Trajektorie der einzelnen Probanden bei FBT ($N = 32$). Von links oben nach rechts unten: Vorwarnzeiten 4, 6, 8 Sekunden und die Baselinefahrt.